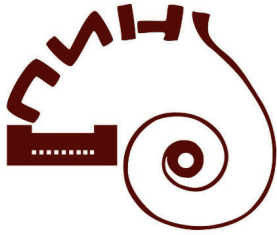




АСТРОБИОЛОГИЯ



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

АСТРОБИОЛОГИЯ

Под редакцией А. Ю. Розанова, Е. А. Сапрыкина

Дубна 2024

ББК 22.6
А91

Авторы: чл.-корр. РАН А. О. Алексеев, д.г.-м.н. Т. В. Алексеева,
А. Н. Афанасьева, почетный проф. РАН Р. Б. Гувер, М. И. Капралов,
к.б.н. Е. М. Ривкина, А. К. Рюмин, к.б.н. О. С. Самылина,
к.х.н. М. Б. Симаков, к.ф.-м.н. В. Н. Снытников,
к.ф.-м.н. М. В. Фронтасьева, к.ф.-м.н. В. А. Цельмович,
Е. А. Сапрыкин, акад. РАН А. Ю. Розанов

Рецензент — чл.-корр. РАН *Е. А. Красавин*

Астробиология / А. О. Алексеев, Т. В. Алексеева, А. Н. Афанасьева и др.;
А91 Под ред. А. Ю. Розанова, Е. А. Сапрыкина. — Дубна: ОИЯИ, 2024. — 199 с.
(89 ил., 9 текст-табл.).

ISBN 978-5-9530-0633-0

ISBN 978-5-9530-0633-0

© Объединенный институт
ядерных исследований, 2024

Оглавление

<i>ПРЕДИСЛОВИЕ</i>	6
ГЛАВА I. История астробиологии. Теории происхождения жизни.	
Пребиотическая химическая эволюция	7
1.1. Становление астробиологии как научной дисциплины	7
1.2. Развитие взглядов на вопрос происхождения жизни	10
1.3. Мир РНК	14
1.4. Абиогенный синтез пребиотических соединений	17
1.5. Гипотеза астрокатализа	25
1.6. Проблема хиральности	27
1.7. Доклеточные формы компартментализации	32
1.8. Автокомбинаторика биофильных элементов. Протогеном	34
ГЛАВА II. Земля как объект астробиологии	39
2.1. Модели первичных ситуаций на ранней Земле	39
2.2. Бактериальная палеонтология и биосферные события на ранней Земле	42
2.3. Экосистемы экстремальных сред	55
2.4. Экосистемы вечной мерзлоты – модель для астробиологии	60
2.5. Ископаемые почвы геологического прошлого Земли как аналоги солоидов внеземных объектов	76
2.6. Содовые озера как реликтовые биотопы	80
2.7. Выживаемость в условиях космоса	85
ГЛАВА III. Астробиологические исследования внеземного материала	90
3.1. Основы метеоритики	90
3.2. Органические соединения в углистых хондритах	100
3.3. Морфология прокариот	105
3.4. Бактериальная палеонтология и исследования метеоритов	110
3.5. Космическая пыль и ее роль в астробиологии	124
ГЛАВА IV. Механизмы панспермии. Поиск обитаемых зон Вселенной	140
4.1. Исследования планетарной компоненты Солнечной системы	140
4.2. Гипотеза кометной панспермии	160
4.3. Методы, цели и перспективы поиска экзопланет	166
4.4. Поиск внеземных цивилизаций	170
ПРИЛОЖЕНИЕ	176
Литература	178

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый читателю труд является первой попыткой в нашей стране обобщения материала по астробиологии. К его созданию были привлечены, как вы видите по перечню авторов, огромные силы специалистов, имеющих отношение к астробиологии, хотя понимание, что такое астробиология, так и не сформировалось окончательно в нашем коллективе. Авторы вложили в этот труд информацию, как казалось, по вопросам, имеющим ОТНОШЕНИЕ к астробиологии, хотя некоторые разделы связаны больше с астрономией, палеонтологией и рядом других дисциплин. Очень важные экспериментальные данные, многие из которых сегодня уже существуют, почти не вошли в содержание этого труда. Также минимально освещаются вопросы формирования и существования разных гипотез, поскольку мы считали, что это, скорее, предмет истории науки. Некоторые вопросы излагаются под влиянием пристрастия авторов к тем или иным концепциям. Но это неизбежно при становлении еще совсем молодой науки астробиологии. Самое главное, что мы, авторы этого труда, хотели показать, что астробиология очень ценна для формирования общего мировоззрения, поскольку самый основной вывод астробиологических исследований за последние 20–30 лет неизбежен: жизнь произошла не на Земле. При этом, конечно, надо вспомнить, что проводимые эксперименты с выживаемостью организмов в космосе тоже, фактически, подтверждают этот вывод. Этот сложный труд был бы невозможен без помощи многих наших знакомых и коллег, таких как М.М. Астафьева, Н.Г. Бочкарев, Л.М. Гиндилис, Е.А. Жегалло, проф. Р. Саладино, М.В. Рагульская, акад. Н.С. Кардашев, А.П. Бояркина, А.Б. Котов, Н.В. Грубова, Н.С. Корчагин и др., которым мы выражаем свою глубокую признательность. Мы заранее благодарны и тем, кто, просмотрев эту книгу, откликнется советами или критическими замечаниями.

На страницах монографии изложена история развития взглядов на вопрос происхождения жизни, этапы становления астробиологии как науки, описаны фактология и модели, на которых эти взгляды основаны, и очерчен круг нерешенных вопросов и перспективных направлений астробиологии.

ГЛАВА I

История астробиологии. Теории происхождения жизни. Пребиотическая химическая эволюция

1.1. Становление астробиологии как научной дисциплины

Астробиология – междисциплинарная наука, изучающая происхождение, эволюцию и распространенность жизни во Вселенной. В ней используются методы из разных областей знаний: физики, химии, астрономии, астрохимии, биологии, геологии, геохимии и палеонтологии. Предметом изучения являются процессы, связанные с жизнью: механизмы и условия ее появления, возможные пути распространения и т.п. Основными задачами астробиологии являются моделирование предполагаемых условий для появления жизни, исследование пребиотической эволюции органического вещества, поиск жизни на планетах и спутниках Солнечной системы и за ее пределами, изучение следов жизни в метеоритном материале, определение способов распространения жизни в космическом пространстве.

По-видимому, впервые термин был использован А.Дж. Штернфельдом (Sternfeld, 1935) в статье по вопросам существования внеземных цивилизаций, опубликованной в 1935 г. В 1941 г. философ Л. Лафлер в своем эссе под названием «Астробиология» описал термин в более узком смысле – как рассмотрение жизни где-либо за исключением Земли (Lafleur, 1941). В 1953 г. советский академик Г.А. Тихов написал книгу «Астробиология», где он описал исследование поверхности Марса при помощи телескопа, и выдвинул гипотезу о возможной его обитаемости, предположив, что цвет Марса частично зависит от цвета растительности, отражающей солнечные лучи (Тихов, 1953). О. Струве также использовал этот термин в 1955 г. для обозначения поисков внеземной жизни. В 1974 г. немецкий астроном Й. Херрман опубликовал книгу «Астробиология. Космос», в которой излагались популярные идеи о внеземной жизни.

С 60-х гг. XX в. начались первые микропалеонтологические исследования метеоритов как непосредственных источников внеземного материала. В 1961 г. была опубликована работа Б. Надя, Д. Хеннесси и У. Маншайна, в которой было заявлено об обнаружении в углистых хондритах Оргей (Orgueil) и Ивуна (Ivuna) углеводородных соединений биогенного происхождения (Nagy et al., 1961). В другой работе Дж. Клаус и Надь публикуют информацию об обнаружении в метеорите Оргей относительно большого количества так называемых «организованных элементов» – микроскопических частиц, напоминающих фоссилизированные водоросли (Claus, Nagy, 1961). Результаты их работ подверглись нападкам со стороны некоторых ученых (Fitch et al., 1962; Anders, Fitch, 1962), утверждавших, что «организованными элементами» могут быть минералы, артефакты покрытия, пыльца амброзии, либо другие контаминанты (земное засорение). Такая реакция захлестнула не только США, но и Россию, где особенно негативная критика исходила от оппонентов, как правило, не имеющих отношения ни к микробиологии, ни к микропалеонтологии. Тем не менее, интерес к астробиологии стремительно рос. В 1962 г. в метеорите Оргей Ф. Стэплин обнаружил микрофоссилии, дал им краткое описание и разделил на несколько типов (Staplin, 1962). П. Палик (Palik, 1962) обнаружила в Оргее нитчатые структуры, морфологически сходные с цианобактериями, и сделала вывод об их вероятной индигенности (т.е. они были в составе исследуемого материала изначально). В 1963 г. Б.В. Тимофеев опубликовал работу по находкам органостенных микрофоссилий в метеорите Мигеи (Mighei), что было первой работой, в которой были описаны эукариотические формы в метеоритном материале (Timofejew, 1963). В 1967 г. Тан и Ван Лэндингем обнаружили в метеорите Оргей структуры, позднее интерпретированные как остатки магнитотактических бактерий, что теоретически может указывать на наличие атмосферы на родительском теле метеорита (Tan, Van Landingham, 1967). М. Россиньол-Стрик и Э. Баргхурн выделили из метеорита Оргей разнообразные по морфологии структуры (полые сферы, мембраны и т.д.) и высказали предположение об их индигенности (Rossignol-Strick, Barghoorn, 1971).

В середине 1990-х гг. начался новый этап микропалеонтологических исследований метеоритов, характеризующийся активным внедрением сканирующей электронной микроскопии. В 1996 г. Дэвид С. Маккей с коллегами сообщили о наличии реликтов биогенной активности (полициклические ароматические углеводороды и, вероятно, биогенный магнетит и нанофоссилии) в марсианском метеорите Алан Хиллс 84001 (ALH84001) (McKay et al., 1996). Параллельно с этим Ричард Б. Хувер, С.И. Жмур, В.М. Горленко и акад. А.Ю. Розанов сообщили об обнаружении микрофоссилий в углистом хондрите Мурчисон (Murchison) (Hoover, 1997; Жмур и др., 1997).

К концу 1990-х гг. было установлено, что некоторые земные микроорганизмы (экстремофилы) обитают при экстремальных внешних условиях (температура, давление, pH среды). Так что существование внеземных микроорганизмов в крайне враждебной среде стало казаться вполне правдоподобным.

В 1995 г. М. Майором и Д. Келозом была открыта первая экзопланета у звезды класса 51 Пегаса. С тех пор число обнаруженных экзопланет только возрастало, и многие из них имеют условия, приближенные к земным.

В 1996 г. с помощью зонда «Галилео» (NASA) были получены фотографии покрытого льдом спутника Юпитера – Европы. На изображениях поверхности были видны относительно недавние тектонические процессы, что может означать наличие океана под ледяной коркой.

Возвращаясь к вопросу становления астробиологии как дисциплины, в 1998 г. в США (Исследовательский центр Эймса, НАСА) была создана программа по астробиологии, пришедшая на смену существовавшей ранее подобной программе под названием «Экзобиология». В 1999 г. был учрежден Научный совет по астробиологии при Российской академии наук. О дальнейшем росте интереса к новой дисциплине свидетельствуют организация и проведение в разных странах многочисленных симпозиумов, совещаний и школ, публикация значительного количества тезисов конференций, книг и статей по вопросам астробиологии и учреждение специальной секции «Инструменты, методы и задачи астробиологии» Общества оптики и фотоники SPIE.

В настоящее время в Европе функционируют Европейская астробиологическая ассоциация – EANA (2001) и Европейский астробиологический институт – EAI (2019), спонсируемые Европейским космическим агентством – ESA и различными университетами. Существует также Национальное астробиологическое общество.

В США НАСА спонсирует и Астробиологический институт НАСА – NAI (1998), и различные университетские группы. Также дополнительную роль играет Астробиологическое общество Америки – ASA.

В России проводятся астробиологические исследования, семинары и конференции на базе нескольких институтов: Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна), Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБПП РАН, г. Пущино), Института космических исследований РАН (ИКИ РАН, Москва), Института микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН (ИНМИ РАН, Москва), Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН (ПИН РАН, Москва), Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН, Москва), Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ИК СО РАН, Новосибирск).

Отдельно стоит отметить, что значительная часть астробиологических исследований и построений основывается на моделировании. Это вполне объяснимо техническими сложностями в получении данных по внеземным объектам, вынуждающим опираться, прежде всего, на различные гипотетические предпосылки. Однако стоит помнить, что Земля также является равноправным объектом космоса, объем наших знаний о котором несоизмеримо превосходит все остальные. Как следствие, палеонтологические и геологические данные по земному материалу позволяют опираться в том числе и на фактологию при построении моделей.

1.2. Развитие взглядов на вопрос происхождения жизни

Вопрос терминологии

В астробиологии как науке, изучающей возникновение, эволюцию и механизмы распространения жизни во Вселенной, неизбежно возникает центральный вопрос определения термина «жизнь». Несмотря на то, что самые ранние попытки дать определение датируются, как минимум, 1855 г., к сегодняшнему дню так и не сложилось консенсуса по этой проблеме. Формулируемые определения, как правило, проходят через призму профессионального образования ученого и способ мышления, варьируются атрибуты, приписываемые живым организмам. Зачастую неясна даже грань между живым и неживым (к примеру – проблема вирусов), затруднено соотнесение момента возникновения жизни с каким-то конкретным этапом эволюции Вселенной. Из этого следует своего рода субъективизм интерпретации – неприятие идеи возможности существования жизни за пределами Земли, существования других форм жизни (Kolb, 2019).

Наиболее широкие трактовки могут включать в себя также гипотетические формы жизни на альтернативных земной основах: жизнь на кремниевой основе, на электромагнитных и гравитационных взаимодействиях, альтернативной хиральности, на основе аммиака, других нуклеиновых кислотах и т.д. (Catling, 2013; Schoning et al., 2000; Egholm et al., 1992; Koppitz et al., 1998; Kozlov et al., 2000; Diederichsen, 1996). Но в контексте данной монографии под словом «жизнь» будет рассматриваться именно абстрактный феномен, неотъемлемое свойство материи, по свойствам идентичное земной.

История развития взглядов

Исследуя возникновение и развитие взглядов на вопрос происхождения жизни, можно выделить креационизм и теорию спонтанного самозарождения. Креационизм основывается на комплексе космогонических мифов и неразрывно связан с религиозным воззрением. Событие перехода от неживого к живому связывается с воздействием некой сверхъестественной природы и, как правило, происходит лишь единожды. Креационизм представлял собой доминирующее воззрение в научной среде вплоть до XIX в., после чего, по мере развития представлений об окружающем мире, в значительной мере потерял свои позиции. Теория спонтанного самозарождения предполагала возможность постоянного процесса самопроизвольного возникновения уже готовых живых организмов (как минимум низших) из неживой материи. Впервые она была сформулирована Аристотелем (384–322 до н. э.) в IV в. до н.э., хотя первые идеи озвучивались

древнегреческими философами еще в VI в. до н.э. (Фалес, Демокрит и др.). Данная теория начала подвергаться серьезной критике начиная с XVII в. и была отвергнута в середине XIX в. благодаря опытам Л. Пастера (1822–1895 гг.). В XX в. появилась первая теория, пытающаяся объяснить механизм возникновения жизни, основываясь на известных в то время фундаментальных знаниях об окружающем мире и представлениях о физико-химических условиях на ранней Земле, в рамках которой жизнь была результатом предшествовавшей эволюции абиогенного вещества (Опарин, 1924). Затем, в 1953 г., были проведены эксперименты Миллера–Юри по моделированию механизмов образования первых биотических соединений на ранней Земле. Альтернативная точка зрения была представлена гипотезой панспермии, обоснованной и развитой Аррениусом (Arrhenius, Borns, 1909) (хотя некоторые подобные идеи высказывались еще Анаксагором в V в. до н.э.), в рамках которой жизнь зародилась за пределами Земли и впоследствии была привнесена. Стоит отметить, что данная гипотеза не решает проблемы собственно происхождения жизни, но расширяет спектр возможных условий, в которых она могла возникнуть, и предполагает возможность ее распространения в космическом пространстве. Отдельного упоминания заслуживает вклад акад. В.И. Вернадского, сформулировавшего концепцию биосферы, показавшего, что на Земле не существует ни одного примера осадочных пород, формирующихся в абиогенных условиях, и внесшего значительный вклад в развитие гипотезы панспермии. Согласно его взглядам, «Сложная жизненная среда сразу создавалась на нашей планете как нечто целое в догеологический ее период. Необходимо допустить одновременное создание ряда организмов различной геохимической функции, тесно связанных между собой. Создался целый монолит жизни (жизненная среда), а не отдельный вид живых организмов. Создание жизненной среды не может осуществить пришедшая из других планет колония одноклеточных организмов всегда одной геохимической функции. Правильнее поставить явление жизни наряду с энергией, материей (атомами), электричеством как искони существующие части космоса, более или менее не сводимые всецело к какому-нибудь одному из этих представлений. Жизнь стоит признать столь же безначальной, с научной точки зрения, каким является, например, электричество. Монолит жизни может в таком случае создаваться на Земле, при наличии жизни в окружающем ее космосе (Вернадский, 1989)».

Параллельно с этим развивалась дискуссия об уникальности жизни на Земле и возможности существования жизни за ее пределами. На протяжении большей части исторического времени господствовала мысль о множественности обитаемых миров (греческие и более поздние европейские философы, религиозные воззрения буддизма, иудаизма, ислама, раннего христианства и пр.). Основными оппонентами выступали католическая церковь и естественно-научная мысль XX в. (Рагульская, 2017).

Теория биохимической эволюции

Теория биохимической эволюции (абиогенеза) предполагает, что жизнь зародилась на поверхности Земли в геологически недокументированные первые 600–800 млн лет ее существования (при общем возрасте ~4,54 млрд лет). Как правило, гипотезы в рамках этой концепции исходят из предпосылок существования на ранней Земле восстановительной атмосферы и/или тепло-го океана или изолированных водных резервуаров. Многие ныне разрабатываемые концепции все еще основываются на подобных предпосылках, хотя они и опровергаются последними палеонтологическими и геологическими исследованиями.

Предполагается, что этот процесс проходит следующие стадии: 1) синтез простых органических молекул; 2) образование сложных органических соединений; 3) формирование предбиологических систем; 4) появление первых живых организмов.

Впервые гипотеза была предложена академиком А.И. Опариним в 1924 г. (позднее, независимо от него, Дж. Холдейном). Теория базировалась на представлении, что все начиналось с белков, и на возможности в определенных условиях спонтанного химического синтеза мономеров белков – аминокислот и белковоподобных полимеров (полипептидов) абиогенным путем, с их последующим объединением в коацерваты. Теория Опарина–Холдейна основана на идее, что на Земле того времени была восстановительная (бескислородная) атмосфера, а сама она была покрыта теплым океаном. В 1953 г. С. Миллером был проведен эксперимент, демонстрировавший возможность абиогенного синтеза аминокислот в предполагаемых условиях ранней Земли (Опарин, 1924; Miller, 1953).

Основным постулатом теории Опарина было то, что спонтанно возникшие в первичном «бульоне» белковоподобные соединения объединялись в коацерваты (макромолекулярные комплексы, обособленные от окружающего раствора оболочками из гидрофобных веществ и снабженные катализаторами, обеспечивающими способность к обмену веществ). Эти коллоидные системы (золи) плавали в более разбавленном водном растворе, где ассимилировали посредством диффузии другие аминокислоты и коацерваты, затем, вследствие их роста, равновесие нарушалось и происходило деление.

В теории обнаруживается ряд нерешенных фундаментальных проблем: отсутствие объяснения механизма наследования и воспроизведения белковых структур, отсутствие объяснения механизма возникновения гомохиральности и несогласованность предполагаемых геохимических условий на Земле с геологическими свидетельствами, а именно представление Опарина о первобытном океане, покрывавшем значительные части земной поверхности (Опарин, 1924).

Теория панспермии

Теория панспермии предполагает возможность переноса жизни в космическом пространстве с одного тела на другое. В основе гипотезы лежит представление о том, что земная жизнь зародилась за ее пределами и затем была принесена на Землю из космоса. В рамках данной теории не выработано однозначного взгляда на конкретный механизм и условия зарождения жизни.

В основе данной гипотезы лежат сообщения об обнаружении в космическом пространстве значительного количества органических соединений, в том числе высокомолекулярных, а также свидетельства протекания процессов химической эволюции органических веществ в молекулярных облаках, протопланетных дисках, зернах космической пыли и углистых хондритах под воздействием внешнего высокоэнергетического излучения.

Первые шаги в формировании теории панспермии были предприняты Либнихом, Рихтером и др. в XIX в. В начале XX в. представления об «опылении» планет космоса были развиты С. Аррениусом (1859–1927). Он считал, что споры бактерий могут уноситься с поверхности обитаемой планеты под действием электростатических сил, а затем выталкиваться за пределы планетной системы силой светового давления. Блуждая в космическом пространстве, споры могут осесть на поверхность более массивных пылинок. Это дает им возможность при прохождении вблизи какой-то звезды преодолеть ее световое давление и проникнуть во внутренние области планетной системы, где пылинки со спорами может быть захвачена одной из планет.

Теория панспермии была подвергнута жесткой критике в связи с неблагоприятными («губительными») факторами космического пространства: ультрафиолетовое излучение, жесткая (рентгеновская) радиация и космические лучи. Однако дальнейшие исследования показали, что эти опасения сильно преувеличены. В последней четверти XX в. теория панспермии разрабатывалась Хойлом и Викрамасингом. Согласно их концепции, микроорганизмы, выталкиваемые из некоего источника жизни (планеты или кометы), в большинстве своем погибают, образуя существенную долю межзвездной пыли. Но небольшая их часть (подобно зернам, разносимым ветром) выживает и, попадая на благоприятную почву другой планеты, дает начало жизни на ней. Чтобы панспермия работала, доля этой жизнеспособной фракции может составлять $1/10^{24}$ (Wickramasinghe et al., 2009).

В последнее время, наряду с анализом классического варианта теории, предложенного Аррениусом, была выдвинута идея о направленной панспермии, согласно которой жизнь занесена на Землю из космоса, но не случайно, а в результате сознательной деятельности высокоразвитых внеземных цивилизаций. Наиболее полно эта идея была описана Ф. Криком и Л. Оргелом в 1973 г. (Крик, Оргел, 1974), хотя и раньше подобные мысли высказывались другими учеными, например, Дж. Холдейном и К.Э. Циолковским. В отличие от своих предшественников, которые исходили из общих умозрительных

соображений, Крик и Оргел пытались обосновать гипотезу направленной панспермии с биологических позиций. Одним из важнейших аргументов в ее пользу они полагали универсальность генетического кода.

Теория панспермии, в ее первоначальной форме, опиралась на представления о вечности жизни. Во времена Гельмгольца, Томсона и Аррениуса эти представления казались вполне естественными, ибо Вселенная в целом считалась вечной и неизменной. Отдельные миры в ней возникали и разрушались, но сама Вселенная вечно оставалась такой, как она есть, и в ней вечно (в тех или иных мирах) могла существовать жизнь. Однако, исходя из современных представлений об эволюции горячей Вселенной и ее возникновении из сингулярного состояния, жизнь (по крайней мере, в ее молекулярной форме) не могла существовать в ранней Вселенной, когда не было ни атомов, ни молекул. Следовательно, если даже теория панспермии может объяснить происхождение жизни на той или иной планете (например, на Земле), она оставляет открытым вопрос о том, как же первоначально возникла жизнь во Вселенной – в каких-то первомирах, откуда она начала потом свое распространение. Однако весьма сомнительно, что происхождение жизни, где бы то ни было, можно рассматривать как случайный процесс.

1.3. Мир РНК

Среди известных форм жизни (за исключением РНК-вирусов) функция передачи генетической информации осуществляется при помощи ДНК. Слабость этого представления в том, что для раскрытия всех функций ДНК необходимо ее взаимодействие с РНК и белками, т.е. ДНК в этом смысле – не самодостаточна. Начиная с середины XX в. Ф. Криком, А.С. Спириным, С. Вайссом, Дж. Хурвицем и др., независимо друг от друга, были открыты различные специализированные типы РНК, в том числе способные осуществлять большинство функций ДНК и белков. Постепенно стало складываться представление о том, что в современных организмах те функции, которые осуществляются другими, более эффективными специализированными полимерами (белками и ДНК), на более ранних стадиях эволюции могли осуществляться непосредственно РНК (рис. 1) (Спирин, 2007, 2009; Четверин, 2021).

Тем не менее, в рамках теории «мира РНК» имеется ряд нерешенных проблем, одной из которых является вопрос компартиментализации ансамблей РНК от внешней среды. Изначально рассматривалась компартиментализация в виде коацерватных капель, в рамках Опаринской концепции происхождения жизни, но в рамках этой модели потребовались бы также полипептиды, полисахариды и другие способные к коацервации полимеры, а также вода. Альтернативная модель была предложена А.Б. Четвериним, экспериментально показавшим способность молекул РНК к формированию молекулярных нанокolonий на гелях (и, гипотетически, глинистых минералах для обособле-

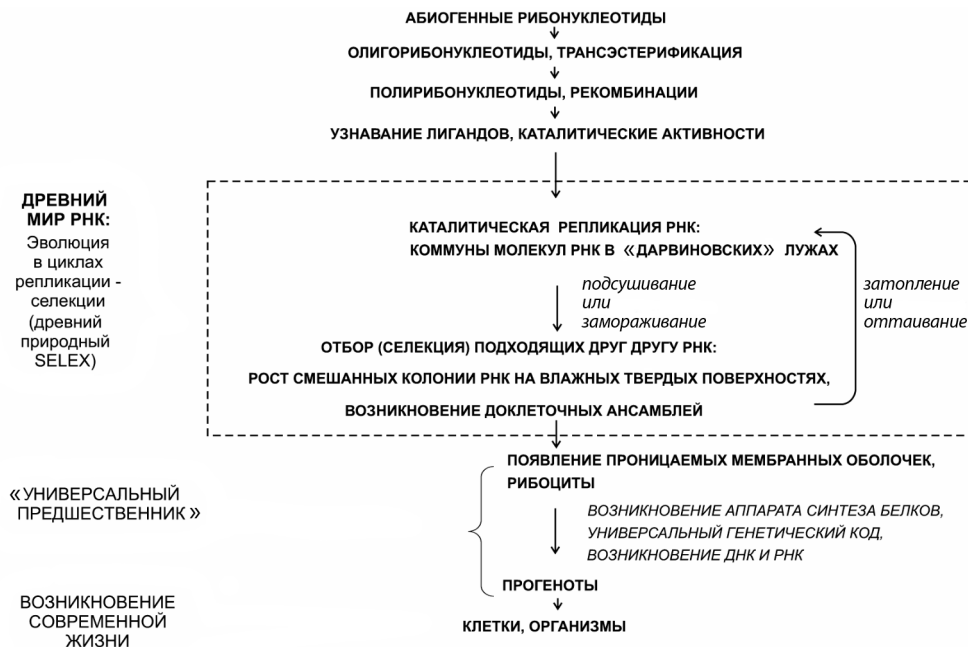


Рис. 1. Сценарий эволюции и возникновения мира РНК по Спирину (с изм.) (Спирин, 2005).

ния). Представляется, что использование иммобилизованной среды является ключевым моментом, так как матрикс геля предотвращает конвекцию среды и препятствует диффузии наномолекул. В результате потомство каждой исходной наномолекулы не распространяется по всему реакционному объему, а концентрируется в ограниченной зоне вокруг родительской молекулы, то есть образует колонию. С другой стороны, матриксная сеть не влияет на диффузию более мелких молекул – субстратов реакции и компонентов буфера. Известно, что на Земле подобными свойствами обладают различные минералы, наиболее вероятным из которых представляется монтмориллонит. Также существование «мира РНК» предполагает наличие жидкой воды и температуры окружающей среды около 30 °С. Монтмориллонит при набухании увеличивается в несколько раз, что объясняет большую сорбционную емкость. При этом расстояние между слоями становится сопоставимым с размерами наномолекул. Меж этих слоев самореплицирующиеся колонии РНК могли проходить эволюционное развитие, оставаясь при этом обособленными, затем подсохшие частицы глины могли раздуться ветром, тем самым распространяя колонии на существенные расстояния. Способность нанокolonий РНК к эволюции была показана в экспериментах (Спирин, 2003; Ellington, Szostak, 1990; Tuerk, Gold, 1990). Представляется вполне вероятным, что со временем у новых молекул РНК могло возникнуть свойство реплика-

ции белков, что привело в дальнейшем к постепенному зарождению первых клеток.

Также акад. А.С. Спириным (Спирин, 2007) были сформулированы парадоксы «мира РНК»:

«“Водный парадокс” заключается в химической нестабильности ковалентной структуры РНК в водной среде, при необходимости оной среды для формирования активных конформаций РНК». В качестве возможных решений рассматриваются варианты стабилизации ансамблей РНК на поверхности пористых глинистых минералов (таких как, например, монтмориллонит) или же существование «мира РНК» в растворителе, отличном от воды (один из возможных вариантов – в формамиде). Однако, решая одни проблемы, подобные подходы порождают ряд других, поэтому представляется более вероятным, что условия, в которых возник и развивался «мир РНК», были комбинированными (цикличность высушивания–увлажнения и/или замораживания–оттаивания; совокупность нескольких растворителей или их цикличное замещение).

«“Конформационный парадокс” заключается в несовместимости стабильной двуспиральной структуры РНК, требуемой для ее репликации, и стабильных компактных конформаций одноцепочечных РНК, необходимых для каталитической функции». Как известно, для расплетения двойной спирали РНК необходимы либо рибозимы с функцией РНК-хеликаз (что подразумевает существование белковых структур), но тогда бы расплетались также и локальные двуспиральные участки одноцепочечной РНК; либо высокотемпературный нагрев (до 90 °С), при котором, однако, происходит деструкция одноцепочечных РНК. В качестве возможного решения данного парадокса приходится допускать существенные циклические колебания температуры, при которых происходила бы фиксация одноцепочечных РНК на адсорбирующих поверхностях глин, или же воздействие температуры на них снижалось бы неким веществом, присутствующим в растворе, например, мочевиной.

Также нет общепринятого взгляда, возник ли синтез белков в ходе эволюции «мира РНК», или же это произошло на гипотетической стадии некоего предшественника «мира РНК». Гипотеза о предшественнике «мира РНК» высказывается различными исследователями с 1980-х гг., ее несомненным достоинством является то, что некоторые кандидаты на роль предшественника могут синтезироваться в более экстремальных условиях, нежели молекулы РНК, или же их синтез может осуществляться более простым путем. На роль возможных кандидатов рассматривается очень широкий выбор структур, способных к саморепликации, таких как: ТНК (треоза замещает рибозу), ПНК (пептидные) и другие, вплоть до «самовоспроизводящихся минералов». У всех этих вероятных кандидатов, тем не менее, есть свои недостатки, и если в случае с РНК сохранились вышеупомянутые реликтовые функции, то на возможность существования мира-предшественника не указывают даже косвенные свидетельства (Schoning et al., 2000; Egholm et al., 1992; Спирин, 2007).

1.4. Абиогенный синтез пребиотических соединений

Согласно современным представлениям, Вселенная возникла ~13,76 млрд лет назад из космологической сингулярности, в результате Большого взрыва (БВ). В первые три минуты, помимо других событий, происходит возникновение фундаментальных частиц и первичный нуклеосинтез (H (~75%), ^4He (~25%), D, ^3He , Li) (Засов, Постнов, 2006).

Предполагается, что спустя ~100–200 млн лет после БВ, по мере понижения средней температуры Вселенной, в ней происходит формирование первых звезд (гипотетическое население III/поколение I). Они характеризуются низкой металличностью (относительной концентрацией элементов тяжелее H и He), диапазоном масс до $10^5 M_{\odot}$ (оценки характеристичной массы разнятся, предлагаются 1–10 M_{\odot} , 20 M_{\odot} , 10–1000 M_{\odot} , 600 M_{\odot} и др.). Полагается, что они обладали непродолжительным сроком жизни (~2–5 млн лет для наиболее массивных), после чего, в зависимости от массы, стали белыми карликами, сверхновыми, нейтронными звездами и черными дырами. В результате нуклеосинтеза и вспышек сверхновых первых звезд, началось обогащение элементного состава Вселенной (C, N, O, Ne, Mg, Si, Fe и др.), вследствие чего, уже спустя ~200–300 млн лет после БВ стало возможным формирование звезд населения II (поколение II) (звезды, обедненные элементами, тяжелее He – ~ 10^{-10} по массе), и, впоследствии, звезд населения I (поколение III) (химический состав близок к Солнечному, ~2% элементов тяжелее He) (Засов, Постнов, 2006; Latif et al., 2022; Klessen, Glover, 2023; Ohkubo et al., 2009; Snytnikov, 2008).

По данным наблюдений, первые галактики начинают формироваться уже спустя 400–450 млн лет после БВ. Вероятность существования планетарной системы коррелирует с ростом металличности звезды, поэтому можно предположить, что большинство ранних звезд планетарной системой не обладали. Однако наблюдения показывают, что первые планетарные системы (газовые гиганты, по составу схожие со звездами) появляются уже спустя ~2,5 (Kepler-444) млрд лет после БВ (гипотетически уже спустя ~1 млрд лет после БВ (PSR B1620-26)). Остатки же наиболее древней планетарной системы, включающей планеты земного типа, обнаружены возле звезды возрастом 10.7 млрд лет.

Столь раннее существование планетарных систем указывает на возможность их формирования в низкометалличной Вселенной, а также предполагает протекание процессов синтеза молекулярных соединений как в протопланетных дисках, так и на самих планетах и малых телах, и не исключает возможности последующего переноса этих соединений (Curtis-Lake et al., 2023; Robertson et al., 2023; Zhang et al., 2022; Sigurdson et al., 2003; Elms et al., 2022).

Предполагается, что синтез сложных молекул может протекать в следующих местах: планеты и их спутники, ядра комет, ледяные астероиды, протозвездные, околозвездные и протопланетные диски, газовая и пылевая

компоненты молекулярных облаков, межзвездная космическая пыль, околозвездные оболочки и атмосферы холодных звезд (Бочкарев, 2009).

Механизмами переноса и экранизации молекул от ионизирующего излучения (ИИ) являются пылинки молекулярных облаков, межзвездная пыль, метеороиды, астероиды, ядра комет, планеты (Бочкарев, 2009).

По состоянию на 2024 г. в космическом пространстве обнаружено более 300 различных молекул (таблицы 1, 2), включающих в себя как простые, так и сложные соединения. Оптические спектры первых молекул (CH, CN, CH⁺) были обнаружены еще в 30-х гг. XX в., начиная с 50-х гг. поиск идет в радиодиапазоне, и за счет ввода все большего числа более современных телескопов число обнаружений непрерывно растет.

Сложность идентификации спектров возрастает с ростом числа атомов, составляющих молекулу, вследствие этого сообщения об обнаружении спектров аминокислот (глицин, триптофан) в межзвездной среде впоследствии опровергались (глицин), поэтому вопрос их формирования в ней остается открытым (хотя все же стоит полагать, что он носит чисто технический характер способности различения спектров) (Iglesias-Goth, 2023).

Исследования абиогенного синтеза in vitro

Хотя первые исследования в области абиогенного синтеза связаны с именами А. Герреры (1904 г.), Дж. Берка (1903 г.) и С. Ледюка (1901 г.) (Peretó, Català, 2007; Peretó, 2016), пионерами можно считать А.И. Опарина (Опарин, 1924) и Дж. Холдейна (Haldane, 1929), чьи работы были продолжены С. Миллером (Miller, 1953) и Х. Юри (Miller, Urey, 1959).

Ниже приведен краткий обзор некоторых исследований по вопросам синтеза пребиотических соединений *in vitro* (эксперименты, проводимые вне живого организма). В них могут моделироваться предполагаемые условия как на ранней Земле, так и в космическом пространстве.

Полагается, что из молекул, обнаруженных в межзвездной среде и околозвездных дисках, прекурсорами абиогенного синтеза могут быть: синильная кислота (HCN), аммиак (NH₃), формальдегид (H₂CO), муравьиная кислота (HCOOH), хлорметан (CH₃Cl), метанол (CH₃OH), формамид (NH₂CHO), гликольальдегид (CH₂OHCHO), аминоацетонитрил (H₂NCH₂CN), мочевины (H₂NC(O)NH₂). Из них синильная кислота, формальдегид, аммиак, муравьиная кислота обнаружены также в межгалактической среде.

Синтез рибозы

Многие ученые воспроизводили реакцию Бутлерова (синтез сахаров из формальдегида), добавляя новые примеси (например, гидроксид кальция), различные катализаторы (минералы или ионы Pb⁺⁺ и Tl⁺) для детального изучения всех возможных путей синтеза. В основном интерес направлен на формирование чистой рибозы. Первым продуктом полимеризации

Таблица 1. Молекулы, обнаруженные в межзвездной среде и околозвездных дисках (по состоянию на 09.2023)

(URL: <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>)

2 атома			3 атома		
H ₂	NaCl	AlO	C ₃	N ₂ H ⁺	H ₂ Cl ⁺
AlF	OH	OH ⁺	C ₂ H	N ₂ O	KCN
AlCl	PN	CN ⁻	C ₂ O	NaCN	FeCN
C ₂	SO	SH ⁺	C ₂ S	OCS	HO ₂
CH	SO ⁺	SH	CH ₂	SO ₂	TiO ₂
CH ⁺	SiN	HCl ⁺	HCN	c-SiC ₂	C ₂ N
CN	SiO	TiO	HCO	CO ₂	Si ₂ C
CO	SiS	ArH ⁺	HCO ⁺	NH ₂	HS ₂
CO ⁺	CS	N ₂	HCS ⁺	H ₃ ⁺	HCS
CP	HF	NO ⁺	HOC ⁺	SiCN	HSC
SiC	HD	NS ⁺	H ₂ O	AlNC	NCO
HCl	FeO	HeH ⁺	H ₂ S	SiNC	CaNC
KCl	O ₂	PO ⁺	HNC	HCP	NCS
NH	CF ⁺	SiP	HNO	CCP	MgC ₂
NO	SiH	FeC	MgCN	AlOH	HSO
NS	PO		MgNC	H ₂ O ⁺	

4 атома			5 атомов		
c-C ₃ H	H ₂ CO	C ₃ H ⁺	C ₅	H ₂ NCN	MgC ₃ N
l-C ₃ H	H ₂ CN	HMgNC	C ₄ H	HNC ₃	NH ₂ OH
C ₃ N	H ₂ CS	HCCO	C ₄ Si	SiH ₄	HC ₃ O ⁺
C ₃ O	H ₃ O ⁺	CNCN	l-C ₃ H ₂	H ₂ COH ⁺	HC ₃ S ⁺
C ₃ S	c-SiC ₃	HONO	c-C ₃ H ₂	C ₄ H ⁻	H ₂ C ₂ S
C ₂ H ₂	CH ₃	MgC ₂ H	H ₂ CCN	HC(O)CN	C ₄ S
NH ₃	C ₃ N ⁻	HCCS	CH ₄	HNCNH	HC(O)SH
HCCN	PH ₃	HNCN	HC ₃ N	CH ₃ O	HC(S)CN
HCNH ⁺	HCNO	H ₂ NC	HCCNC	NH ₄ ⁺	HCCCO
HNCO	HOCN	HCCS ⁺	HCOOH	H ₂ NCO ⁺	NaCCCN
HNCS	HSCN	CH ₃ ⁺	H ₂ CNH	NCCNH ⁺	MgC ₃ N ⁺
HOCO ⁺	H ₂ O ₂		H ₂ C ₂ O	CH ₃ Cl	

6 атомов		7 атомов	
C ₅ H	C ₅ N	C ₆ H	HC ₅ O
1-H ₂ C ₄	1-HC ₄ H	CH ₂ CHCN	HOCH ₂ CN
C ₂ H ₄	1-HC ₄ N	CH ₃ C ₂ H	HCCCHNH
CH ₃ CN	c-H ₂ C ₃ O	HC ₅ N	HC ₄ NC
CH ₃ NC	H ₂ CCNH	CH ₃ CHO	c-C ₃ HCCH
CH ₃ OH	C ₅ N ⁻	CH ₃ NH ₂	1-H ₂ C ₅
CH ₃ SH	HNCHCN	c-C ₂ H ₄ O	MgC ₅ N
HC ₃ NH ⁺	SiH ₃ CN	H ₂ CCHOH	CH ₂ C ₃ N
HCCCHO	C ₅ S	C ₆ H ⁻	NC ₄ NH ⁺
NH ₂ CHO	MgC ₄ H	CH ₃ NCO	MgC ₅ N ⁺

8 атомов		9 атомов	
CH ₃ C ₃ N	CH ₂ CCHCN	CH ₃ C ₄ H	C ₃ H ₆
HC(O)OCH ₃	H ₂ NCH ₂ CN	CH ₃ CH ₂ CN	CH ₃ CH ₂ SH
CH ₃ COOH	CH ₃ CHNH	(CH ₃) ₂ O	CH ₃ NHCHO
C ₇ H	CH ₃ SiH ₃	CH ₃ CH ₂ OH	HC ₇ O
C ₆ H ₂	H ₂ NC(O)NH ₂	HC ₇ N	HCCCHCHCN
CH ₂ OHCHO	HCCCH ₂ CN	C ₈ H	H ₂ CCHC ₃ N
1-HC ₆ H	HC ₅ NH ⁺	CH ₃ C(O)NH ₂	H ₂ CCCHCCH
CH ₂ CHCHO			

10 атомов		11 атомов	
CH ₃ C ₃ N	C ₇ H ₅ NCO	HC ₉ N	
(CH ₃) ₂ CO	C ₇ H ₅ NH ₂	CH ₃ C ₆ H	
(CH ₂ OH) ₂	HC ₇ NH ⁺	C ₂ H ₅ OCHO	
CH ₃ CH ₂ CHO	CH ₃ CHCHCN	CH ₂ OC(O)CH ₃	
CH ₃ CHCH ₂ O	CH ₃ C(CN)CH ₂	CH ₃ C(O)CH ₂ OH	
CH ₃ OCH ₂ OH		c-C ₅ H ₆	
c-C ₆ H ₄		HOCH ₂ CH ₂ NH ₂	
H ₂ CCCHC ₃ N		H ₂ CCCHC ₄ H	
CH ₂ CHCH ₂ CN		C ₁₀ H ⁻	
HOCH ₂ C(O)NH ₂		H ₂ C(CH) ₃ CN	

12 атомов		12+ атомов	
c-C ₆ H ₆	n-C ₃ H ₇ OH	C ₆₀	c-C ₉ H ₈
n-C ₃ H ₇ CN	i-C ₃ H ₇ OH	C ₇₀	1-c-C ₅ H ₅ CCH
i-C ₃ H ₇ CN		C ₆₀ ⁺	2-c-C ₅ H ₅ CCH
C ₂ H ₅ OCH ₃		c-C ₆ H ₅ CN	c-C ₅ H ₄ CCH ₂
1-c-C ₅ H ₅ CN		HC ₁₁ N	2-C ₉ H ₇ CN
2-c-C ₅ H ₅ CN		1-C ₁₀ H ₇ CN	C ₆ CH ₅ CCH
CH ₃ C ₇ N		2-C ₁₀ H ₇ CN	CH ₃ OCH ₂ CH ₂ CH ₂ OH

Таблица 2. Молекулы, обнаруженные в межгалактической среде (по состоянию на 04.2022)
(URL: <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>)

2 атома		3 атома	4 атома	5 атомов
OH	ArH ⁺	H ₂ O	H ₂ CO	c-C ₃ H ₂
CO	CF ⁺	HCN	NH ₃	HC ₃ N
H ₂	SH ⁺	HCO ⁺	HNCO	CH ₂ NH
CH	O ₂	C ₂ H	C ₂ H ₂	NH ₂ CN
CS	PN	HNC	H ₂ CS	l-C ₃ H ₂
CH ⁺		N ₂ H ⁺	HOCO ⁺	H ₂ CCN
CN		OCS	c-C ₃ H	H ₂ CCO
SO		HCO	H ₃ O ⁺	C ₄ H
SiO		H ₂ S	l-C ³ H	HCOOH
CO ⁺		SO ₂	C ₃ N	
NO		HOС ⁺	l-C ₃ H ⁺	
NS		C ₂ S	H ₂ CN	
NH		H ₂ O ⁺	H ₂ NC	
OH ⁺		HCS ⁺		
HF		H ₂ Cl ⁺		
SO ⁺		NH ₂		

6 атомов	7 атомов	8 атомов	8+ атомов
CH ₃ OH	CH ₃ CCH	HC ₆ H	c-C ₆ H ₆
CH ₃ CN	CH ₃ NH ₂	HC(O)OCH ₃	C ₆₀
HC ₄ H	CH ₃ CHO		(CH ₃) ₂ O
HC(O)NH ₂	C ₂ H ₃ CN		
CH ₃ SH			

выступает гликольальдегид, который затем превращается в глицераль, и различные сахара: тетрозу, пентозу и гексозу. В ряде исследований при использовании ионов Pb⁺⁺ или бората кальция в реакции Бутлерова образуется группа пентоз, включая рибозу. Если гликольальдегид и глицераль заменить на их монофосфаты, то среди продуктов реакции возникают различные фосфаты рибозы, но именно той, что присутствует в нуклеотидах, оказывается недостаточное количество. Таким образом, синтез рибозы приводит к образованию сложной смеси сахаров, при этом рибоза, в большинстве случаев, является лишь второстепенным компонентом. Рибоза также может быть получена напрямую из формамида (см. ниже) (Orgel, 2004).

Синтез азотистых оснований

В ряде экспериментов был синтезирован аденин: кипячение цианида аммония, нагревание HCN с жидким аммиаком. В последнем случае про-

межуточными продуктами выступают формамидин, тетрамер HCN, образуя 4-амино-5-имидазол (AICN). Но в данной реакции для синтеза аденина требуется высокая концентрация аммиака, которая вряд ли могла быть доступна в условиях ранней Земли. Аденин может быть получен без использования аммиака: различными комбинациями реакции образования тетрамера HCN в эвтектическом растворе (раствор с низкими температурами кипения и заморзания), его фотоизомеризацией до AICN и взаимодействием AICN с HCN. Аденин также был получен нагреванием тетрамера HCN или AICN с формиатом аммония, либо нагреванием формамида. Аденин и немного гуанина были получены полимеризацией HCN. В водном растворе AICN и его продуктов показан синтез пуринов. Был предложен другой способ появления пуринов, связанный с метеоритами, т.к. в метеоритном веществе было обнаружено множество различных органических соединений, в том числе и нуклеиновые основания. Также в период поздней тяжелой бомбардировки происходил нагрев в результате столкновения внеземных тел с поверхностью Земли, который мог способствовать образованию пребиотических соединений. При попытке моделирования таких условий был проведен эксперимент по облучению формамида лазером. В результате были синтезированы аденин, гуанин, цитозин и урацил.

Пиримидины были получены в ряде экспериментов с использованием цианоацетилена, цианоацетальдегида, цианат-ионов, цианогена или мочевины (Orgel, 2004).

Синтез нуклеозидов

При нагревании D-рибозы с гипоксантином, или с хлоридом магния, или со смесью неорганических солей, присутствующих в морской воде, образуется β-D-инозин. Аденин при тех же условиях обеспечивает 3% выход β-D-аденозина. Известен непрямой синтез цитидина из рибозы, цианамида и цианоацетилена в водном растворе. О прямом синтезе пиримидиновых нуклеозидов до конца 2000-х гг. не сообщалось. До этих годов синтез пуриновых нуклеозидов непосредственно из рибозы и основания был неэффективным, в то время в единственном доступном пребиотическом синтезе пиримидиновых нуклеозидов использовался арабинозо-3-фосфат, молекула которого не рассматривается в качестве пребиотически значимой в условиях ранней Земли.

Осуществлен синтез нуклеозидов из смесей «D-рибоза/D-дезоксирибоза + азотистое основание с/без формамида с/без метеорита» при ее облучении протонами. Во всех случаях были получены как α-, так и β-изомеры D-рибозы и D-дезоксирибозы. Выход продуктов реакции был увеличен в случаях с добавлением и формамида, и метеоритного вещества. Синтез – прямой, т. е. без добавления каких-либо промежуточных реагентов и разбиения на этапы эксперимента. Исходная смесь облучалась в течение ~15 мин., в отличие от эксперимента Миллера–Юри, когда реакционная фаза длилась около недели (Orgel, 2004).

Фосфорилирование нуклеозидов

Наиболее вероятный источник фосфатов в пребиотическом синтезе – неорганические фосфаты и полифосфаты. В горных породах большое количество ортофосфатов. Основная часть экспериментов по фосфорилированию нуклеозидов, в основном, сводилась к нагреванию смеси из нуклеозидов, фосфатов (NaH_2PO_4 , $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) и катализаторов (мочевины или ионов металлов). Но это приводило к образованию сложной смеси изомерных моно- и полифосфатов. Полимеризация даже чистых нуклеозид-5-фосфатов приводила к получению продуктов со смешанными фосфодиэфирными связями. Было также предложено несколько вариантов абиогенного происхождения нуклеотидов: синтез при грозовых разрядах в бескислородной атмосфере, формирование в глубоководных гидротермальных источниках и занесение из космоса.

Осуществлен синтез нуклеотидов из сухих смесей нуклеозидов с неорганическим фосфатом (NaH_2PO_4) при облучении вакуумным УФ (145 нм), протонами (2–6 МэВ) и всем спектром излучений в условиях открытого космоса при полете спутника «БИОН» (327 ч) (Orgel, 2004).

Полимеризация и синтез нуклеотидов

Самопроизвольная полимеризация нуклеотидов в водном растворе невозможна. Для этого необходимы внешние активирующие агенты. При нагревании растворов нуклеотидов и последующем их выпаривании образуется сложная смесь очень коротких олигонуклеотидов. До середины 2000-х гг. использовали такие катализаторы, как ионы металлов, ион урцила и монтмориллонит, а саму полимеризацию проводили на нуклеозид-5-фосфоримидазолиде и его родственных фосфорамидатах, которые могут не являться пребиотическими значимыми молекулами.

Осуществлен синтез аденозиновых нуклеотидов из аденозина и NaH_2PO_4 при облучении протонами, имитирующих солнечный ветер в космосе или на ранней Земле. Выход продуктов значительно увеличен при добавлении в реакционную смесь формамида и метеорита NWA 2828. Проведена димеризация и тримеризация циклического цитозин монофосфата (3',5'-сСМФ) в сухих условиях при облучении протонами и УФ (Orgel, 2004).

Для углубленного изучения вопросов пребиотической химии рекомендуются к ознакомлению следующие работы: Вибе, 2017; Meierhenrich, 2008; Cavalazzi, Westall (eds), 2019; Neubeck, McMahon (eds), 2021 и др.

Синтез пребиотических соединений из формамида

В качестве одного из примеров синтеза пребиотических соединений *in vitro* рассматривается синтез пребиотических соединений из смеси формамида с различными метеоритами (Saladino et al., 2015). Метеоритное вещество выступало в роли катализатора. Данные смеси облучали протонами с энергией 170 МэВ. В результате были получены все 5 нуклеиновых оснований,

входящих в состав РНК/ДНК, аминокислоты, карбоновые кислоты, нуклеиновые сахара и, прежде всего, четыре нуклеозида: цитидин, уридин, аденозин и тимидин. В сравнении с протонами облучение аналогичной смеси «формамид–метеорит» атомами бора ^{11}B позволило синтезировать меньшее разнообразие молекул (нуклеозиды и аминокислоты не обнаружены), но суммарный выход некоторых продуктов был выше. Эти исследования представляют серию экспериментов, описанную на рис. 2.

Таким образом, осуществляются, в целом, успешные эксперименты по абиогенному синтезу различных пребиотических соединений при моделировании условий как ранней Земли, так и космического пространства. Пока не осуществлен прямой синтез РНК/ДНК или их фрагментов из самых простых соединений, но отдельные его стадии: переход от простых соединений к нуклеиновым основаниям и нуклеозидам, от нуклеозидов к нуклеотидам, фосфорилирование и полимеризация нуклеотидов и т. д. воспроизведены в лабораторных условиях. Уделяется внимание проблеме хиральности, так как при абиогенном синтезе возникают рацематические смеси, хотя осуществляются попытки направить реакции на формирование конкретных изомеров.

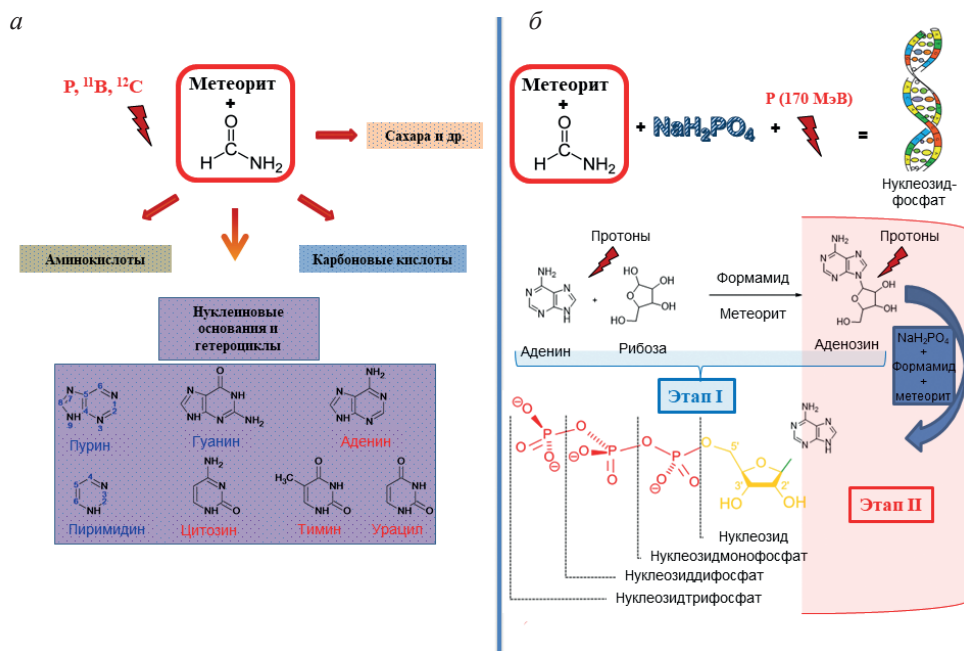


Рис. 2. Серия экспериментов по облучению смеси формамида с метеоритным веществом протонами 170 МэВ, ионами бора 33 МэВ/нуклон и углерода 500 МэВ/нуклон (*a*).

Облучение протонами 170 МэВ смесей: «нуклеиновое основание + рибоза» (продукты реакции – нуклеозиды) (Saladino et al., 2017), «нуклеозид + NaH_2PO_4 » (продукты реакции – нуклеозидмоно-/ди-/три-фосфаты и т.д. до 11 мер) (*б*). В аналогичные исходные смеси также добавляли формамид и/или метеоритное вещество, что увеличивало выход продуктов реакции.

1.5. Гипотеза астрокатализа

В качестве частного примера моделирования механизма зарождения мира РНК на стадии протопланетного диска можно рассмотреть гипотезу астрокатализа.

«Особые условия случая» в космосе для зарождения жизни вместе с гипотезой астрокатализа были предложены В.Н. Снытниковым. По этой гипотезе жизнь возникает в протопланетных дисках при формировании звезд (рис. 3). Протопланетные диски и есть та «особая космическая среда», о которой науке во времена Вернадского ничего не было известно. Ключевые шаги в зарождении жизни связываются с известными этапами формирования планет. В этом состоит отличие гипотезы астрокатализа от гипотезы Опарина, по которой жизнь зарождается в неизменных водных условиях на земной поверхности. Смена физических условий в околозвездном диске при формировании планет ведет к самоорганизации в нем неорганического и органического вещества. Шаги самоорганизации вещества определяют этапы зарождения жизни. Эти этапы имели место около Солнца. Они возможны и около других солнцеподобных звезд с их экзопланетами. Рассмотрим гипотезу астрокатализа более подробно.

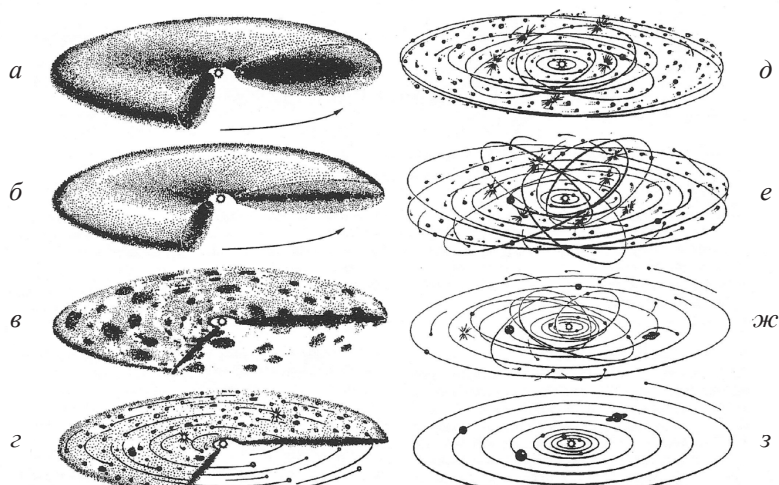


Рис. 3. Стандартная модель эволюции газопылевого диска ранней Солнечной системы (по О.Ю. Шмидту): *a–г* – опускание пыли к центральной плоскости и образование пылевого субдиска, его уплощение, возникновение в нем гравитационных неустойчивостей, последующий распад диска на пылевые сгущения и образование роя плотных тел астероидных размеров; (*д–з*) – объединение планетезималей в планеты, появление крупных тел, ударный нагрев, метаморфизм, плавление и испарение вещества, реконденсация, диссипация и аккреция газа на Юпитер и Сатурн, формирование пояса Койпера и облака Оорта, завершение процесса формирования планет и спутниковых систем (Левин, 1964; Витязев и др., 1990; Витязев, Печерникова, 2009; Снытников, 2006).

Исходя из основных физико-химических процессов в диске при формировании планет и их дальнейшей эволюции, можно выделить несколько основных этапов в появлении жизни около Солнца.

В молекулярном облаке при криогенных температурах на пылинках размера в несколько десятков нанометров синтезируются разнообразные органические соединения. Органические и многие простые соединения, среди которых H_2 , CO , H_2O , представляют собой исходное вещество для дальнейших синтезов. Среди молекул есть такие, которые в ряде синтезов обладают каталитическими и автокаталитическими свойствами. Низкие криогенные температуры сохраняются при начале гравитационного коллапса.

На следующем этапе формируется протозвезда и околозвездный диск на временных масштабах 100 тыс. лет от начала гравитационного коллапса. Термоядерная энергия в виде излучения протозвезды начинает поступать в диск. Порядка миллиона лет аккреционный диск и протозвезда эволюционируют вместе. Протозвезда набирает массу, а околозвездный диск ее теряет. К окончанию этого периода появляется молодая звезда – раннее Солнце. Газ диска, определяющий его массу на этом этапе, имеет спадающее к периферии диска распределение давления и температуры. Пыль оседает к срединной плоскости диска. В этом месте отношение массы пыли к массе газа повышается, и формируется пылевой субдиск. Пыль проходит столкновительные процессы укрупнения с появлением «булыжников», рыхлых пористых комков и первичных тел с размерами до 1–10 м. Дальнейший рост тел в многокилометровые планетезимали и зародыши планет происходит в результате коллективного объединения многих тел при развитии гравитационной неустойчивости с участием газа на быстрых, порядка десятков лет временах. Периодически в диске образуются огромные сгустки (клампы) из водорода и гелия вместе с агрегатами сконденсированного вещества. Сгустки могут иметь размеры в несколько солнечных диаметров. Часть из них попадает на протозвезду, а некоторые из них дают начало будущим кометам, планетам и другим телам околозвездной системы.

На этом этапе в протопланетном диске, в рамках гипотезы «астрокатализа», как показывают суперкомпьютерные модели, периодически возникают особые условия в виде сгустков (клампов) смеси водорода с гелием и агрегатов первичных тел. Частицы в телах связываются между собой посредством синтезированного органического вещества, включая полимеры. По химико-технологической терминологии, около звезды примерно миллион лет действует проточный химический реактор с вращающимся кипящим слоем катализатора – конденсированной фазы, которая формируется из нанометровых частиц пыли исходного молекулярного облака.

В конденсированной фазе сосредоточена вода, органические вещества и катализаторы – будущие оливины и другие компоненты, видимые по составу метеоритов – углистых хондритов. На этих телах происходят синтезы «мира РНК» с формированием молекулярных колоний. Столкновения тел

приводят к обмену продуктами синтезов между телами и к распространению наиболее устойчивых молекулярных колоний. Изменяющиеся физические условия в твердой фазе при выходе агрегатов за пределы клампа приводили к отбору наиболее устойчивых молекул, среди которых имеются и автокатализаторы. К ним следует отнести РНК как наиболее универсальные соединения, способные выполнять самые разные функции. Время, которое занимал этап «мира РНК», оценивается в несколько миллионов лет. Этот этап заканчивается потерей газа из диска, формированием зародышей планет и газовых гигантов.

Уход из диска водорода с гелием и падение в среде давления повели «мир РНК» к разрушению. Но эта же потеря диском газовой атмосферы и увеличение доли воды отобрала среди всех молекулярных колоний те, которые смогли сформировать защитную оболочку (т. е. находились в составе смоченных водой пористых глин, таких как монтмориллонит).

Итак, химические процессы с органическим веществом на первичных телах и планетезималях с интенсивным обменом веществом между телами в их столкновениях между собой сталкиваются с потерей водорода и гелия – основных газов восстановительной атмосферы в диске. Диск на этом этапе самоорганизации становится роем осколочных тел (дебрис-диск). Солнце выходит на главную последовательность. В зоне образования планет происходит разложение и потеря основного количества существовавшего тогда органического вещества (точных данных по конкретному составу которого нет). Остается только то вещество, которое было экранировано защитными оболочками. Отбор шел по разным условиям – температуре, давлению, устойчивости к ударам и прочим параметрам.

Главная особенность гипотезы астрокатализа (рис. 4) заключается в утверждении, что в катализе принимала участие подавляющая часть всего количества Fe, Mg, Si, O, C, N, S и других элементов, которая вместе с водородом и гелием идет на формирование Солнца и планет. Это определяет космический масштаб разнообразия, отбора и использования каталитических систем в синтезах предбиологических соединений. Для коллектива подобных тел в диске обеспечивается их смачивание и высыхание, наличие глиноподобного неорганического субстрата, обмен органическими соединениями, удаление ненужных реагентов, «отбор» в сторону более сложных соединений, то есть условия для существования «мира РНК». По представлениям автора гипотезы, примитивная жизнь возникает в органическом веществе в коллективе из множества небольших, часто сталкивающихся между собой тел, которые перемешиваются при движении в диске около Солнца.

1.6. Проблема хиральности

Хиральность – несовместимость объекта со своим зеркальным отражением любой комбинацией вращений и перемещений. Проявляется в том,

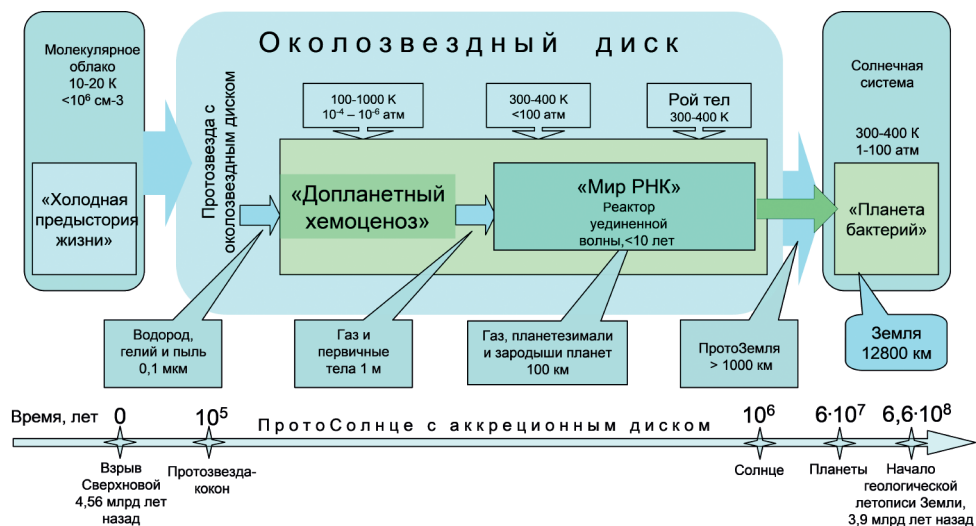


Рис. 4. Предположительная модель астрокатализа. Соотнесение этапов эволюции протопланетного диска с предполагаемыми этапами химической самоорганизации. (Снытников, 2009)

что молекулы одного и того же вещества существуют в двух вариациях, с одинаковыми химическими и физическими (за исключением поляризации) свойствами, но различающиеся по своему взаимодействию с другими хиральными молекулами, т.е. с различными биологическими свойствами. Эти зеркальные формы называются левыми (S-, иногда L-) и правыми (R-, иногда D-) хиральными изомерами (энантиомерами) (Blackmond, 2019). В качестве примера биологического проявления хиральности можно привести пеницилламин, левые изомеры которого применяются при отравлениях тяжелыми металлами, а правые приводят к слепоте.

В отношении живых организмов существует свойство гомохиральности, т.е. определенные молекулы во всех организмах представлены в форме одного-единственного изомера. Так, аминокислоты представлены левыми изомерами, а нуклеотиды и моносахариды – правыми (рис. 5).

Начиная с эксперимента Миллера–Юри (1953), проводятся эксперименты по созданию жизни из простых органических молекул *in vitro*. Однако при подобных экспериментах синтезируемые молекулы представлены обоими энантиомерами, что ингибирует их дальнейшую полимеризацию. Несмотря на то, что вопросами нарушения хиральной симметрии занимаются еще со времен Пастера, на сегодняшний день так и не сложилось однозначного понимания того, как, когда и при каких условиях это должно происходить. Исторически, в ответ на вопрос, когда относительно момента возникновения жизни возникла гомохиральность, гипотезы делятся на абиотические, согласно которым гомохиральность предшествовала

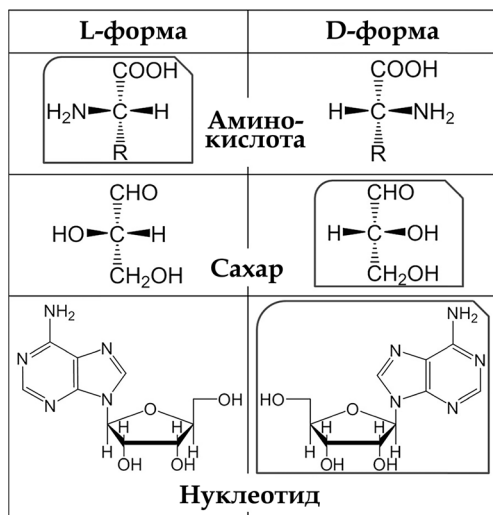


Рис. 5. Гомохиральность в организмах (Munegumi, 2015).

возникновению жизни, и биотические, предполагающие, что она возникла и закрепились уже в ходе биологического эволюционного процесса (рис. 6) (Bada, 1995; Bonner, 1991). Биотические гипотезы пользовались определенным признанием в ~1932–1987 гг., но на сегодняшний день считаются неактуальными, ибо, как уже было упомянуто ранее, в рацемате ингибируется полимеризация мононуклеотидов (Joyce et al., 1984; Павлов, Клабуновский, 2015).

Гипотезы, описывающие возникновение хиральной асимметрии в рамках абиотических процессов, можно разделить на стохастические и детерминированные. Стохастические предполагают, что триггером являются какие-либо стохастические молекулярные процессы в самом веществе; детерминированные же предполагают наличие некоего внешнего физического воздействия изначально хиральной природы (Bonner, 1991).

Полагается, что процесс возникновения гомохиральности протекает следующим образом: сначала происходит нарушение хиральной симметрии, в результате чего образуется некоторый избыток одного из энантиомеров, в рамках большинства предлагаемых гипотез этот избыток относительно незначителен. Поэтому зачастую возникает необходимость в механизме последующей амплификации возникшей асимметрии до состояния хирально однородного вещества (Soai et al., 2019).

Согласно разным точкам зрения, амплификация может происходить как на стадии мономеров, так и на стадии полимеризации (т. е. не ясно, насколько хирально чистой должна быть среда).

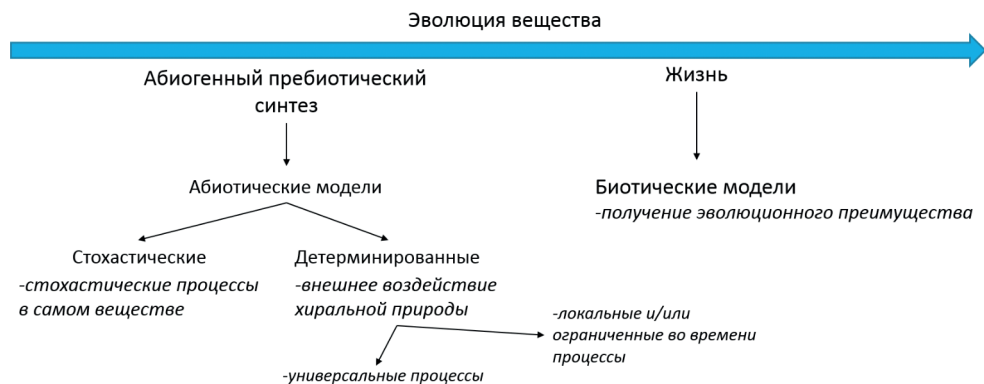


Рис. 6. Различные концепции возникновения хиральности (Bonner, 1991).

Все стохастические модели в той или иной мере основываются на предложенной Франком (1953) идее (рис. 7), что может существовать некий изомер, катализирующий свой собственный синтез и при этом ингибирующий синтез противоположного энантиомера, и при любом спонтанном нарушении хиральной симметрии системы последующее восстановление рацематности будет невозможно (Bonner, 1991). Все спонтанные механизмы нарушения хиральной симметрии подразумевают, что вероятность возникновения избытков левого и правого энантиомеров одинакова, что, вероятно, предполагает какие-то дополнительные механизмы, обеспечивающие наблюдаемое доминирование определенных хиральностей. На сегодняшний день наиболее эффективным путем максимальной энантиомерной амплификации является реакция Соаи (Soai et al., 2019).

В перечень стохастических моделей нарушения хиральной симметрии входят: разделение энантиомеров при кристаллизации растворов, асимметричный синтез на хиральных кристаллах, асимметричная адсорбция и катализ на кристаллах кварца, асимметричная адсорбция и полимеризация на глинистых минералах (Bonner, 1991).

Детерминированные модели основаны на внешнем воздействии сил изначально хиральной природы, таких как электромагнитные и гравитационные поля, поляризованный свет, радиорацемизация, слабое взаимодействие, потоки поляризованных частиц и т. д. (Bonner, 1991).

Относительно недавно были обнаружены популяции хиральных молекул в межзвездной среде, такие как, например, оксид пропилена, обнаруженный в холодном молекулярном облаке, окружающем кластер протозвезд, где эти молекулы формируются на гранулах льда при температуре примерно 5 К. Полагается, что данная формация примерно соответствует ранней стадии эволюции Солнечной системы. На сегодняшний день нет данных относительно

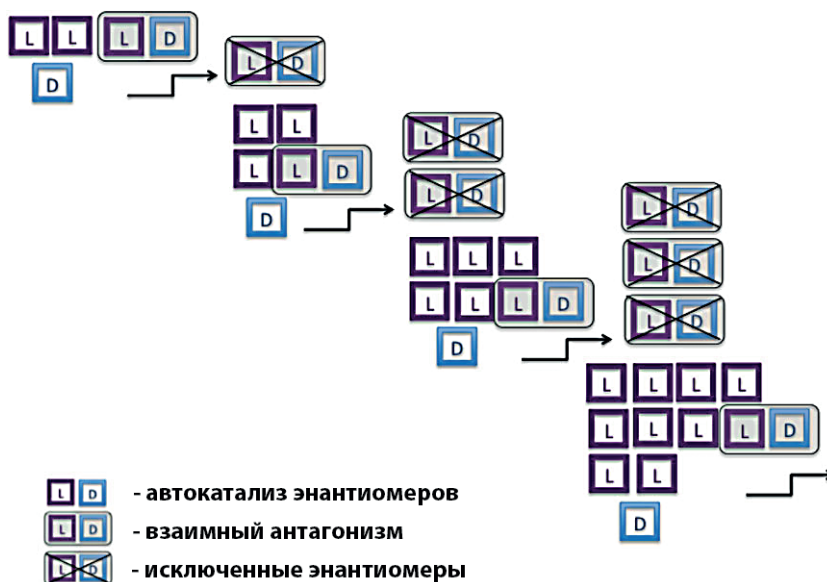


Рис. 7. Схематическое изображение предложенной Франком модели возникновения избытка одного из энантиомеров и последующей амплификации (Blackmond, 2019).

того, каким именно энантиомером представлены эти молекулы (McGuire et al., 2016). Тем не менее, это дает основание предположить возможность существования популяций хиральных молекул уже на ранних этапах существования Вселенной.

Помимо этого, хиральные аминокислоты были обнаружены в ряде углистых хондритов, таких как Murchison (CM2), Orgueil (CI1), Aguas Zarcas (CM2), Tagish Lake (-) и других, где они представлены, в том числе, левозакрученными. Тот факт, что некоторые из аминокислот метеоритов не обнаруживаются в земной биосфере, позволяет исключить фактор контаминации. Возраст метеоритов не исключает, что хиральность аминокислот может предшествовать образованию Земли, хотя при этом не ясно, образовались ли они непосредственно в них, или же были привнесены с аккретированным материалом (Meierhenrich, 2008; Cronin, Pizzarello, 1997; Pizzarello, Cronin, 2000; Pizzarello, Shock, 2010).

Исторически гипотезы, объясняющие механизм нарушения хиральной симметрии, начинались как абстрактные математические модели, которые впоследствии находили или не находили экспериментального подтверждения. Стоит отметить, что часть из них вообще не имеет твердой привязки к предполагаемым пребиотическим условиям (Valkovic, 2021), что, вероятно, впоследствии приведет к отсеиванию еще ряда гипотез. Многие модели предполагают ряд допущений, таких как постоянный приток энергии, постоянный

приток и отток вещества, и оперируют в масштабах малых временных промежутков. Также стоит учитывать возможность, что возникновение хиральных молекул и возникновение жизни не обязательно должны происходить в одном и том же месте, хиральные молекулы могут быть привнесены извне (Feringa, Van Delden, 1999; Bonner, 1978, 1991).

1.7. Доклеточные формы компартментализации

Под компартментализацией подразумевается некоторое обособление, частичная или полная изоляция каких-либо объектов от окружающего пространства, в контексте астробиологии под этими «объектами» могут пониматься некие самореплицирующиеся пребиотические молекулярные колонии, «мир РНК», протоклетки, клетки и другие подобные формы.

Возникновение компартментализации (таблица 3) позволило повысить концентрацию реплицирующихся молекул за счет более четкой локализации в пространстве, повысило скорость обмена информацией между соседними полинуклеотидами, снизило меру воздействия агрессивных химических веществ. В рамках концепции «мира РНК» для достижения устойчивой репликации и эволюции первых генетических молекул им нужна была частичная изоляция, в первую очередь для лучшей защиты от так называемых паразитических молекул – мелких обрывков рибонуклеиновой кислоты, которые реплицируются, полагаясь на функции других молекул, в то же время не способствуя их репликации (Mizuuchi, Ichihashi, 2021). В наше время идеальным способом компартментализации служат мембраны. Современные мембраны выполняют функции сохранения макромолекул внутри клетки, поддержания оптимальной концентрации ионов, электрогенеза, встраивания рецепторов для регуляции функций клетки, осмотической защиты при изменении осмолальности среды, стабилизации pH (Четверин, 2009).

Современная мембрана состоит из двойного слоя фосфолипидов, а также в ее состав входят амфипатические белки (обладающие одновременно

Таблица 3. Возможное усложнение функций плазматической мембраны в ходе эволюции (Наточин, 2009)

Этапы эволюции	Сохранение органических молекул	Селективность к ионам металлов	Стабилизация pH	Регулируемая водная проницаемость
Начальный	+	-	-	-
Промежуточный	+	+	+	-
Современный	+	+	+	+

гидрофильными и гидрофобными свойствами), которые играют ключевую роль в диффузии. До того, как появилась сложная система белков-переносчиков, диффузия шла по градиенту концентрации, и жидкая среда снаружи и внутри первых клеток по химическому составу должна была быть весьма схожей. Ю.В. Наточин, проанализировав состав макро- и микроэлементов цитоплазмы различных клеток, пришел к выводу, что первые клетки не могли зародиться в океане современного типа, так как в клеточной цитоплазме высокие концентрации калия и магния и низкая концентрация натрия (который губителен для клеток). Для поддержания высокой концентрации калия внутри клетки в процессе эволюции возник натрий-калиевый насос. В большом количестве в клетках присутствуют цинк и марганец, входящие в состав многих важных белков. Малые концентрации этих элементов в составе мирового океана позволяют предположить, что либо жизнь возникла за его пределами, либо же его химический состав изменился со временем (Наточин, 2007, 2009).

На роль древних компартментов различными исследователями рассматриваются: коацерваты, липосомы (водные пузырьки, окруженные мембраной из двух слоев липидов), молекулярные колонии (пористые гели), глинистые минералы (поры и поверхности) и т. д.

На роль первых компартментов рассматриваются более 30 типов минералов, включая глинистые, сульфидные и некоторые др., способных накапливать молекулы РНК (Mizuuchi, Ichihashi, 2021). Между слоями различных глинистых минералов могли локализоваться первые колонии или пористые структуры гидротермальных источников с границами на минеральной основе, в которых пористые структуры разделяют отдельные отсеки (водные фазы) в источниках. Также исследовалась модель возникновения маленьких колоний в каплях пара над горячими источниками. Из всех этих глинистых минералов наиболее вероятным кандидатом на роль древней компартиментализирующей матрицы считается монтмориллонит (Спирин, 2009). Он относительно широко распространен во Вселенной, обладает каталитическими свойствами и обладает большим, по сравнению с другими глинистыми минералами, пространством между слоями.

Также не ясно, предшествовало ли возникновение рибосом возникновению мембран, или же наоборот. Большая часть рибонуклеиновой кислоты клетки является рибосомной, из данного вида состоят сами рибосомы, то есть велика структурная роль РНК. В одной клетке содержится более 15 тыс. рибосом, они есть как у эукариот, так и у бактерий и архей. И во всех доменах устроены они весьма схожим образом, то есть имеют общее происхождение, а вот строение мембран у бактерий и архей весьма разное, что может косвенно свидетельствовать об их независимом и более позднем происхождении в разных доменах.

При изучении способности рибосом к функционированию вне клеток А.Б. Четверным были выращены колонии молекул ДНК и РНК на полиакриламидном геле. Данный гель впитывает всю свободную жидкость,

сильно разбухает, благодаря чему служит идеальным компартментом для колоний. Его пропитывали рибосомами, аминокислотами и другими компонентами системы трансляции, и удавалось наблюдать синтез белков без всяких мембран.

Минеральным аналогом данного геля может считаться монтмориллонит, обладающий такой же способностью адсорбировать воду и многие органические вещества. Например, в присутствии ионов кальция и магния монтмориллонит способен концентрировать нуклеотиды и полинуклеотиды из окружающей среды, а также катализировать безматричную полимеризацию нуклеотидов. В прошлом монтмориллонит защищал первые колонии от ультрафиолета, а при высоких температурах из смесей различных газов в нем самом могли образовываться примитивные органические вещества, предшественники аминокислот и нуклеотидов. Этот опыт говорит о том, что, теоретически, рибосомы могли произойти раньше мембран (Четверин, 2009).

1.8. Автокомбинаторика биофильных элементов. Протогеном

Все живые системы состоят, главным образом, из биофильных элементов: С, Н, О, N. «В нашей Галактике через некоторое время после Большого взрыва и возникновения, собственно, биофильных элементов запускается процесс автокомбинаторики этих элементов, который продолжается до момента вспышек сверхновых (предшествовавших образованию Солнечной системы). В результате процесса автокомбинаторики (продолжающегося и поныне), за это время, а это около 9 миллиардов лет, возникает более 300 (данные на сегодняшнее время) соединений, представляющих собой комбинации биофильных элементов. В это время работает закон автокомбинаторики биофильных элементов. С событием вспышки сверхновой, вероятно, сопряжено становление периодического закона Менделеева, и в это время появляется достаточное многообразие элементов». «Представление А.С. Спирина (Спирин, 2009) о возникновении “мира РНК” до образования Земли достаточно правдоподобно, поскольку ряд исследователей довольно убедительно предположили возможность возникновения колоний РНК в межслоевом пространстве монтмориллонита» (Розанов, 2023).

Вероятно, сам «мир РНК», а далее и «мир ДНК», развивались в межзвездном пространстве десятки миллионов лет, в результате образовалась некая авторазвивающаяся субстанция, которая была названа *прогеном* (*протогеном*) (рис. 8). Далее с течением времени начали формироваться первые клетки. Важно отметить, что на Земле существует и неклеточная форма жизни в виде вирусов. Вирусы – это молекулы ДНК или РНК, обычно заключенные в белковосодержащую оболочку. Вне клетки их можно сравнить просто с неким классом весьма сложно устроенных химических соединений. Но, попадая в клетку, вирусы становятся живыми объектами, обладающими

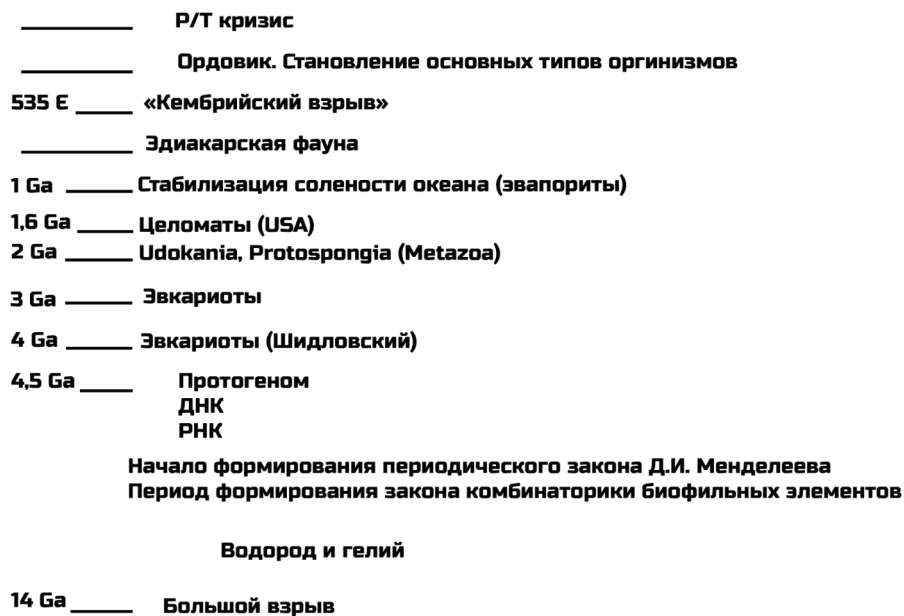


Рис. 8. Этапы развития органического мира (в контексте земной жизни) (Розанов, 2023).

наследственностью и способными к эволюции. Нет единого мнения о том, что возникло первым – клетки или вирусы. Согласно Е. Кунину (Koonin, Martin, 2005; Koonin et al., 2006), сначала появились рибозимы, потом первые РНК-вирусы, от которых произошли ретровирусы, а уже после них ДНК-вирусы (рис. 9). Одной из главных отличительных черт вирусов является способ размножения – вирус-специфические белки и нуклеиновые кислоты накапливаются в виде отдельных пулов (от англ. *pool* – общий фонд, объединенный резерв), из которых в конечном счете они черпаются для сборки дочерних вирусных частиц. Еще в доклеточные времена данным общим пулом мог служить мир РНК. Возник некий мир вирусов, переходная форма от неживого к живому. Сами клетки с липидными мембранами стали возникать позже, уже после изобретения механизма хранения и передачи генетического материала. И после своего возникновения клетки стали местом обитания вирусов, и их эволюция стала идти параллельно. Полагается, что на протяжении всей эволюции биосферы происходил непрерывный обмен генетической информацией между вирусами и клетками. По некоторым оценкам, более половины генома млекопитающих имеет вирусное происхождение. Также существует и диаметрально противоположная точка зрения. Так как вирусы являются облигатными паразитами, возникнуть они могли после самих клеток. И, возможно, сами они изначально были клетками, просто в результате паразитизма

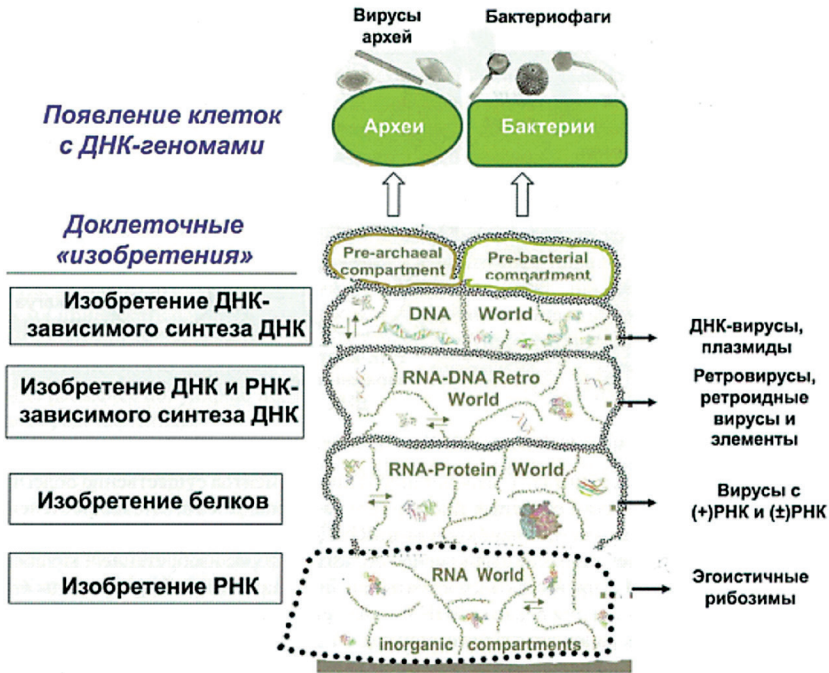


Рис. 9. Модель перехода от доклеточного мира РНК к археям и бактериям по Е. Кунину (Koonin et al., 2006).

максимально деградировали. Согласно теории П. Фортера (Forterre, 2006a, b), первые клетки-предшественники имели РНК-геном, и в них самих жили РНК-вирусы. Позже в результате обратной транскрипции возникли ретровирусы, от которых в процессе эволюции произошли различные ДНК-вирусы. Данные вирусы заразили клетки с РНК-геномом и постепенно превратили их уже в клетки с ДНК-геномом. Археи и эубактерии были заражены разными ДНК-вирусами, поэтому возникли независимо друг от друга (Агол, 2009).

Существовало представление об универсальном предке, который, эволюционируя, дал начало всей биосфере (LUCA); была сделана попытка воссоздать его генетический код. Для этого были использованы самые древние, универсальные для бактерий и архей гены, которые гипотетически являлись прогеномом общего предка. LUCA оказался строгим анаэробом, обитающим на дне океана около гидротермальных источников (типа черных курильщиков), то есть был термофилом и хемосинтетиком. Он мог восстанавливать диоксид углерода с помощью водорода, как современные метаногенные и ацетогенные археи (Weiss et al., 2016).

Биосфера в целом не может существовать без согласованной системы взаимодействующих групп микроорганизмов, которые остаются единственными катализаторами циклов углерода, азота, фосфора и сопряженных с ними

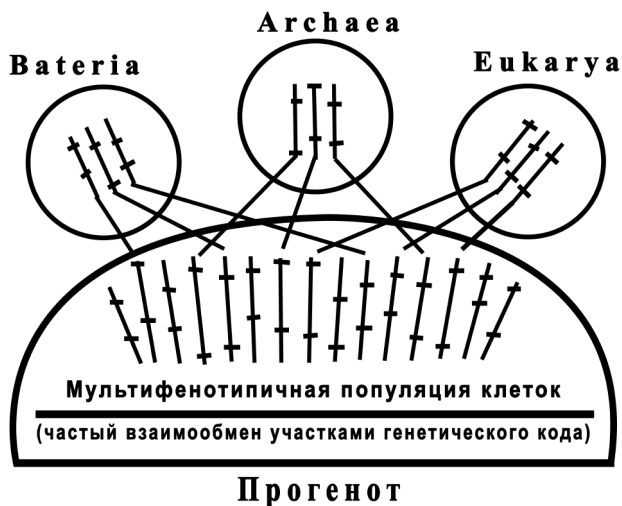


Рис. 10. Коллективный предок (Woese, 1998).

циклов других элементов – серы, железа, кальция. Вся это сложно устроенная система не могла развиваться всего из одной однородной группы микроорганизмов. Задача о происхождении жизни должна основываться на описании примитивной автономной экосистемы. Вопрос о происхождении жизни следует заменить вопросом о происхождении некоего первого сообщества. Именно примитивное автономное сообщество является стартовой точкой появления жизни. Это дает возможность описания последующих наблюдаемых событий как биогеохимической сукцессии (Заварзин, 2009). В образовавшемся в космическом пространстве прогеноме закладывались и авторазвивались все генетические возможности органического мира. И это не противоречит предположению, что не могло быть единого предка, постепенно возникла целая примитивная коммуна (т. е. коммунальный предок) (рис. 10) (Розанов, 2023).

Для транспорта жизни с космическими телами нет ограничений на перенос сообщества с «грязным льдом». Проблема состоит в соответствии сообщества и его экосистемы на родительском теле с условиями на примитивной Земле, а не в функциональной дивергенции от первичного предка.

Существуют абсолютно разные концепции. Дарвин считал, что в основе всего лежат случайные мутации, которые дают их владельцам неоспоримые преимущества в адаптации к окружающей среде, и, как следствие, активное размножение. Академик Л.С. Берг, напротив, считал, что естественный отбор поддерживает консерватизм и отмечает все отклонения от нормы, а возникновение нового основывается на бесконечных комбинациях уже заложенных изначально признаков. И по мере эволюции происходит постепенное раскрытие данных признаков.

Обычно считается, что в процессе развития все время должны рождаться мутировавшие особи с новыми полезными признаками. Л.С. Берг считал, что в основе всего лежит некоторая общая закономерность, и естественный отбор не имеет значения. Свою концепцию он назвал номогенез. Если бы вариация не захватывала сразу громадной массы особей, то сплошь и рядом она оказывалась бы, с точки зрения отбора, не имеющей никакого значения. Очень интересно такое явление, как предварение признаков. «А.П. Павлов (1901) в своей работе о нижнемеловых аммонитах обратил внимание на следующее: молодые особи некоторых аммонитов обладают признаками, которые в зрелом возрасте у них исчезают; эти же самые признаки со временем обнаруживаются у более высоко организованных форм, у видов, появляющихся в более молодых отложениях» (Берг, 1922). И подобных примеров в природе среди животных и растений много. То есть с течением времени постепенно проявляются признаки, которые были заложены уже изначально.

В геномах разных животных один и тот же ген может отвечать за несколько функций. Сложно понять все разнообразие комбинаторики, так как самим организмом используется лишь небольшая часть наследственной информации. Между генами в молекулах ДНК огромное количество «ненужной» информации. Существует представление, что это просто так называемые «спящие» гены. И при резких изменениях в окружающей среде может активироваться нужная комбинация и способствовать возможной адаптации организма.

Благодаря общим генам все эволюционируют параллельно, а родственные виды к тому же весьма схожим образом. Об этом нам говорят труды Н.И. Вавилова, открывшего закон гомологических рядов. Он писал: «Виды и роды, генетически близкие между собой, характеризуются тождественными рядами наследственной изменчивости с такой правильностью, что, зная ряд форм для одного вида, можно предвидеть нахождение тождественных форм других видов и родов» (Вавилов, 1921). Палеонтологические находки подтверждают закон гомологических рядов и показывают, что данный закон – это общий закон автокомбинаторики, которая развивается в результате автокатализа.

ГЛАВА II

Земля как объект астробиологии

2.1. Модели первичных ситуаций на ранней Земле

По сегодняшним представлениям, Земля сформировалась примерно 4,54 млрд лет назад из аккрецированного вещества газопылевого протопланетного диска. Но, так как самые ранние осадочные породы имеют возраст только лишь ~4 млрд лет, то о событиях, происходивших в первые 500–600 млн лет мы можем судить, лишь основываясь на данных моделирования.

Одним из факторов, обуславливающих своего рода уникальность Земли, является наличие Луны. На сегодняшний день нет общепринятого взгляда на механизм ее формирования. Согласно одной из моделей (модель мегаимпакта), Луна сформировалась вследствие столкновения прото-Земли с неким телом (гипотетическая планета Тейя, сравнимая по размерам с Марсом). Согласно другим моделям (модели ко-аккреции), Луна сформировалась в результате аккреции вещества, утраченного Землей и другими телами протопланетного диска вследствие макроимпактных событий. Согласно третьей модели, Луна сформировалась в каком-то другом месте Солнечной системы, а затем была захвачена гравитационным полем Земли в ходе миграции. Еще одна, альтернативная импактным, модель предполагает формирование и Луны, и Земли из одного общего облака хондритового материала, с последующим испарением, и процессами изотопного фракционирования и аккумуляции железа в более массивном теле. Исходя из оценок возраста древнейших известных лунных пород, формирование Луны произошло не ранее ~4,35 млрд лет назад. Наличие Луны оказало значительное влияние на Землю – под ее влиянием появились приливные силы, изменены наклон вращения и эксцентриситет орбиты. В настоящее время Луна медленно отдаляется от Земли, а обуславливаемые ею приливные силы были значительно мощнее на ранних

этапах существования Земли, и выдвигаются предположения о ее вкладе в возникновение магнитного поля Земли (Stevenson, Halliday, 2014; Галимов и др., 2005; Печерникова, Рускол, 2017; Обридко, 2020).

По вопросу, когда возникло магнитное поле Земли, нет однозначных данных, выдвигаются предположения о временных отметках в 4,2, 3,5 и 1,5 млрд лет назад, но все они являются оценочными (Печерникова, Сергеев, 2017; Рагульская, 2017).

Исторически сложились две основные модели, описывающие условия на поверхности ранней Земли: модель холодной Земли и модель горячей жидкой Земли (океан магмы). Относительно недавно была выдвинута новая описательная модель, в соответствии с которой поверхность Земли была холодной, но с горячими пятнами от импактных событий. Столкновения с телами порядка 1% массы (10–20 км диаметром) Земли приводили к формированию локальных морей магмы, в которых происходила дифференциация вещества. Предполагается, что в дальнейшем локальная дифференциация перешла в глобальную за счет гравитации. В результате дифференциации выделились две обособленные компоненты: железная, впоследствии сформировавшая ядро, и силикатная, из которой в результате вторичной дифференциации сформировалась ранняя кора (Мухин, 2009).

Как уже упоминалось ранее, древнейшие достоверные осадочные породы имеют возраст около 4 млрд лет, т. е. существование некой гидросферы в этот период однозначно. Гипотетически в более ранний временной период прилет ледяных комет мог приводить к образованию эфемерных, возможно обитаемых, бассейнов, однако геологических свидетельств этому нет. Наиболее вероятно, что объем воды, соизмеримый с современным, был достигнут лишь 1,3 млрд лет назад (рис. 11), о чем свидетельствует постоянное присутствие эвапоритов в отложениях, что указывает на постоянный уровень солености океана, что, в свою очередь, указывает на постоянство объема гидросферы (Жарков, 2005). Существуют разные модели формирования гидросферы, из них наиболее вероятной представляется привнесение водного льда в ходе поздней тяжелой бомбардировки и сопутствующей дегазации земной коры, а также конденсации водяного пара из атмосферы (Мухин, 2009; Розанов 2009).

В вопросе возникновения атмосферы существуют две основные концепции, в рамках одной из них восстановительная атмосфера предшествовала окислительной, согласно же другой, земная атмосфера была окислительной изначально. Предполагается, что атмосфера возникла вследствие дегазации земной коры при процессах вулканизма и кометных бомбардировках. Также не исключена возможность аккрецирования присутствовавшей газовой компоненты (H_2 , в меньшей степени H_2O , CH_4 и NH_3), оставшейся от протопланетного диска.

Так как модель восстановительной атмосферы исторически получила большее распространение, то многие гипотезы, теории и интерпретации

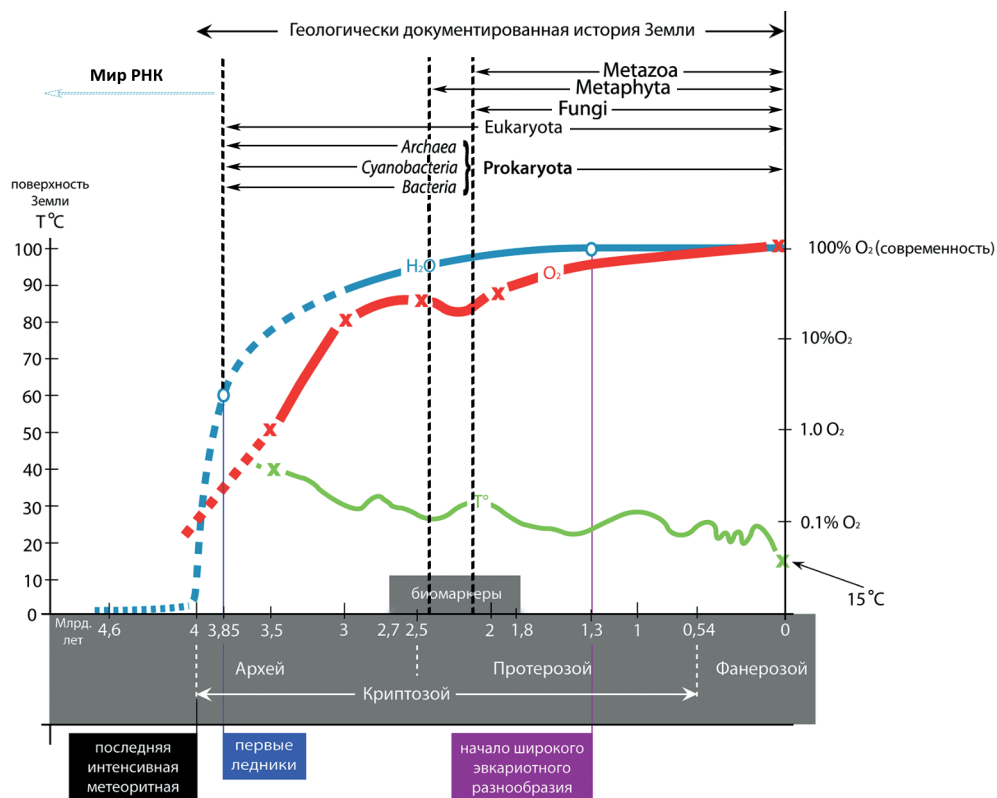


Рис. 11. Моделирование атмосферы и гидросферы по модельным, палеонтологическими и геологическим данным (с изм.) (Розанов, 2009).

основываются на ней. В рамках модели предполагалось, что ~2,45 млрд лет назад должно было произойти качественное изменение ее состава (так называемая «кислородная катастрофа») в результате жизнедеятельности цианобактерий (Schopf, 1983).

Традиционная модель эволюции атмосферы основана на геологических и геохимических данных, однако анализируемые месторождения минералов (уранинитов) по разным признакам относятся как к восстановительной, так и к окислительной атмосферам, а потому не могут являться однозначным свидетельством. Представления о существовании восстановительной атмосферы были основаны на исторически сложившейся интерпретации уровня организованности обнаруженных фоссилий архея и нижнего протерозоя, однако обнаружение зеленых водорослей уже в архее (~4 млрд лет назад (Schidlowski, 2005) указывает не только на окислительный характер атмосферы, но и на концентрацию кислорода, близкую к современной. Таким образом, можно полагать, что атмосфера возникла не позднее ~4 млрд лет назад и изначально была окислительной (рис. 11) (Розанов, 2009, 2021).

Межведомственный стратиграфический комитет

<http://vsegei.ru/ru/about/msk>



2022

Эпохея (эра) Эра (эра) Система (период) Подсистема	Отдел (эпоха)	Ярус (век)	Возраст (млн лет)	Акронема (акрон)	Эпохея (эон)	Эра (эра)	Система (период)		Отдел (эпоха)	Возраст (млн лет)							
							Верхняя	Нижняя									
Фанерозойская	Девонская	Верхний	Фаменский	358.9±0.4	Протерозойская PR	Верхнепротерозойская PR ₂	Рифейская RF	Вендская V	Верхний V ₂	555-570*							
			Франский	372.2±1.6					Нижний V ₁	600*							
		Средний	Живетский	382.7±1.6					Верхне-рифейская RF ₃	1030*							
			Эйфельский	387.7±0.8					Средне-рифейская RF ₂	1350*							
		Нижний	Эмский	393.3±1.2					Нижне-рифейская RF ₁	1650*							
				Пражский					407.6±2.6	Верхне-карельская KR ₂	2100*						
				Лохковский					410.8±2.8								
		Силурийская	Силурийская	Пржидольский					419.2±3.2	Нижнепротерозойская PR ₁ (Карельская KR)	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Верхне-карельская KR ₁	2500		
				Лудловский					423.0±2.3					Верхне-лопийская LP ₃	2800*		
				Горстийский					425.6±0.9					Средне-лопийская LP ₂	3000*		
	Гомерский			427.4±0.5	Нижне-лопийская LP ₁	3200*											
	Шейнвудский			430.5±0.7													
	Теличский			433.4±0.8	Нижнеархейская AR ₁ (Саамская SM)	Нижнеархейская AR ₁ (Саамская SM)	Нижнеархейская AR ₁ (Саамская SM)										
	Аэронский			438.5±1.1													
	Руддандский			440.8±1.2													
	Ордовикская			Ордовикская	Хирнантский	443.8±1.5	Архейская AR	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)					Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Катийский	445.2±1.4	
					Верхний	453.0±0.7									Сандбийский	458.4±0.9	
		Средний	Дарривильский		467.3±1.1	Дарривильский				467.3±1.1							
			Дапинский		470.0±1.4	Дапинский				470.0±1.4							
		Нижний	Флоский		477.7±1.4	Флоский				477.7±1.4							
			Тремадоский		485.4±1.9	Тремадоский				477.7±1.4							
		Кембрийская	Кембрийская		Верхний	485.4±1.9				Нижнеархейская AR ₁ (Саамская SM)	Нижнеархейская AR ₁ (Саамская SM)	Нижнеархейская AR ₁ (Саамская SM)	Нижнеархейская AR ₁ (Саамская SM)		Батырбайский	485.4±1.9	
					Средний	Аксайский									~ 497	Аксайский	~ 497
						Сакский									500*	Сакский	500*
						Аюсокканский									500*	Аюсокканский	500*
	Нижний			Майский	~ 504.5	Майский	~ 504.5										
				Амгинский	509*	Амгинский	509*										
				Тойонский	509*	Тойонский	509*										
				Ботомский	509*	Ботомский	509*										
	Нижний			Атдабанский	509*	Атдабанский	509*										
				Томмотский	509*	Томмотский	509*										
	Палеозойская	Палеозойская	Верхний	535±1*	Архейская AR	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Верхнеархейская AR ₂ (Лопийская LP)	Верхний V ₂	555-570*							
Нижний			535±1*	Нижний V ₁					600*								

Геохронологический возраст в ОСШ указан по "Глобальной шкале геологического времени" (International chronostratigraphic chart, 2022/02, URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSChart/Chronostrat-Chart2022-02.jpg>).

(*) Возраст границ подразделений ОСШ, которые не совпадают с Международной стратиграфической шкалой (подразделения докембрия, частично кембрия и перми). Приведены по Стратиграфическому кодексу (2019).

(~) Приблизительный возраст границ ярусов, для которых не утвержден стратотип границы или нет рассчитанного геохронологического возраста.

Общая стратиграфическая шкала (ОСШ), утвержденная Межведомственным стратиграфическим комитетом России (МСК), является обязательной для использования в геолого-картографических работах на территории Российской Федерации (Стратиграфический кодекс..., 2019).

Рис. 12. Общая стратиграфическая шкала (ВСЕГЕИ) (2022 г.).

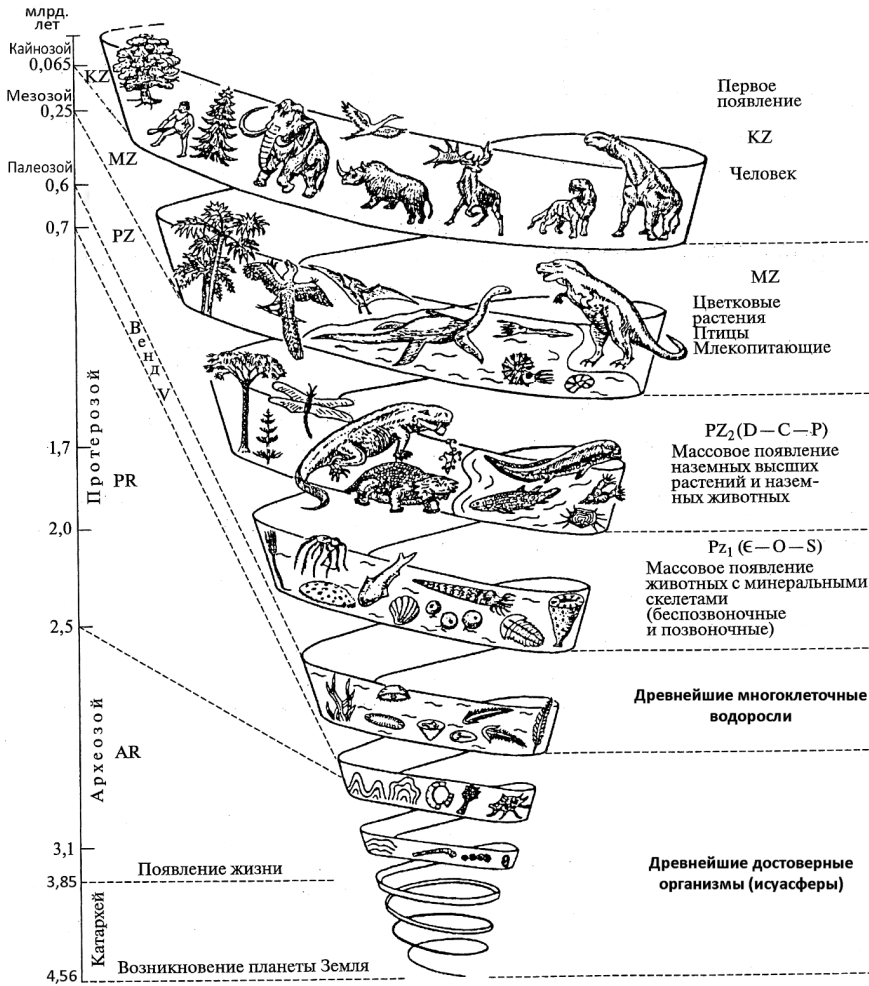


Рис. 13. История жизни на Земле (с изм.) (Михайлова, Бондаренко, 1997).

По современным данным Земля сформировалась как космическое тело около 4,56 млрд лет назад, в районе 4,5 млрд лет назад могла существовать гипотетическая саморазвивающаяся субстанция, называемая «протогеном», в которой закладывались все генетические возможности органического мира (Розанов, 2023). Летопись Земли (рис. 12, 13) берет свое начало после окончания интенсивной метеоритной бомбардировки (около 4 млрд лет назад) и знаменуется появлением крупных бассейнов осадконакопления. Древнейшие свидетельства земной жизни основаны на анализе изотопов углерода в графитах из метаосадочных пород Северного Лабрадора (Канада) возрастом 3,95 млрд лет (таблица 4).

Таблица 4. Основные вехи в развитии биосферы в докембрии (Астафьева и др., 2011; Астафьева и др., 2021; Белова и Ахмедов, 2006; Розанов, 2009, 2023; Саютина и Вильмова, 1990; Сергеев и др., 2010; Тимофеев, 1982; Kauffman, Steidtmann, 1981; Rozanov, Astafieva, 2013; Rozanov, 2006)

Акрон	Эон	Эра	Возраст (млрд лет) – находки фоссилий и биосферные события	
	Фанерозойский	Палеозойская	0,54 – «кембрийский взрыв»	
Докембрийский	Протерозойский	Верхнепротерозойский	0,6 – возникновение вендской (эдиакарской) биоты	
		Средне-рифейская	1,3 – объем воды Мирового океана стал соизмерим с современным; широчайшая экспансия различных организмов	
		Нижне-рифейская	1,4 – целоматы : следы ползания сантиметровой размерности, (северо-запад Сибирской платформы)	
	Нижнепротерозойский	Верхнека렐ская	1,8-1,5 – древнейшие свидетельства существования целомат : следы сверления и зарывания (Вайоминг, США) 1,8 – биомаркеры губкового происхождения 2,0 – возникновение глобальных ассоциаций организмов, наиболее древняя из которых включает 2 типа микробов: белчерского (мелководные) и ган-флинтского (глубоководные) типа 2,2-2,1 – древнейшие Metazoa : род <i>Udokania</i> и древнейшие губки (Восточная Сибирь); 2,2 – ископаемые зеленые водоросли (древнейшие известные празиофиты) рода <i>Pechengia</i> и грибы (род <i>Petsamomyces</i>) из фосфоритов печенгской серии Карелии	
		Нижнека-рельская	>2,45 – древнейшие многоклеточные водоросли : ветвящиеся формы (род <i>Gazavazinia</i>)	
	Архейский	Верхнеархейский	Верхне-ло-пийская	2,8 – древнейшие свидетельства континентальной биоты : бактериальные микрофоссилии в корях выветривания по гранитам и плагиогранитам охтинской серии Лехтинской структуры (Карелия), представленные прокариотами и эукариотами; древнейшие известные на Земле раковинные амебы
			Средне-ло-пийская	3,0 – разнообразные органостенные микрофоссилии (в т.ч. эукариоты) Карелии
		Нижне-ло-пийская	3,2 – одни из древнейших органостенных микрофоссилий (в т.ч. эукариот) из раннеархейских сланцев и алевролитов серии Мудис зеленокаменного пояса Барбертон (Южная Африка); начало обширной экспансии бентосных сообществ за пределы зеленокаменных поясов	
		Нижнеархейский		3,5–3,23 – окаменелые бактериальные маты из серий Онфервахт и Фиг Три зеленокаменного пояса Барбертон (Южная Африка) и серии Варравуна кратона Пилбара (Австралия) 3,85 – древнейшие достоверные микрофоссилии (исуасферы) из формации Исуа, Гренландия, интерпретированные как эукариотические зеленые водоросли 3,95 – предположительно биогенные графиты из древнейших метаосадочных пород Северного Лабрадора (Канада)
	Кларейский (гадеский)			4,0 – окончание интенсивной метеоритной бомбардировки 4,56 – формирование Земли как космического тела >6 – мир РНК; возникновение протогенома

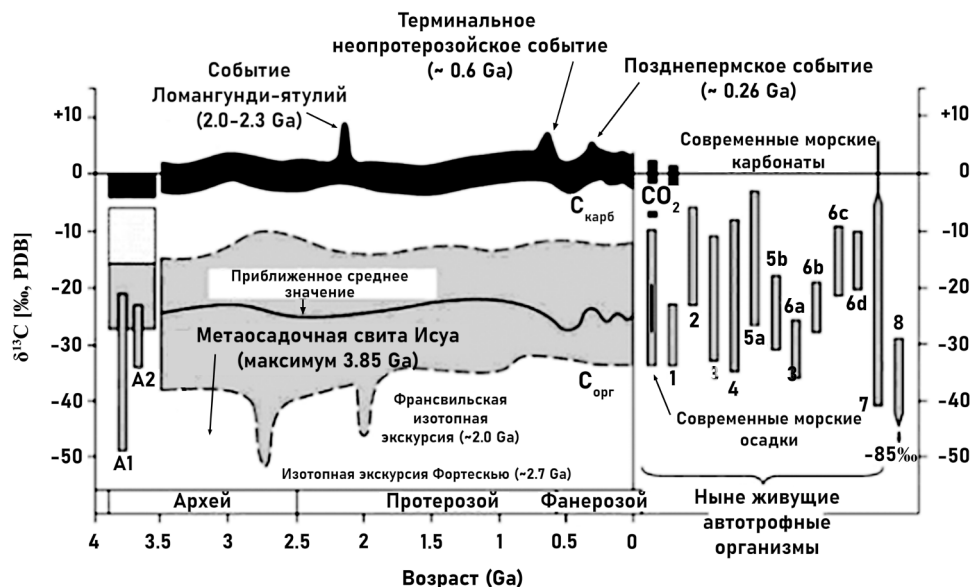


Рис. 14. В левой части – данные анализов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ для включений углерода в зерна апатита из зеленокаменного пояса Акилия 3,85 млрд лет (A1) и из нескольких железистых формаций Исуа (A2). В правой части – вклад в современную биомассу – (1) С3 растений, (2) С4 растений, (3) САМ растений, (4) эукариотных водорослей, (5a, b) природных и культивируемых цианобактерий, (6) группы фотосинтетических бактерий (не цианобактерий), (7) метаногенных бактерий и (8) метанотрофных бактерий. Данные А2 (Исуа) практически совпадают с данными для эукариотных водорослей (4) (Schidlowski, 2005).

Древнейшие микрофоссилии (исуасферы) известны из формации Исуа (Гренландия) возрастом около 3,85 млрд лет. На основании изотопии углерода сделано предположение, что исуасферы являются эукариотическими водорослями (Schidlowski, 2005) (рис. 14, 15).

Ископаемые микрофоссилии из серий Онфервахт (3,5–3,26 млрд лет) и Фиг Три (3,26–3,23 млрд лет) зеленокаменного пояса Барбертон (Южная Африка) и серии Варравуна (Австралия) возрастом 3,49–3,31 млрд лет обнаружены в вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах и представлены кокковидными и нитевидными формами. В серии Хуггеног (3,472–3,445 млрд лет) зеленокаменного пояса Барбертон обнаружены палочковидные формы (Астафьева и др., 2011; Сергеев и др., 2007) и слизистые слои (Wacey (ed.), 2009) (рис. 16).

В верхнем архее происходит широчайшая латеральная экспансия бентосных сообществ за пределы зеленокаменных поясов (Сергеев и др., 2007).

Разнообразные органостенные микрофоссилии, отнесенные к эукариотам, известны из отложений сланцев и алевролитов серии Мудис зеленокаменного пояса Барбертон возрастом около 3,2 млрд лет, из верхнеархейских пород кратона Пилбала возрастом около 3 млрд лет (Австралия) (Wacey (ed.),

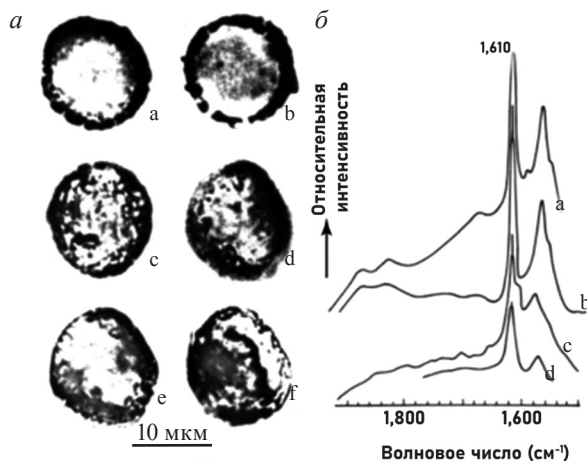


Рис. 15. *a* – сравнение *Huroniospora* sp.: (*a*–*c*) из железистой формации Ганфлинт, Онтарио (около 2,0 млрд лет) с *Isuasphaera* sp. (*d*–*f*) из метаосадков железокаменного пояса Исуса, Гренландия (около 3,85 млрд лет). Отчетливый краевой ободок, видимый у некоторых экземпляров, трактуется как реликт первоначальной клеточной стенки; *б* – рамановские спектры, полученные для *Huroniospora* sp., как из отдельных частиц (*a*), так и из шлифов (*b*), сравнение этих спектров со спектрами *Isuasphaera* sp. (*c*, *d*), полученными при тех же условиях. Сходство спектров предполагает и сходство остаточных органических компонентов микрофоссилий из Ганфлинта (*Huroniospora* sp.) и Исуса (*Isuasphaera* sp.). Выступающий пик (1610 см⁻¹) указывает на ароматические двойные связи между атомами углерода молекулярной структуры, что характерно для эукариот (Schidlowski, 2005).

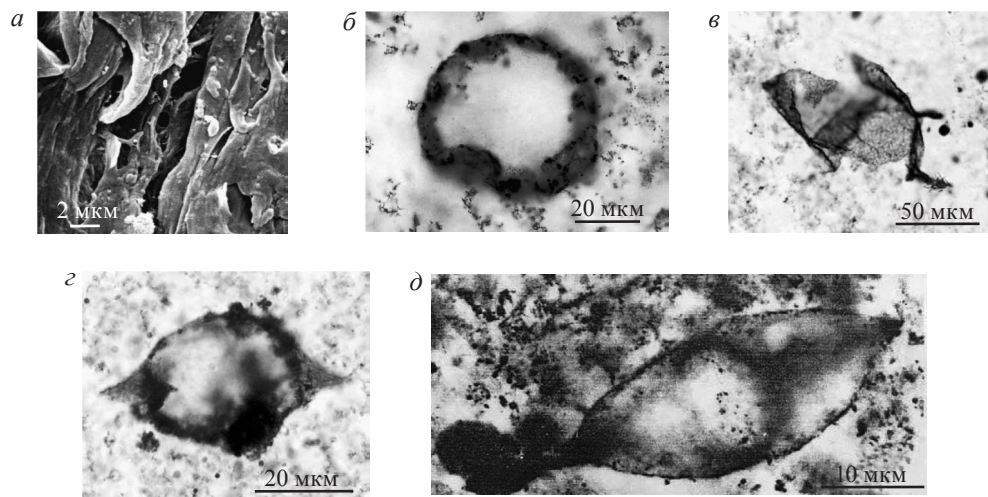


Рис. 16. Некоторые архейские микрофоссилии: *a* – остатки цианобактериального мата; формация Хуггенг, зеленокаменный пояс Барбертон, Южная Африка (около 3,45 млрд лет); *б* – округлая эукариотическая форма со складками смятия, формация Кварцит Фаррелл, серия Джордж Крик, зеленокаменный пояс Голдсуори, кратон Пилбара, Австралия (около 3 млрд лет); *в* – деформированный фрагмент оболочки эукариотической клетки со складками смятия, формация Кварцит Фаррелл, серия Джордж Крик, зеленокаменный пояс Голдсуори, кратон Пилбара, Австралия (около 3 млрд лет); *г* – линзовидная эукариотическая форма, формация Кварцит Фаррелл, серия Джордж Крик, зеленокаменный пояс Голдсуори, кратон Пилбара, Австралия (около 3 млрд лет); *д* – линзовидная эукариотическая форма формация Кромберг, зеленокаменный пояс Барбертон, Южная Африка (около 3,40 млрд лет) (Wacey (ed.), 2009).

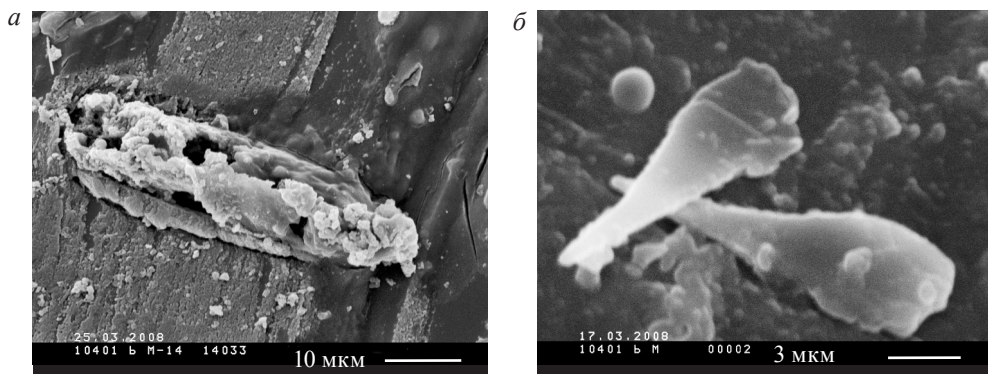


Рис. 17. Микрофоссилии из архейской коры выветривания; оз. Воронье; Лехтинская структура, Карелия (2,8 млрд лет): *a* – удлинненно-овальная форма; вероятно, имеется минерализованная оболочка толщиной 2–3 мкм, которая частично разрушена. Она может относиться к эукариотам; *б* – изогнутые бутылковидные формы, возможно, раковинные амебы (Астафьева и др., 2011).

2009) и из верхнеархейских пород Центральной Карелии (около 3 млрд лет) (Астафьева и др., 2011).

В корях выветривания верхнеархейского и нижнепротерозойского возраста встречены микрофоссилии, свидетельствующие о существовании континентальной биоты в докембрии (Астафьева и др., 2011) (рис. 17).

Верхнеархейско-нижнепротерозойские коры выветривания содержат многочисленные остатки нитевидных, реже – кокковидных бактерий. В отложениях верхнего архея Карелии обнаружена крупная (около 50×15 мкм) удлинненно-овальная форма, интерпретированная как раковинная амеба (Астафьева и др., 2011). В нижнепротерозойских корях выветривания Кольского полуострова возрастом >2,45 млрд лет найдены ветвящиеся

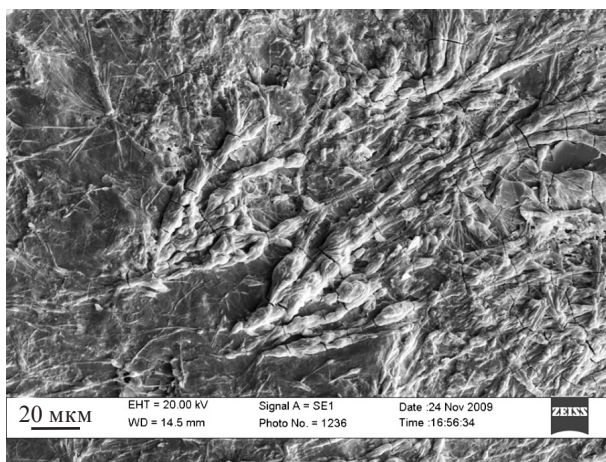


Рис. 18. Древнейшие известные многоклеточные водоросли (род *Gazavazinia*) из нижнепротерозойских кор выветривания Кольского полуострова возрастом >2,45 млрд лет (Rozanov, Astafieva, 2013).

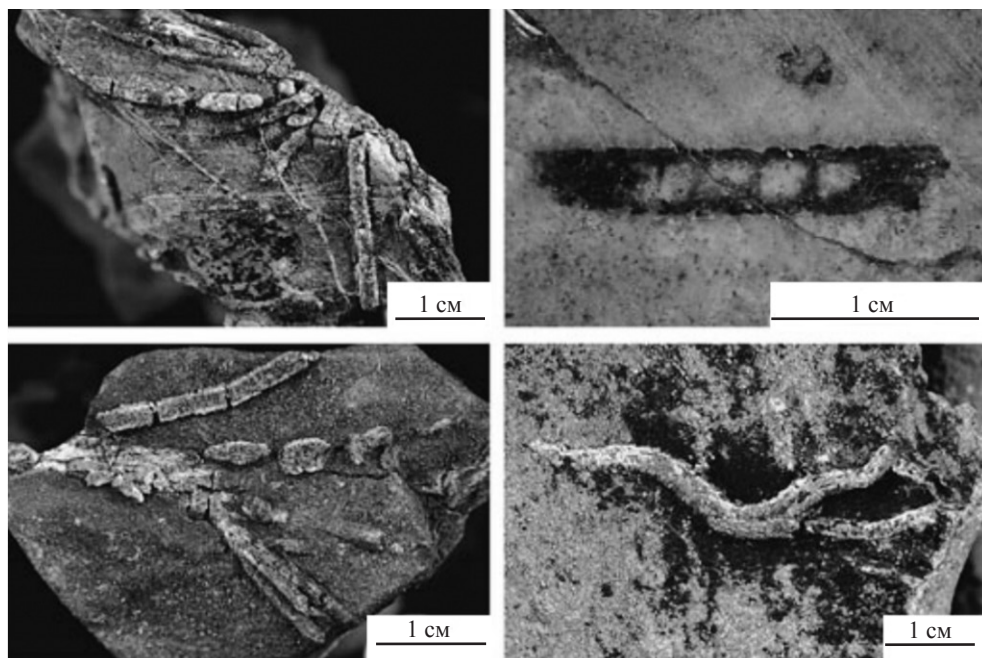


Рис. 19. Первые кишечнополостные (род *Udokania*); 2,2 млрд лет, Восточная Сибирь (Саютина, Вильмова, 1990).

формы (род *Gazavazhinia*), отнесенные к многоклеточным эукариотическим водорослям (рис. 18) (Rozanov, Astafieva, 2013).

Древнейшие достоверные *Metazoa* (Rozanov, 2006) (представители рода *Udokania* и древнейшие губки) известны из нижнепротерозойских отложений Восточной Сибири возрастом около 2,2–2,1 млрд лет (рис. 19).

В отложениях фосфоритов печенгской серии (Карелия) возрастом около 2,2–2,1 млрд лет обнаружены древнейшие грибы (род *Petsamomyces*) (Белова, Ахмедов, 2006) (рис. 20) и прازیнофиты (род *Pechengia*) (Розанов, Астафьева, 2008) (рис. 21).

Около 2 млрд лет назад возникают два типа микробиот: белчерский и ганфлинтский (рис. 22). Белчерский тип представлен организмами, обитавшими на мелководье (верхняя сублитораль – литораль). Белчерская микробиота хорошо представлена в формациях МакЛири и Касегалик надсерии Белчер (Канада). Ганфлинтский тип – микробиота более глубоководная, связанная зонами аккумуляции железорудных месторождений. Характеризуется широким морфологическим разнообразием форм. Представлена в районе оз. Верхнее и формациях Ганфлинт и Бивабик (Сергеев и др., 2007).

В нижнепротерозойских гнейсах Восточных Саян (2,5–1,65 млрд лет) были найдены многочисленные микрофоссилии (нитевидные бактерии и эукариотические формы, в т. ч. раковинные амёбы (рис. 23–26, изображения получены В.В. Саратовой).

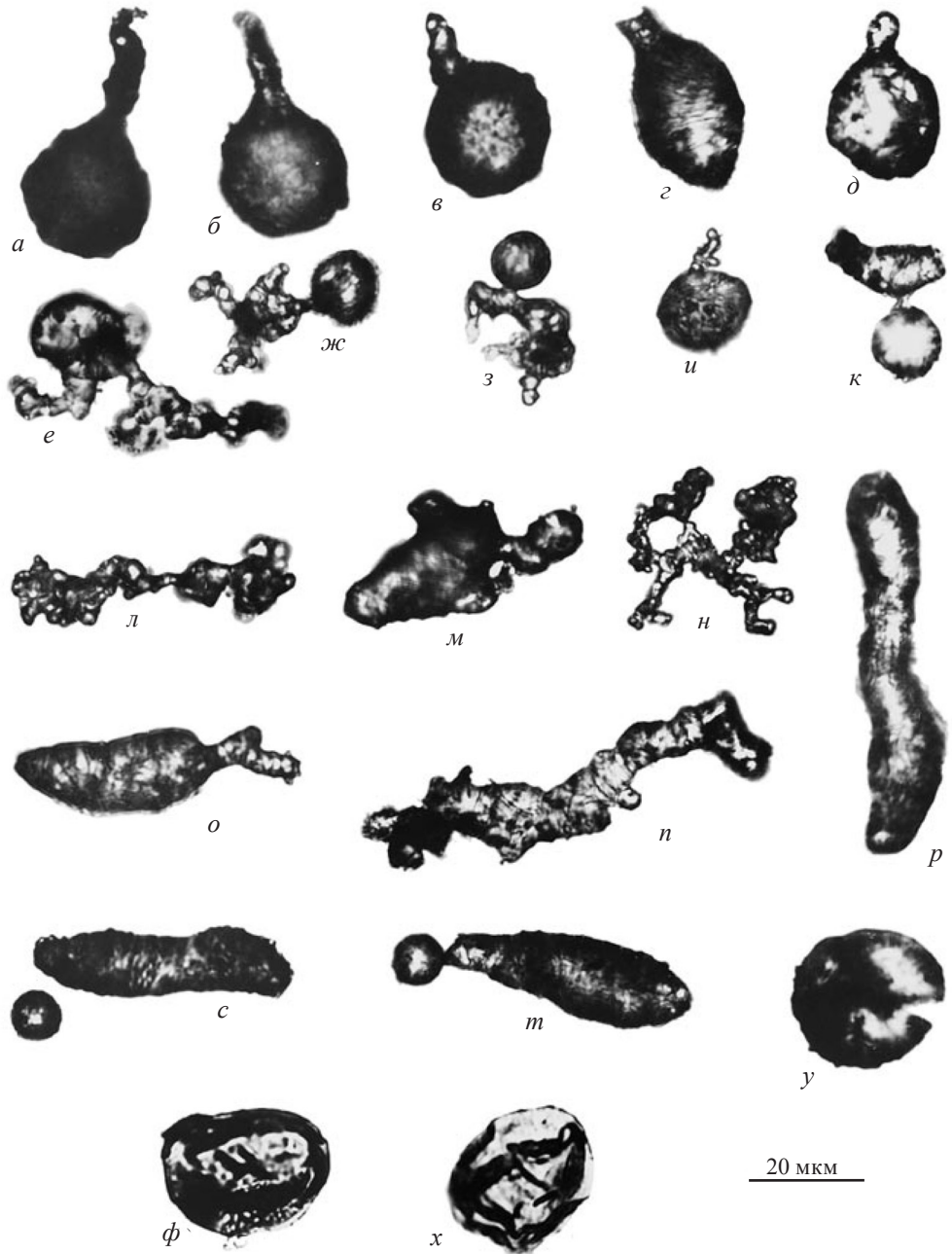


Рис. 20. Протерозойские органостенные микрофоссилии. Кольский полуостров, Печенгский район; нижний протерозой, ждановская свита: *a–м* – *Petsamomyces*, *a–д* – репродуктивные органы; *е–м* – вегетативные органы; *у–х* – *Leiosphaeridia* (Белова, Ахмедов, 2006).

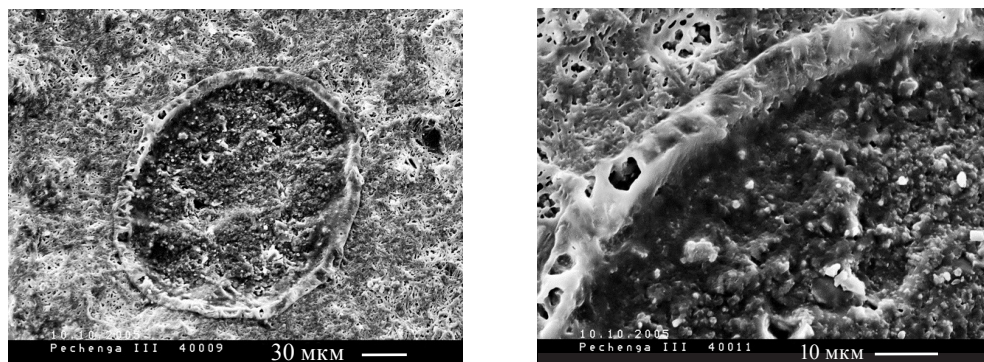


Рис. 21. Остатки фосфатизированной зеленой водоросли *Pechengia melezhiki* Rozanov et Astafieva из протерозойских фосфоритов возрастом 2,04 млрд лет, Кольский п-ов (Розанов, Астафьева, 2008).

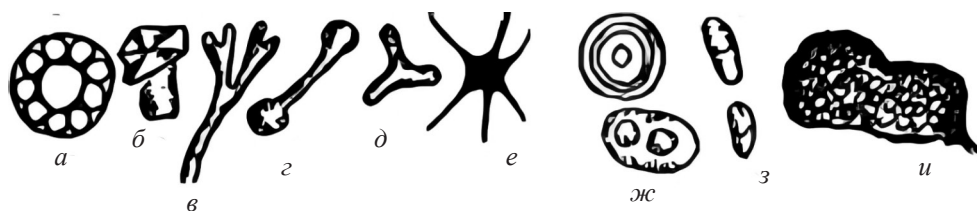


Рис. 22. а-е – ганфлинтский тип: а – *Eoastrion*, б – *Kakabekia*, в – *Xenothrix*, г – *Archaeorestis*, д – *Eosphaera*, е – *Eomichrystridium*; ж-и – белчерский тип: ж – *Gheodiniopsis*, з – *Eosynechococcus*, и – *Eontophysalis* (с изм.) (Сергеев, 1992).

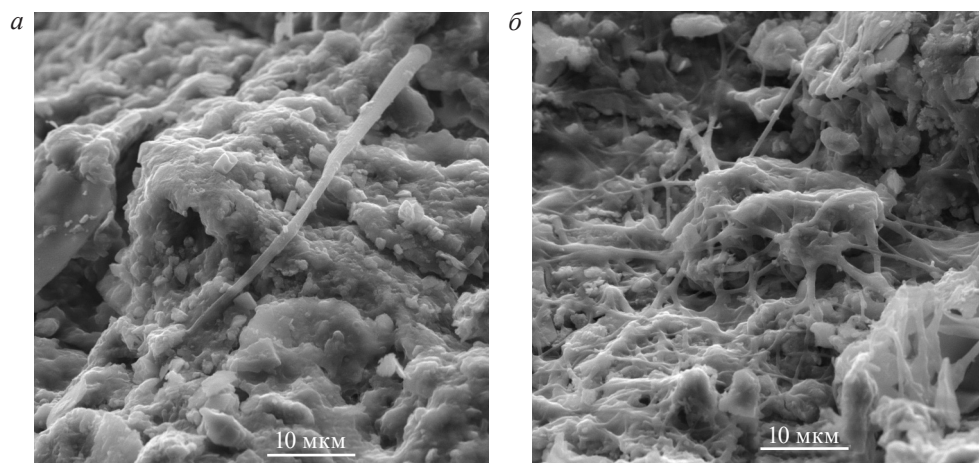


Рис. 23. Фоссилизированные бактерии в гнейсах: а – бактериальная нить, б – многочисленные бактериальные нити, окруженные гликокаликсом.

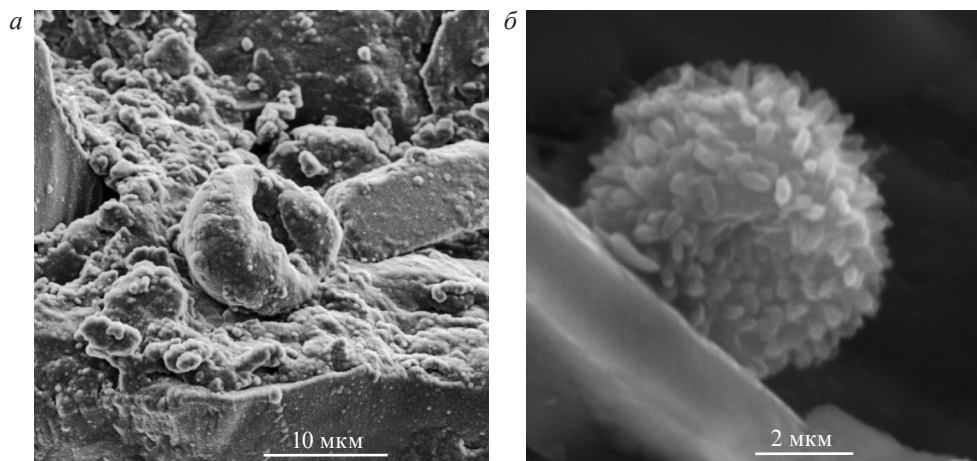


Рис. 24. Протерозойские гнейсы: *а* – деформированная эукариотическая форма округлого очертания; *б* – споривидная форма с бахромчатой поверхностью.

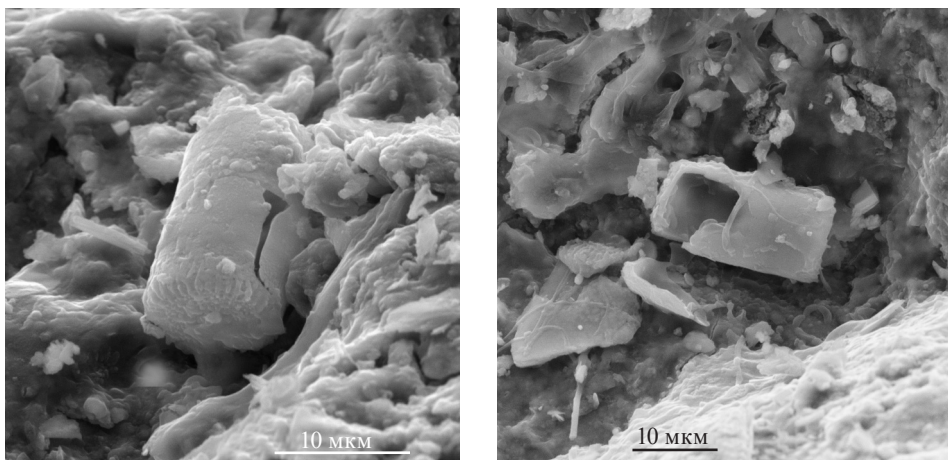


Рис. 25. Протерозойские гнейсы: полые цилиндрические формы.

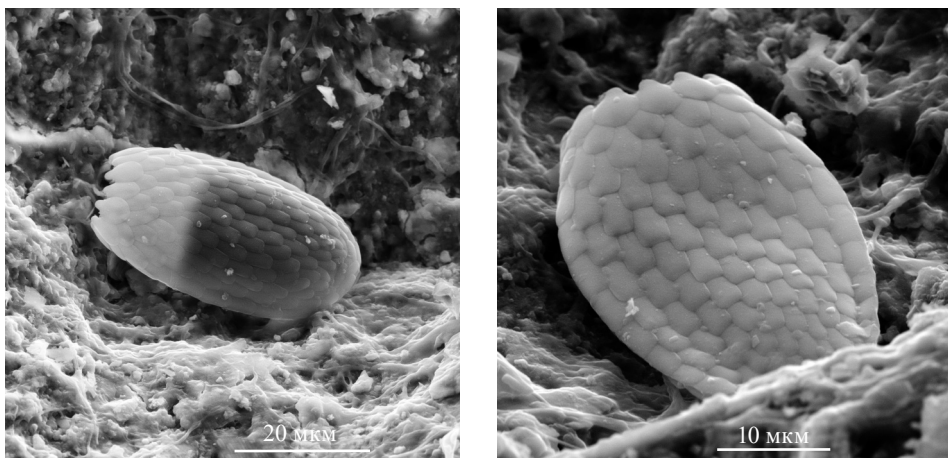


Рис. 26. Протерозойские гнейсы: раковинные амебы.

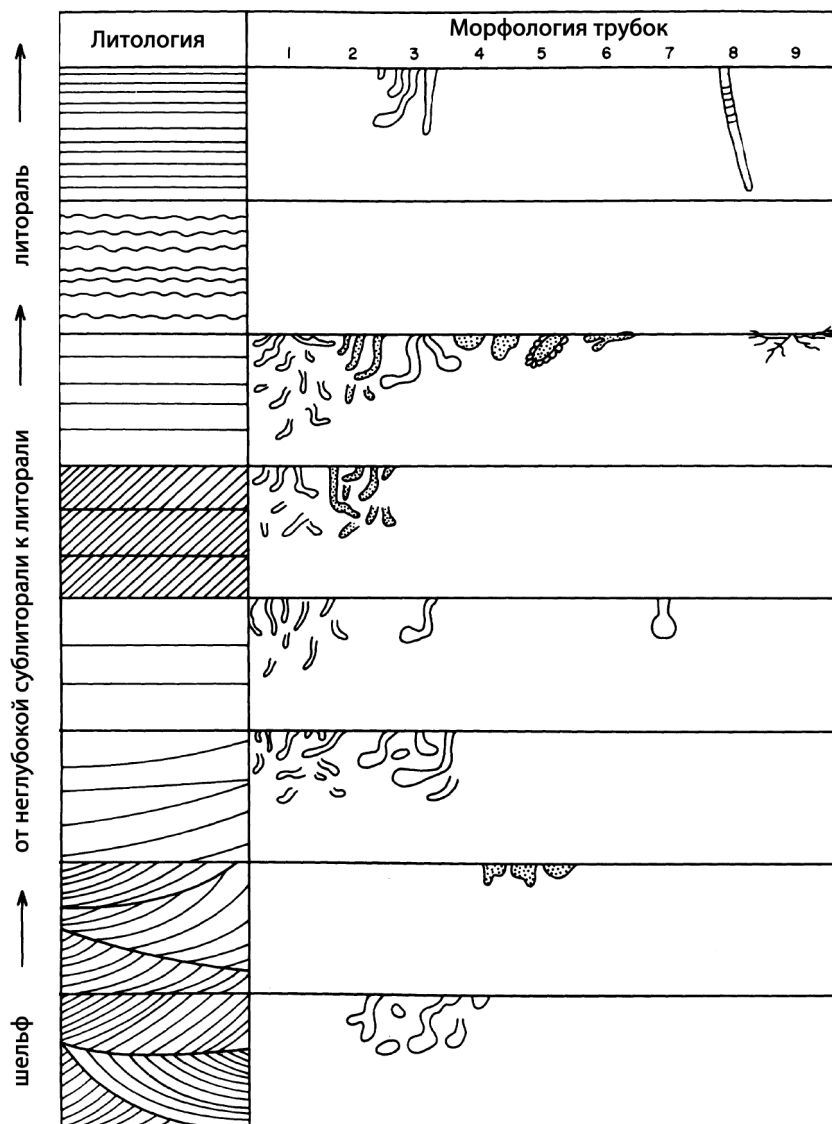


Рис. 27. Следы сверления и зарывания (темные области) в верхнепротерозойских породах Северной Америки (1,8–1,5 млрд лет) (Kauffman, Steidtmann, 1981).

В верхнепротерозойских породах Северной Америки (1,8–1,5 млрд лет) (Kauffman, Steidtmann, 1981) встречены следы сверления и зарывания (рис. 27). В отложениях верхнего протерозоя (1,4 млрд лет) северо-запада Сибирской платформы встречены следы ползания, сантиметровая размерность которых свидетельствует о том, что организмы, оставившие их, относились к целоматам (Розанов, 2009).

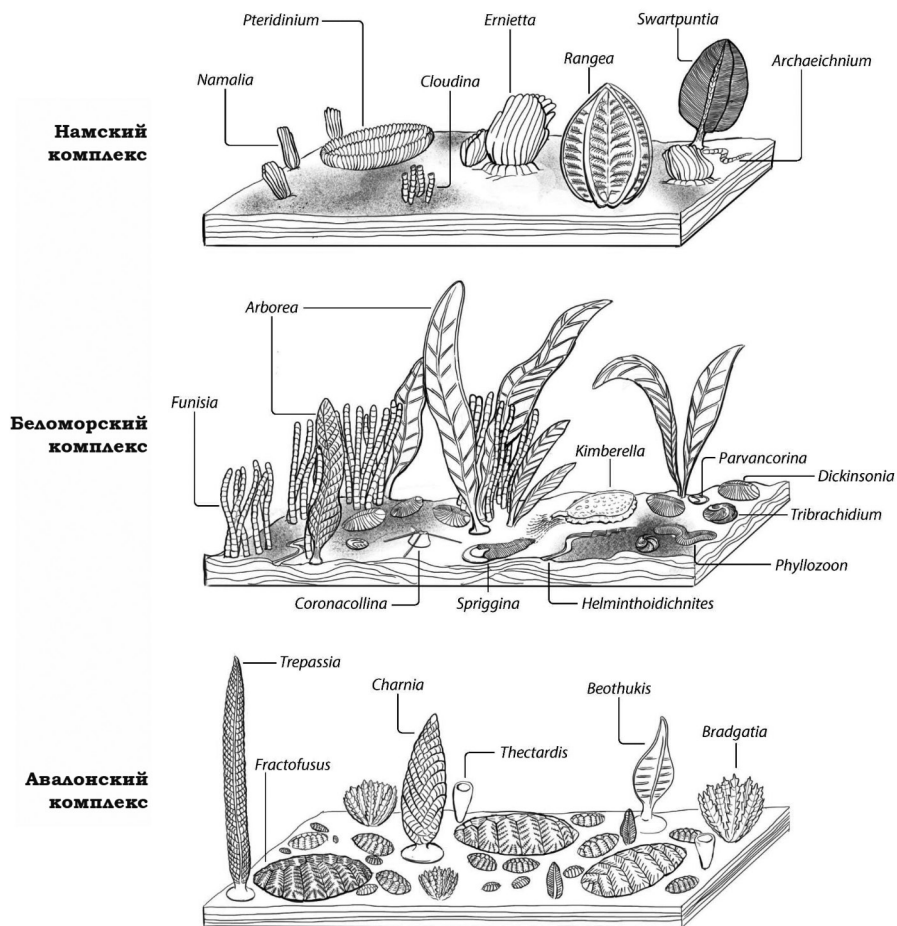


Рис. 28. Схематическое изображение состава сообщества и относительного обилия таксонов, характерных для трех комплексов эдиакарской биоты (Droser et al., 2017).

Отложения вендского периода характеризуются разнообразными находками представителей вендской (эдиакарской) биоты (рис. 28), обильюющей бесскелетными организмами со скользящей (билатеральной со сдвигом) или радиальной симметрией: петалонамами, трилобозоями, проартикулятами и т. д. Вендские окаменелости описаны в многочисленных работах: Федонкин, 1981; Федонкин, Соколов, 1987; Иванцов и др., 2018 и мн. др.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) высокоорганизованные организмы появились значительно раньше, чем считалось ранее; 2) колонизация суши микроорганизмами происходила уже в архее, о чем говорят остатки микробных сообществ из континентальных кор выветривания; 3) органический мир докембрия был довольно разнообразен.

2.3. Экосистемы экстремальных сред

Земля является наиболее полно исследованным объектом Вселенной, и, как следствие, некоторые ее места представляют собой интерес с точки зрения астробиологических исследований. Примерами таких мест являются зоны экстремальных для жизни условий, физико-химические условия в которых могут симулировать условия ранней Земли или внеземных тел. Исследования подобных мест на Земле не только дают возможность понять реальный диапазон условий, при которых может сохраняться жизнеспособность организмов, но также сформировать представление о возникновении и возможных путях развития гипотетических экосистем на других планетах и их спутниках.

На Земле встречается целый ряд микроорганизмов, способных выживать в очень суровых и непригодных для других организмов условиях обитания. Такие микроорганизмы можно отнести либо к экстремотолерантным организмам, либо к экстремофилам. Экстремотолерантные организмы – это те, которые могут переносить экстремальные значения одного или нескольких физико-химических параметров, хотя оптимально растут в «нормальных» условиях. В отличие от экстремотолерантных организмов, экстремофилам для нормального роста необходимы экстремальные значения определенных физико-химических параметров. Известно множество видов экстремофилов, которые можно классифицировать следующим образом (Мямин, 2022):

- *ацидофилы* (с оптимальным ростом при уровне pH 3,0 или ниже);
- *алкалифилы* (с оптимальным ростом при уровне pH 9,0 или выше);
- *эндолиты* (организмы, которые живут в микроскопических пространствах внутри горных пород, например, в порах между минеральными зернами);
- *галофилы* (организмы с оптимальным ростом при концентрации растворенных солей 50 г/л или выше);
- *пьезофилы (барофилы)* (организмы с оптимальным ростом при гидростатическом давлении выше 10 МПа (~99 атм.));
- *гиперпьезофилы* (организмы с оптимальным ростом при гидростатическом давлении выше 50 МПа (~493 атм.));
- *термофилы* (организмы с оптимальным ростом при температуре выше +45 °C (113 °F));
- *гипертермофилы* (организмы с оптимальным ростом при температуре выше +80 °C (176 °F));
- *психрофилы/криофилы* (организмы с оптимальным ростом при температуре +15 °C или ниже);
- *радиорезистентные организмы* (устойчивые к высоким уровням ионизирующего излучения);
- *ксерофилы* (организмы с оптимальным ростом при активности воды ниже 0,8, т. е. обитающие в условиях крайне низкой влажности).

В пределах каждого из этих классов выделяются дополнительные подклассы по степени выраженности того или иного лимитирующего фактора. Организм также может относиться одновременно к нескольким экстремофильным классам, т. е. являться полиэкстремофилом.

На Земле, впрочем, в редких случаях, все же могут существовать необитаемые места, и одним из подобных мест, гипотетически, может являться озеро Восток в Антарктиде. Данный водоем располагается под ледяным панцирем толщиной 3721 м. Его достаточно долго исследуют, пытаясь найти следы жизни. В образцах, представляющих собой замерзшую воду с глубины 3721 м, вошедшую в скважину после вскрытия озера, был найден генетический материал. Образцы льда были тщательно деконтаминированы и растоплены в холодном «чистом» помещении. В результате анализа ДНК по методу Сэнджера было получено в общей сложности 16 бактериальных флотипов. Но при более подробном исследовании данного материала обнаружили, что все данные филумы встречаются и в нанопоровом контроле, то есть являются контаминацией. Это обусловлено высокой сложностью сохранения стерильности при бурении льда и заборе проб (так как поверхностные слои льда заселены микрофлорой) (Булат и др., 2020, 2023).

Высокотемпературные глубинные микробные сообщества

Значительное количество и разнообразие экстремофилов можно найти под поверхностью Земли. Это глубинные континентальные биоценозы, состоящие из геологически изолированных друг от друга экосистем, различающихся по физико-химическим, геологическим и трофическим характеристикам. Большая часть глубинных экосистем существует в условиях повышенных температур (+50–120 °С). Верхняя граница зависит от слагающих пород, а нижней границей можно считать зону существования жидкой воды с температурой +120 °С и выше (средняя глубина около 4 км). Биота представлена термофильными и барофильными микроорганизмами. Их сообщества, возможно, являются одними из древнейших экосистем, существовавших на заре возникновения жизни. Подобный вывод основывается на расшифровке генома «подземных» бактерий. Также найдены микроорганизмы, способные расти и развиваться при температуре +120–130 °С, споры которых сохраняют жизнеспособность при температурах +400 °С. Подобный диапазон температур достигается в глубинных морских горячих источниках (типа черных курильщиков), где перегретый водяной пар остается жидким за счет повышенного гидростатического давления. Подземные местообитания значительно различаются по основным физико-химическим характеристикам, таким как соленость, уровень pH, а также температуре. Большинство исследованных подземных местообитаний имеет нейтральный или слабощелочной pH среды, за исключением горнодобывающих скважин, где pH может значительно варьировать. Из этого можно сделать вывод, что подземные микробные сообщества весьма разнообразны, среди них можно встретить как алкалофилов, так и ацидофилов. Трофически

биота глубоководных термофилов представлена, в основном, органотрофами, но встречается также значительное разнообразие хемоавтолитотрофов (Бонч-Осмоловская, 2009; Слободкин, Слободкина, 2014).

Метанотрофы

Установлено, что 80% атмосферного метана имеет современное биологическое происхождение и только 20% – результат вулканической деятельности. Метан является основным компонентом природного газа и одним из нефтяных газов. Значительное количество метана образуется в анаэробных условиях за счет деятельности метанобразующих архей, однако в атмосфере он почти не накапливается благодаря метанотрофам (метанооксилюющим) бактериям.

Поначалу предполагалось, что метан окисляется только в аэробных условиях, но впоследствии было установлено, что окисление может осуществляться и в полностью бескислородной среде благодаря деятельности консорции (консорция – структурная единица биоценоза, объединяющая автотрофные и гетеротрофные организмы на основе пространственных (топических) и пищевых (трофических) связей).

Большую концентрацию метана можно увидеть на морском дне, в зонах с грязевыми вулканами. Кроме весьма распространенных групп аэробных метанотрофных бактерий, там можно встретить необычные сообщества, в которых бактерии и археи образуют единую симбиотическую систему, и окисление метана уже неразрывно связано с восстановлением сульфата ($\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} = \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$) (Niemann et al., 2006).

Среди метанооксилюющих бактерий встречается множество экстремофилов. Они являются активными компонентами микробных сообществ, населяющих (гипер)соленые и щелочные водоемы, горячие источники, водоносные слои глубинных залежей изверженных пород (гранитов), многолетнемерзлотные грунты, в том числе возрастом около 3 млн лет (Хмелина, 2006). Особенно интересен тот факт, что метанотрофы обнаружены в зоне вечной мерзлоты, где способны окислять и ассимилировать метан, в том числе при отрицательной температуре, поэтому могут быть активными в вечномерзлых экосистемах. Способность к окислению метана микроорганизмы имеют благодаря ферменту метанмонооксигеназа. Существует еще родственная аммиачная монооксигеназа, встречающаяся в окислителях аммиака. В многолетнемерзлых породах найдены гены практически всех известных родов метанотрофных бактерий, включая мезофильные, психрофильные и термотолерантные формы. Показано, что они даже после длительного пребывания в мерзлоте (от 1 тыс. до 1,8–3 млн лет, хотя стоит отметить, что оживление бактерий возраста более 400 тыс. лет проблематично) способны окислять метан, в том числе при отрицательной температуре, поэтому могут быть активными в вечномерзлых экосистемах (Хмелина, 2006). Более подробно криофильные сообщества рассмотрены в соответствующем разделе (2.4).

В составе атмосфер или гидросфер спутников газовых гигантов (таких как Европа, Энцелад, и, особенно, Титан) присутствует метан. И, теоретически, он может использоваться микроорганизмами даже при отрицательной температуре и в отсутствии кислорода. Более того, довольно часто образуются сложно устроенные консорциумы микроорганизмов, благодаря которым создаются замкнутые и безотходные циклы различных химических элементов. Например, в той же бескислородной среде один из видов архей окисляет метан, используя в качестве окислителя нитрат: $5\text{CH}_4 + 8\text{NO}_3^- + 8\text{H}^+ \rightarrow 5\text{CO}_2 + 4\text{N}_2 + 14\text{H}_2\text{O}$. В замкнутой экосистеме метан должен быть возобновим. В природе можно найти бактерий, производящих метан: $\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Водород, необходимый для синтеза метана, могут производить карбоксидотрофы: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$. Окись углерода может образовываться в недрах планеты в результате тепловых реакций, подобных пиролизу. Многие виды хемосинтетиков могут вступать в сложные симбиозы, и в результате чего формируется своего рода замкнутая экосистема.

Ксерофилы

Стоит также отдельно упомянуть таких экстремофилов, как *ксерофилы* (организмы с оптимальным ростом при активности воды ниже 0,8, т. е. обитающие в условиях крайне низкой влажности). Жизнь невозможна без воды, поэтому астробиологи, оценивая потенциально обитаемые участки Вселенной, в первую очередь ищут ответ на вопрос, возможно ли существование на данных объектах воды в жидком виде. Как показали недавние исследования, некоторые организмы могут полностью обходиться без жидкой воды, извлекая ее из горных пород. В чилийской пустыне Атакама, в одном из самых засушливых мест на Земле, в толще гипсовых пород обитают цианобактерии *Chroococcidiopsis*, которые добывают воду прямо из кристаллов гипса, превращая его в ангидрид. Разрастаясь, их колонии выделяют вокруг себя кислотные биопленки, разбедаяющие породу, в результате гипс растворяется, распадаясь на кальций, сульфат-ион и воду, а на втором этапе, уже потеряв воду, отлагается в виде ангидрита. Примером многоклеточного ксерофила высокого уровня организации можно назвать *Helianthemum squamatum* (двудольное растение сем. ладанниковые). Произрастая в южном Средиземноморье, оно так же извлекает воду из горных пород, богатых гипсом, получая таким образом до 90% необходимой ему жидкости. Поэтому можно предположить, что для некоторых форм жизни не обязательно наличие значительных резервуаров жидкой воды при условии присутствия кристаллогидратов. Также определенный интерес представляют минералы, содержащие капиллярную воду (Huang et al., 2020).

Ацидофильные сообщества

На Земле существует ряд мест, агрессивные для подавляющего большинства форм жизни условия которых могут служить своего рода природной

лабораторией по моделированию условий на других планетах или спутниках. Одним из таких мест является река Рио-Тинто (Испания), которая в результате кислотного дренажа окислилась ($\text{pH} \approx 2$) и оказалась загрязнена тяжелыми металлами и неорганическими сульфидами. С точки зрения астробиологии, интерес к подобным местам вызван схожестью этих условий с условиями некоторых регионов Марса (например, плато Меридиана). В данной реке обнаружено ацидофильное сообщество, метаболизм представителей которого основан на окислении железа и серы (Джейкобс, Теста, 2014).

Среди ацидофилов следует отдельно выделить такие микроорганизмы, как ферроплазма и термоплазма – род архей, принадлежит к отряду *Thermoplasmatales*. Данный вид был открыт относительно недавно в 2000 г. в биореакторе металлургического завода (г. Тула). В природе *Ferroplasma* обитает в заброшенных шахтах, наравне с тионовыми бактериями, вызывая такое явление, как кислотный дренаж; в горных породах, содержащих сульфидные руды, такие как пирит; в кислых водоемах с большим содержанием сульфидов. Вид *F. acidiphilum* представляет собой хемоавтотрофа, который оптимально растет при $\text{pH} \approx 1,7$ и получает энергию путем окисления двухвалентного железа и углерода путем фиксации углекислого газа. Главной уникальностью данных архей является клеточный состав белков. Из 189 исследованных клеточных белков *F. acidiphilum* 86% являются железометаллопротеинами. К ним относятся белки с установленной структурной, шаперонной и каталитической ролью. Из 78 различных железо-металлопротеинов 28 оказались типичными, остальные 50 идентифицированы как уникальные, представляют собой белки, которые до сих пор никогда не содержали, за исключением редких случаев, в своем составе железо. Чтобы оценить, необходимо ли железо в белках ферроплазмы, оно было удалено из шести очищенных белков, выбранных случайным образом. Это сопровождалось более чем на 80% деформацией третичной и вторичной структуры белков, примерно на 80% падала и их активность. В результате авторы исследования пришли к выводу, что в данных белках железо играло ключевую роль в поддержании третичной структуры белка.

Из этого не следует, что функциональность белков на основе железа, имеющихся у ферроплазмы, выше. К примеру, у *Acidithiobacillus*, также обитающих и процветающих в аналогичных средах, белков с железными заклепками не имеется. Эта особенность не выявлена у архей из ближайшего филума.

Возникло предположение об исключительно древнем происхождении данной археи. Возможно, первые клетки зародились в горных породах, содержащих кристаллы пирита. И первоначально все белковые катализаторы имели в своем составе железо. Постепенно при освоении других местообитаний, белки из-за дефицита железа в окружающей среде стали меняться. Сама ферроплазма является аэробом, поэтому с данной версией не согласны эволюционисты, считающие, что в начале архея кислорода на Земле еще не существовало. Если посмотреть на эту проблему с другого ракурса, то данной

особенности ферроплазмы можно найти более простое объяснение. Первоначально был универсальный предок, осваивающий множество различных местообитаний, и предки ферроплазмы изначально обитали в окружении ионов железа, их микроорганизм просто смог максимально приспособиться к данным условиям существования. То есть, вероятно, ферроплазму можно считать древней боковой ветвью эволюции (Ferrer et al., 2007).

2.4. Экосистемы вечной мерзлоты – модель для астробиологии

Вечномерзлые отложения Арктики и Антарктиды являются природными экосистемами, обладающими уникальной особенностью – возможностью естественной низкотемпературной консервации биологического материала и содержащейся в нем генетической информации. Другими словами, вечная мерзлота – ключ к событиям Земной действительности периода кайнозоя, включающий возможность палеореконструкций температурного режима; условий и факторов, определяющих типы и условия формирования существовавших ранее ландшафтов; биогеохимических процессов и разнообразия биоты, вовлеченной в них на момент формирования мерзлоты до воздействия на эти экосистемы антропогенных факторов.

В условиях изменяющегося климата и возможной деградацией мерзлоты, весь погребенный в мерзлых толщах пул позднекайнозойских организмов и генетических ресурсов, таких как биогазы, фрагменты РНК и ДНК, пигменты, белки и внеклеточные ферменты, может быть встроен в современные биогеохимические процессы, формируя биоразнообразие и оказывая влияние на круговорот биогенных элементов и образование парниковых газов. С учетом появления современных подходов для изучения микробных сообществ, таких как метагеномика, протеомика и др., и тенденций развития биотехнологии, повышается роль генетических ресурсов, скрытых в вечной мерзлоте, и расширяются перспективы их использования. Помимо вопросов прикладного характера, разностороннее изучение древних отложений зоны вечной мерзлоты дает возможность ответить на важнейшие фундаментальные вопросы: как долго в мерзлоте может сохраняться жизнь; каков метаболический статус микроорганизмов, сохранивших свою жизнеспособность в условиях постоянных низких температур; идут ли биохимические реакции, направленные на репарацию ДНК; закрепляются ли генетически адаптивные процессы, которые способствуют сохранению клетками устойчивости к неблагоприятным факторам; насколько современные и мерзлотные палеомерзлотные микроорганизмы одной видовой принадлежности отличаются генетически. Другой спектр вопросов, связанный с изучением Вечной мерзлоты, включает: качественную и количественную оценку запасов законсервированного в мерзлоте органического вещества; скорость процессов его трансформации

в современных почвах зоны вечной мерзлоты; температурный мониторинг многолетнемерзлых пород; влияние подстилающих многолетнемерзлых пород на формирование современного ландшафта; оценка вклада эмиссии парниковых газов, сопряженных с деградацией мерзлоты. Третий блок научных исследований раскрывает астробиологические аспекты исследования: среди объектов, приуроченных к зонам распространения вечной мерзлоты, криопэги (засоленные грунты и линзы рассолов внутри мерзлых толщ морского происхождения), это единственные образования со свободной водой, характеризующиеся постоянными отрицательными температурами, высокой соленостью, воздействием фоновой ионизирующей радиации вмещающих пород и изолированностью от воздействия внешних факторов. Высказанное предположение о том, что криопэги – единственно возможный вид свободной воды в мерзлых толщах Марса – дает возможность использовать галофильно-психротрофное сообщество микроорганизмов криопэгов в качестве прототипа марсианской жизни, способного пролить свет как на проблемы возникновения, так и на изучение механизмов и адаптационных стратегий сохранения жизни на планетах криогенного типа.

Вечная мерзлота как экосистема

Вечная мерзлота – это осадочные отложения, находящиеся при температуре ниже 0 °С в течение более двух лет. Вечномерзлые отложения занимают около 20% территории Земли, что дает безусловное право считать Землю планетой криогенного типа, как и все другие планеты Солнечной системы, за исключением Меркурия и Венеры.

Исходя из определения, главным показателем, на основании которого отложения могут быть отнесены к вечномерзлым, является отрицательная температура и время пребывания пород в этих условиях. В многолетнемерзлых отложениях, твердая фаза (лед) составляет 93–98% всей воды, свободная вода отсутствует, но может присутствовать так называемая незамерзшая вода, доля которой составляет 1,5–7%. Количество и толщина пленок незамерзшей воды зависит от температуры и гранулометрического состава пород. По мнению исследователей, именно тонкие пленки незамерзшей воды, обволакивающие минеральные и органические частицы, предохраняют микробные клетки от механического разрушения кристаллами льда, делают возможным транспортировку (отвод) конечных продуктов метаболизма, защищая микробные клетки от биохимической смерти, а также создают условия для реализации метаболических реакций, поддерживающих жизнеспособность микроорганизмов на протяжении геологически значимого времени, от нескольких тысяч до миллионов лет. Таким образом, незамерзшая вода является основной экологической нишей для микроорганизмов. Вместе с тем маловероятно, что в этих пленках, толщина которых не превышает нескольких нанометров (рис. 29) и существенно меньше размера микробной клетки, возможно деление бактериальных клеток, то есть размножение (Gilichinsky, Rivkina,

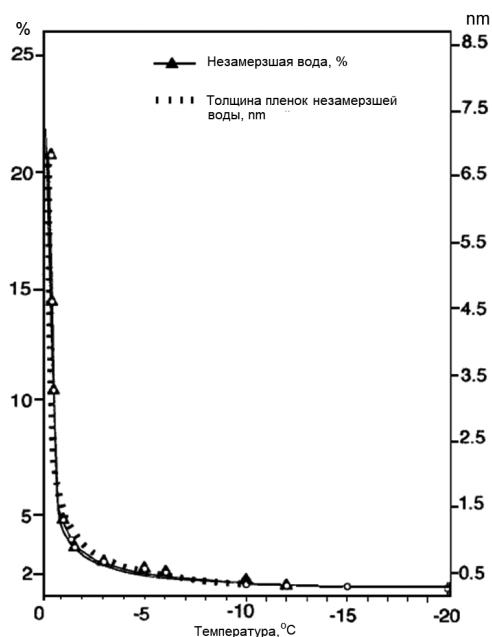


Рис. 29. Количество незамерзшей воды, определенное экспериментально, и рассчитанная толщина пленок незамерзшей воды в многолетнемерзлых породах (Anderson, 1967).

2011). Количество незамерзшей воды и толщина пленок не зависит от льдистости, но зависит от температуры вечномерзлых отложений и уменьшается с ее понижением.

В мерзлых отложениях морского происхождения встречаются переохлажденные линзы свободной воды – криопэги, с минерализацией до 250 г/л. Эти уникальные образования характеризуются постоянно отрицательными температурами, высокой соленостью и изолированностью от воздействия внешних факторов.

Агрегатное состояние воды чрезвычайно важно для характеристики условий существования микроорганизмов, так как именно доступность воды предопределяет потенциальную возможность деления клеток. Это дает основание считать, что в мерзлых отложениях, в которых вода присутствует только в виде льда и пленок незамерзшей воды, микробные клетки не могли делиться с момента промерзания толщи, и в этом случае можно считать, что возраст микроорганизмов равен возрасту промерзания. В случае криопэгов, где присутствует свободная вода, исключить деление клеток нельзя, поэтому, в общем случае, микроорганизмы из переохлажденных рассолов могут оказаться моложе самих криопэгов.

Важным для астробиологии объектом являются также замерзшие вулканические отложения. Практически все продукты извержения, например, на Камчатке, находящиеся выше отметки в 1 000 м, представляют собой

многолетнемерзлые породы. В приполярных территориях высотная граница мерзлоты вулканов расположена значительно ниже.

Поскольку на планетах криогенного типа, таких как Марс, согласно современным данным, возможно существование вечной мерзлоты под поверхностным слоем марсианской породы, то можно предположить, что именно там сохранились следы древних экосистем, а вечная мерзлота Земли может быть модельным объектом для астробиологии и выбора перспективных районов для поисков жизни на других планетах криогенного типа.

Криосфера

Земная криосфера состоит из двух частей: гляциосферы (снег и лед) и криолитосферы, которая включает в себя многолетнемерзлые отложения и сезонномерзлые горизонты, содержащие соответственно древние и современные жизнеспособные микроорганизмы. В состав криолитосферы, помимо снега, льда и мерзлых пород, входят еще переохлажденные насыщенные водой облака. Таким образом, криолитосфера занимает огромное пространство от верхних слоев атмосферы до подошвы антарктического ледяного щита и представляет собой уникальную часть биосферы.

Сравнения численности микроорганизмов, сохранивших жизнеспособность на протяжении геологического времени при температуре выше 0 °С в галите и янтаре, и при температуре ниже 0 °С в криосфере, показало, что криосфера характеризуется большим количеством и большим разнообразием жизнеспособных микроорганизмов.

Гляциосфера

Биота гренландского ледяного щита возраста 120 тыс. лет и антарктического щита возраста 400 тыс. лет широко изучена до глубины более 3 км. Возраст самого древнего льда, а также возраст находящихся в них бактерий в настоящее время вызывает дискуссии. На сегодняшний день наиболее древние льды – это ледяная шапка Гулия (Gulia) на Тибетском плато возраста более 500 тыс. лет, подошва антарктического щита в районе озера Восток – 2 млн лет, и лед с прослоями пепла в долине Бикона (Антарктида) – 8,1 млн лет.

Микроорганизмы и другие следы жизни во льду рассматриваются как репрезентативная модель внеземных экосистем, подобных покрытому льдом спутнику Юпитера – Европе, или ледяному спутнику Сатурна – Энцеладу. Обычно численность микроорганизмов в снеге и сезонном ледяном покрове не превышает 10^2 кл/г (количество микробных клеток в грамме породы или почвы естественной влажности). Такая же численность жизнеспособных микроорганизмов наблюдается в кернах из древних ледяных щитов. Основным путем проникновения этих микроорганизмов является ветровой перенос.

В микробной популяции льда доминируют клетки размером менее 3 мкм и численность микробных клеток резко возрастает с увеличением запыленности льда.

Местообитанием микроорганизмов в этой экосистеме являются узкие прожилки жидкой воды внутри льда, а также прослойки, содержащие значительное количество минерального материала и, соответственно, пленки незамерзшей воды, окружающие минеральные частицы. Количество микробных клеток вдоль скважины на озере Восток (Антарктида) уменьшается с увеличением возраста льда.

В Гренландском льду хорошо сохраняется относительно молодая (2–4 тыс. лет) геномная ДНК, а также вирусы бактерий и растений возраста 0,5–100 тыс. лет. Вирусы демонстрируют устойчивость к длительному пребыванию во льду. К сожалению, это касается и вирусов человека. Было показано, что в Арктике РНК гриппа А сохраняется в высокой концентрации в сезонном озерном льду.

В обзоре «Биосфера льда» (Prisco, Christner, 2004), а также в монографии «Жизнь в древнем льду» (Castello, Rogers, 2005) широко представлены данные, связанные с микробной заселенностью современных и древних льдов.

Криолитосфера

Наиболее заселенной частью криосферы является криолитосфера или вечная мерзлота, распространенная на четвертой части земной суши.

Вечная мерзлота является составной частью Арктики, это – северная часть Северной Америки и Евразии и свободные ото льда районы Антарктиды и Гренландии. Альпийская мерзлота широко распространена в высоких горах на всех континентах. Существует также прибрежная (шельфовая) мерзлота, распространенная в Северном Ледовитом океане и вокруг Антарктиды.

В многолетнемерзлых отложениях, мощность которых достигает нескольких сотен метров, микробные клетки – представители различных групп, адсорбированы на органических и минеральных частицах. Общая численность микроорганизмов достигает нескольких сотен миллионов кл/г.

Температурный диапазон мерзлых отложений, в которых были обнаружены жизнеспособные микроорганизмы, весьма широк: от отложений с постоянной температурой $-1/-2$ °С около южной границы мерзлоты в Сибири и в некоторых свободных ото льда оазисах антарктического побережья (район ст. Беллинсгаузен), до самой низкой температуры, $-18/-20$ °С, на острове Элсмир, Канада (80° с. ш.) и в сухих долинах Антарктиды (78° ю. ш.).

Жизнеспособные микроорганизмы обнаружены в мерзлых толщах на глубине 400 м в дельте р. Макензи, Канада, и высоте 4 700 м на Тибетском нагорье. Возраст изолированных клеток при этом соответствует длительности пребывания осадочных отложений в мерзлом состоянии, которая, в свою очередь, варьирует от нескольких тысяч до 2–3 млн лет на северо-

востоке Сибири, и до 5–8 млн лет в Антарктиде. Жизнеспособные микроорганизмы – это огромная масса живого материала, которая является исключительной особенностью вечномерзлых отложений и, принимая во внимание мощность криолитосферы (50–1 000 м), можно заключить, что в вечной мерзлоте содержится во много раз больше адаптированных к низким температурам микроорганизмов, чем в современных почвах. Источником микроорганизмов в многолетнемерзлых отложениях является почвенный покров или холодные водные экосистемы, а в ледяных отложениях – атмосферный перенос.

Общая численность микроорганизмов, определенная методом эпифлюоресцентной микроскопии, составляет в сибирской и канадской арктической мерзлоте 10^7 – 10^8 кл/г. В мерзлоте Сухих долин Антарктиды по сравнению с Арктикой общая численность микробных клеток на два порядка ниже – 10^5 – 10^6 (Gilichinsky et al., 2007).

В антарктической мерзлоте по сравнению с арктической также наблюдается заметно меньшая численность и разнообразие жизнеспособных микроорганизмов, выросших на питательных средах. Микробиологический анализ образцов из различных регионов показал, что доля жизнеспособных бактерий в вечномерзлых отложениях составляет 10^3 – 10^6 кл/г (0,01–1,5% от общей численности микроорганизмов, определенных методом флюоресцентной микроскопии). Стоит заметить, что адаптированные к холоду микроорганизмы из вечномерзлых отложений показывают оптимальный рост при комнатной температуре, то есть, большинство из них не являются психрофилами, а представляют собой, преимущественно, психротрофов.

Разнообразие организмов вечной мерзлоты

Вечная мерзлота, включая криопэги, представляет собой хранилище разнообразных бактерий: аэробных, анаэробных, спорообразующих и неспорообразующих, грамположительных и грамотрицательных (рис. 30, 31). Во многих отложениях, в основном озерного и морского происхождения, присутствуют жизнеспособные метанобразующие археи (рис. 32). Из вечномерзлых отложений выделены и описаны фотосинтезирующие микроорганизмы: цианобактерии (рис. 33,а-г) и одноклеточные зеленые водоросли (рис. 33,д-з). Там обнаружены дрожжи (рис. 33,и-м), актино- и микромицеты, а также продукты метаболизма: внутри- и внеклеточные ферменты (инвертаза, каталаза, протеаза и амилаза), пигменты (хлорофилл а и б, феофитин) и биогенный метан. Помимо этого, в вечномерзлых отложениях обнаружены семена растений. Из некоторых удалось получить живое растение *Silene stenophylla* (рис. 34). Из вечной мерзлоты были выделены протисты: амёбы, инфузории и флагеллаты (рис. 35). В последние два года в вечной мерзлоте Арктики обнаружены гигантские вирусы – паразиты акантамеб, *Pythovirus sibericum* (рис. 36) и *Mollivirus sibericum* (рис. 37), представляющие собой абсолютно новые, ранее не известные классы гигантских вирусов.

С точки зрения астробиологии, важным результатом является то, что из вечномерзлых отложений Колымской низменности была выделена бактерия, растущая в условиях, приближенных к марсианским (Nicholson et al., 2013). Этот микроорганизм, определенный как новый подвида рода *Carnobacterium* и получивший название *Carnobacterium inhibens* subsp. *gilichinskyi*, в отличие от других изолятов, показал оптимальный рост в атмосфере CO_2 при давлении 2 мбар и температуре 0°C (рис. 38).

Вечная мерзлота может рассматриваться в качестве природного подземного хранилища, в котором в течение длительного времени существуют постоянные физико-химические и температурные условия. Именно постоянство этих характеристик позволяет нам рассматривать условия, существующие в вечной мерзлоте, не как экстремальные, а скорее, как стабильные. При отрицательных температурах скорость биохимических реакций и биологических процессов становится низкой, что обеспечивает сохранность биологических объектов.

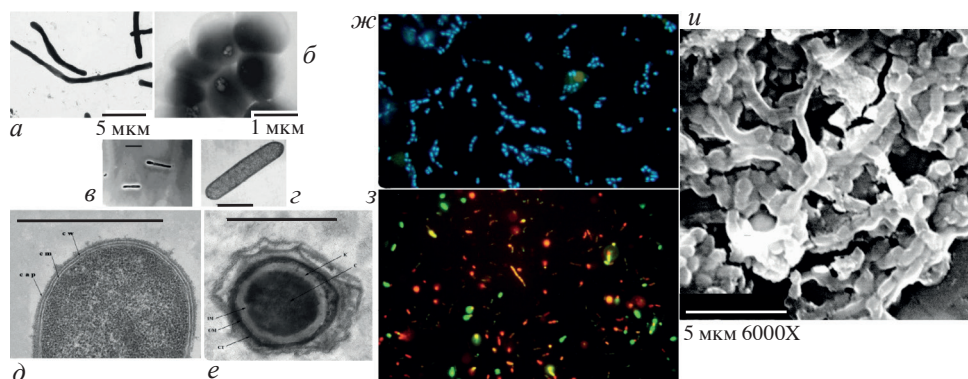


Рис. 30. Бактерии из вечной мерзлоты Арктики. *a-b* – психротолерантная бактерия *Exiguobacterium sibiricum*, выделенная из многолетнемерзлых отложений Колымской низменности и растущая при 0°C (Rodrigues et al., 2006): *a* – негативно окрашенные клетки, *b* – внутри клетки видны гранулы; *v-e* – анаэробная психротолерантная спорообразующая бактерия *Clostridium tagluense* sp. из вечномерзлых отложений Канады: *v* – фазовый контраст, шкала 10 мкм (*Suetin et al., 2009*); *z-d* – ультратонкие срезы активно растущих клеток шкала 1 мкм, *e* – ультратонкие срезы споры, шкала 1 мкм, *sw* – клеточная стенка, *cm* – цитоплазматическая мембрана, *cap* – капсула, *C* – ядро, *K* – кортекс, *IM* – внутренняя мембрана, *OM* – внешняя мембрана, *ST* – оболочка споры; *ж-и* – факультативно анаэробная психротолерантная спорообразующая бактерия *Carnobacterium pleistocenium* sp., изолированная из туннеля Фокс (Fox) в многолетнемерзлых породах, Аляска (*Pikuta et al., 2005*): *ж* – DAPI – окрашенные клетки, *з* – клетки, окрашенные красителями Live/Dead, *и* – электронные фотографии, полученные с помощью эмиссионно-сканирующего микроскопа Hitachi S-4000, шкала 5 мкм.

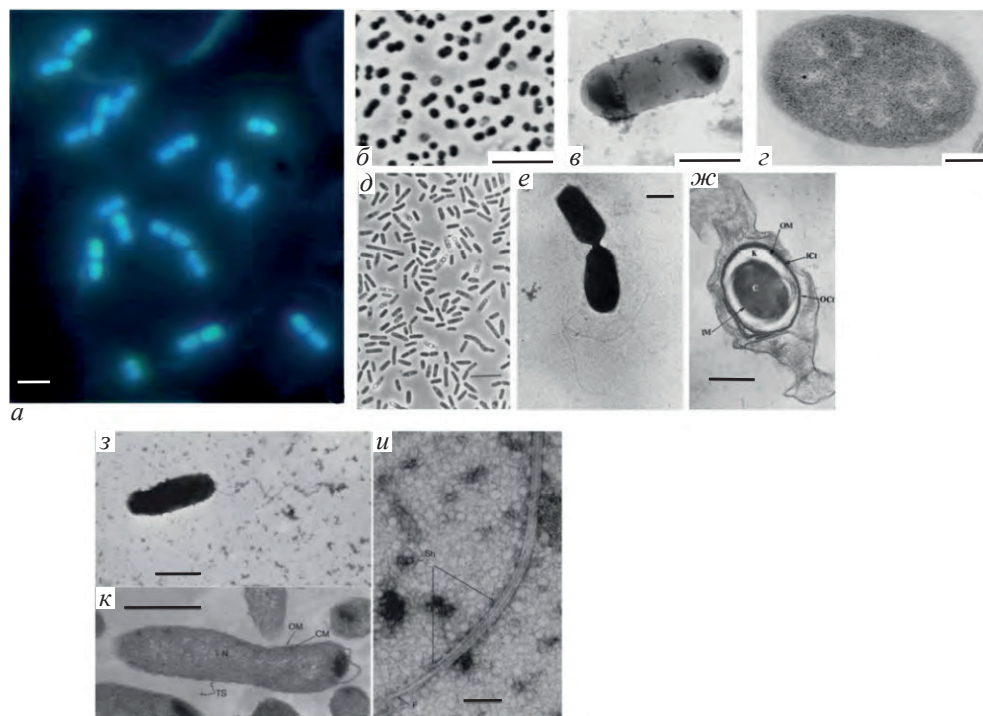


Рис. 31. Бактерии из криопэгов. *a* – психротолерантная бактерия *Psychrobacter cryohalolentis*, выделенная из Колымского криопэга, эпифлуоресцентная микроскопия, краситель, шкала 1 мкм (Bakermans et al., 2006); *б–г* – аэробная психротолерантная бактерия *Psychrobacter muricola* sp., выделенная из Колымского криопэга (Щербакова и др., 2009): *б* – фазовый контраст, шкала 5 мкм, *в* – негативное окрашивание, шкала 1 мкм, *г* – ультротонкие срезы, шкала 0.5 мкм; *д–ж* – анаэробная психрофильная спорообразующая бактерия, оптимально растущая при температуре 5–6 °C *Clostridium algariphilum* sp., выделенная из Колымского криопэга (Shcherbakova et al., 2005): *д* – фазовый контраст, шкала 10 мкм, *е* – негативно окрашенные клетки, шкала 1 мкм, *ж* – тонкие срезы споры, шкала 1 мкм; *з–к* – факультативно анаэробная психротолерантная бактерия *Celerinatantimonas yamalensis* sp., выделенная из Ямальского криопэга (Shcherbakova et al., 2013): *з* – негативное окрашивание, шкала 1 мкм, *и, к* – тонкие срезы. TS – табулярные структуры; OM – внешняя мембрана; N – нуклеоид; CM – цитоплазматическая мембрана; F – жгутик; Sh – оболочка, шкала 0.5 мкм.

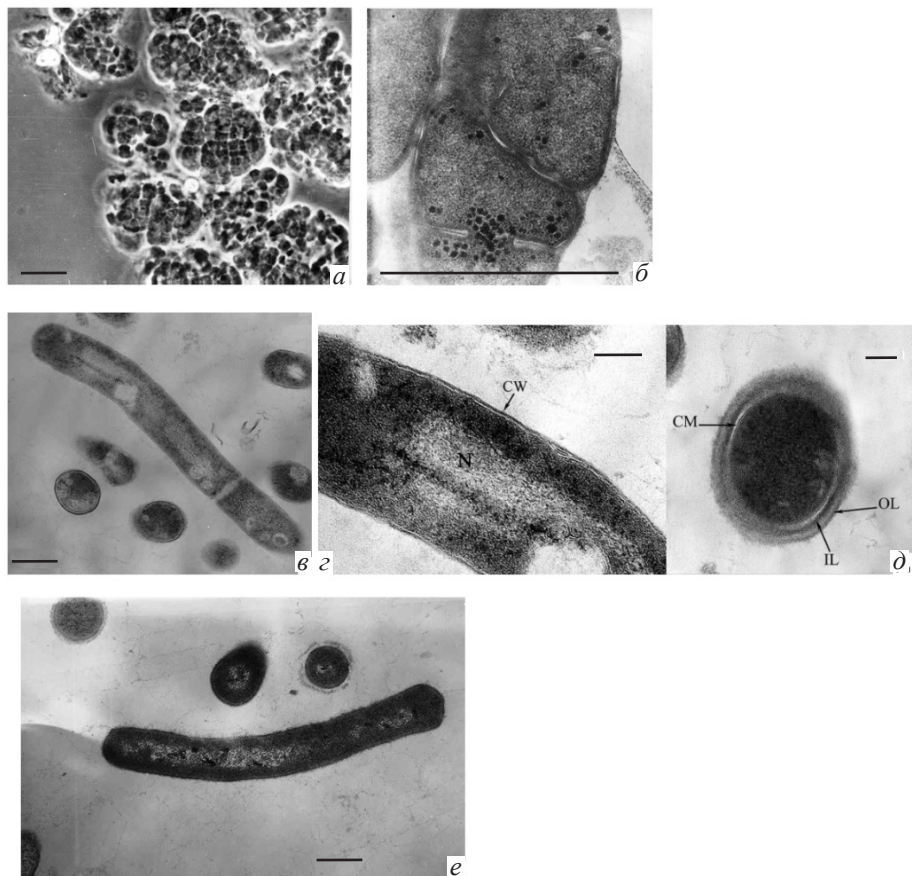


Рис. 32. Метанообразующие археи: *a, б* – *Methanosarcina*, изолированная из голоценовых многолетнемерзлых аласных отложений Колымской низменности (Rivkina et al., 2007): *a* – фазовый контраст, *б* – ультратонкие срезы (черные точки – включения полифосфатов), шкала 1 мкм; *в–д* – *Methanobacterium arcticum* sp., выделенная из Колымской мерзлоты голоценового возраста: тонкие срезы, *в–г* – показывающие палочковидные и *д* – цистоподобные клетки (Shcherbakova et al., 2011). CM – цитоплазматическая мембрана, CW – клеточная стенка, IL – внутренний слой клеточной N – нуклеоид; OL – внешний слой клеточной стенки, *в* – шкала 1 мкм, *г, д* – шкала 100 нм; *е* – *Methanobacterium veterum*, выделенная из отложений позднеплиоценового возраста (более 1 млн лет), Колымская низменность (Krivushin et al., 2010). Шкала 1 мкм.

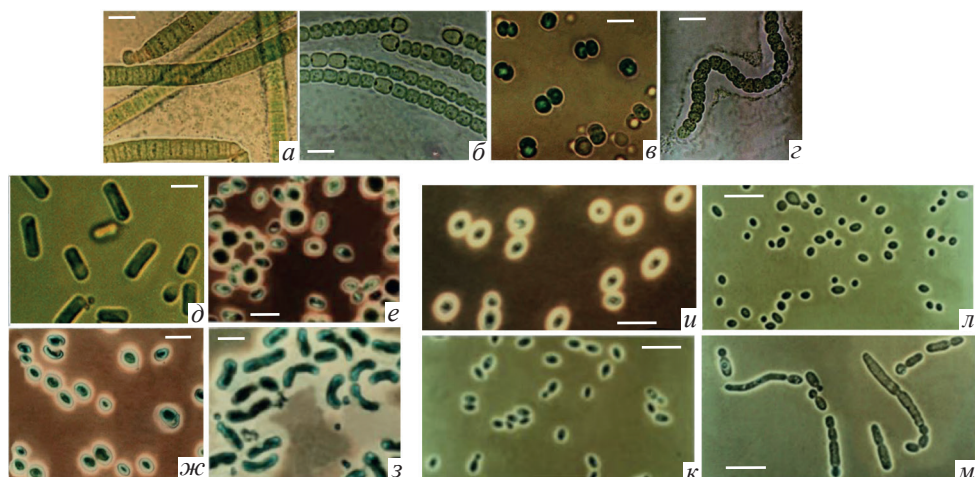


Рис. 33. Фотосинтезирующие микроорганизмы и дрожжи (Vishnivetskaya et al., 2020). *a–z* – цианобактерии из многолетнемерзлых отложений Антарктиды: *a* – *Oscillatoria* sp., *б* – *Anabaena* sp., *в* – *Chlorococcales* sp., *г* – *Nostoc* sp., шкала 40 мкм; *д–з* – одноклеточные зеленые водоросли из многолетних отложений Колымской низменности: *д* – *Stichococcus* sp., *е* – *Chlorella saccharophila*, *ж* – *Pseudococcomyxa*, *з* – *Chodatia tetrallantoidea*, шкала 40 мкм; *и–м* – дрожжи, выделенные из многолетнемерзлых отложений Колымской низменности: *и* – *Cryptococcus albidus*, рост при 4 °С; *к* – *Rhodotorula aurantiaca*, рост при 4 °С; *л* – *Cystofilobasidium infirmominiatum*, рост при 4 °С, *м* – *Cystofilobasidium infirmominiatum*, рост при –4 °С, шкала 40 мкм.

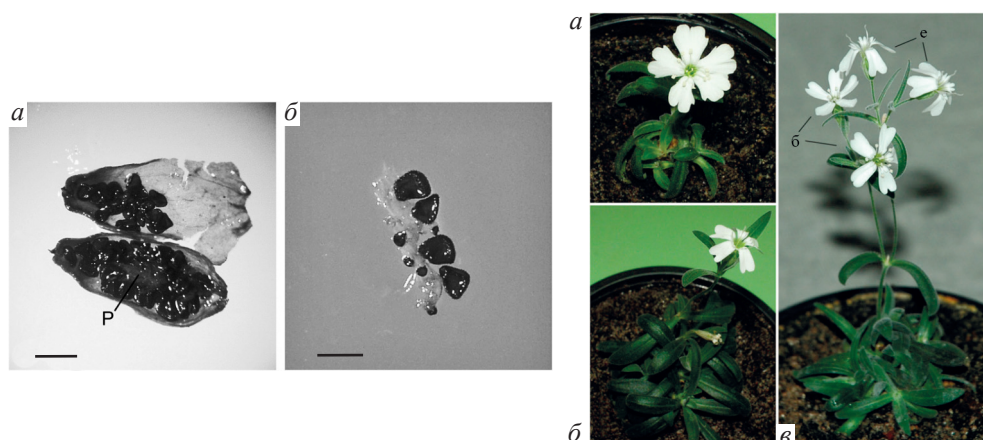


Рис. 34. *Silene stenophylla*: *a, б* – семена, обнаруженные в норе суслика, погребенной в вечной мерзлоте более 30 000 лет назад, *в, г* – растение, полученное из семян, шкала 1 мм (Yashina et al., 2012).

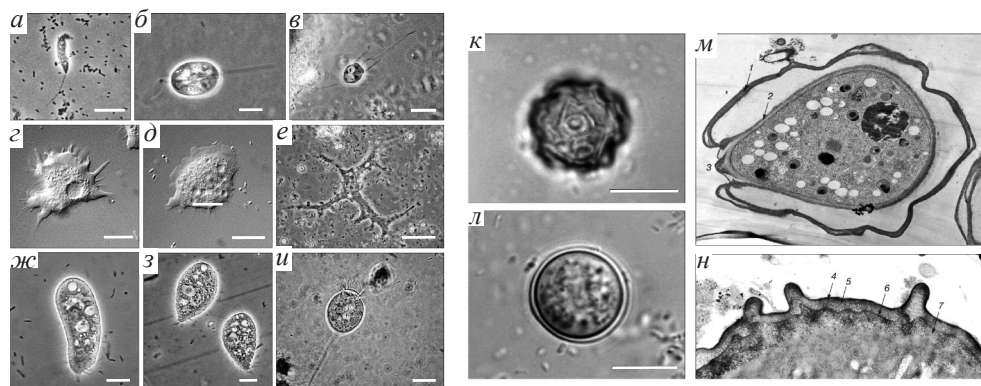


Рис. 35. Протисты, выделенные из многолетнемерзлых отложений (Шатилович и др., 2010): *a–в, е–и* – фазовый контраст; *z, d* – дифференциальный интерференционный контраст; *a–в* – жгутиконосцы; *z–е* – голые амёбы; *ж–и* – инфузории, шкала 10 мкм; *к–л* – цисты покоя протист; *к, л* – дифференциальный интерференционный контраст; *м, н* – трансмиссионная электронная микроскопия; *к, м* – *Acanthamoeba* sp.; *л, н* – *Colpoda inflata*; 1, 4 – эктоциста; 2, 6 – эндоциста; 3 – пора; 5 – мезоциста; 7 – гранулярный слой, шкала 10 мкм.

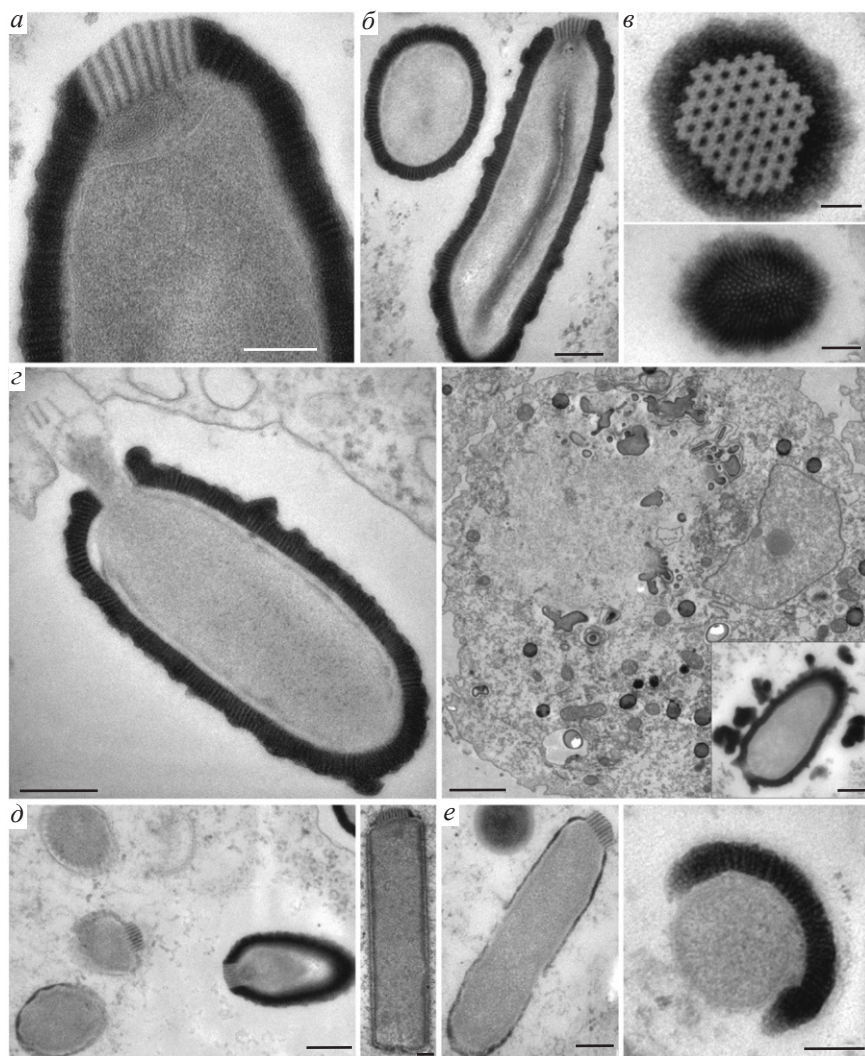


Рис. 36. Визуализация цикла репликации *Pithovirus sibericum* в *Acanthamoeba castellanii*. Электронная микроскопия: *a* – апекс частицы *Pithovirus sibericum*, выполненный из 15 нм разнесенных полос; *б* – две проекции частиц *Pithovirus sibericum* (поперечная и продольная секции); *в* – вид на апекс сверху, видна шестиугольная ячеистая структура; *г* – вид снизу; *д* – проникновение вирусной частицы в вакуоль *Acanthamoeba castellanii*; *е* – созревание вирионов на поздней стадии инфекции (Legendre et al., 2014).

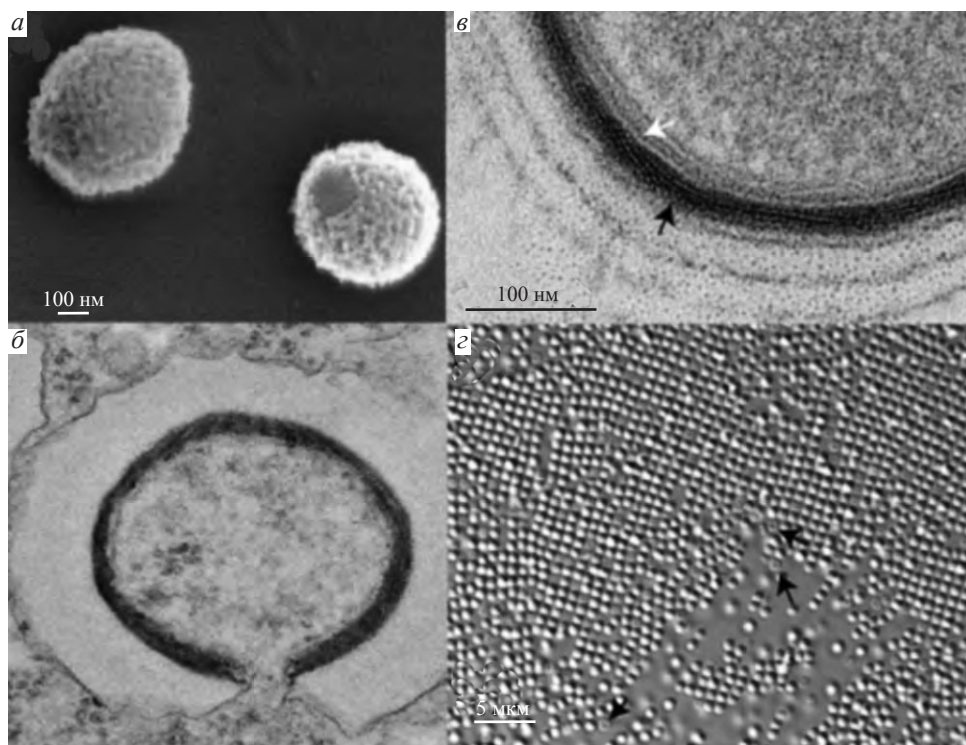


Рис. 37. Изображения вирусных частиц *Mollivirus sibericum*: *a* – сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), две отдельные частички, показана структура апекса; *б* – трансмиссионная электронная микроскопия (ТЭМ); ультратонкий срез открытой частицы после слияния ее внутренней липидной мембраны с мембраной фагосомы; *в* – увеличенный фрагмент тегумента вирусной частицы; черной стрелкой показан слой, состоящий из сетки фибрилл, а под ним внутренние мембраны (белая стрелка); *г* – световая микроскопия (DIC x 63), показаны частицы вируса, некоторые имеют углубление на вершине; показано стрелками (Legendre et al., 2015).

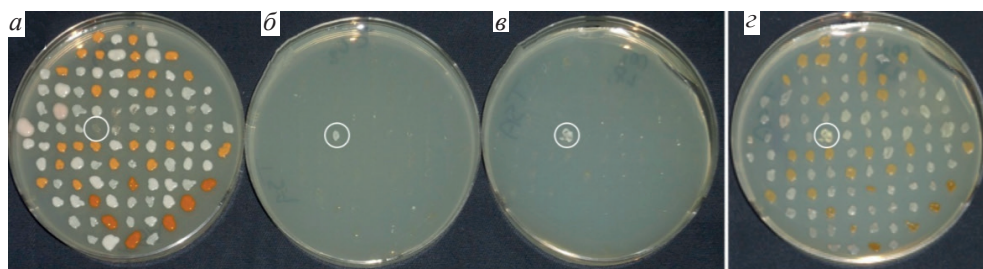


Рис. 38. Модельный марсианский эксперимент (Nicholson et al., 2013). Рост изолятов из мерзлоты Колымской низменности на среде TSBYS. Все изоляты инкубировались 30 суток при температуре 0 °С в следующих условиях: *a* – земная атмосфера и земное давление; *б* – атмосфера Марса (CO₂) и земное давление; *в* – атмосфера Марса (CO₂) и давление Марса (7 мбар); *г* – та же чашка Петри, что и в эксперименте *в*, после дополнительной инкубации при комнатной температуре, в атмосфере и давлении Земли. Микроорганизм, показавший рост в условиях Марса, был определен как *Carnobacterium inhibens* subsp. *gilichinskyi* (Nicholson et al., 2015).

Жизнь при отрицательных температурах

Сама по себе отрицательная температура не является лимитирующим фактором для роста микроорганизмов. В лабораторных условиях при культивировании их на питательных средах с добавлением глицерина в качестве криопротектора микроорганизмы способны делиться при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Условия с температурой $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соленостью 200 г/л характерны для линз криопэггов – переохлажденных водных рассолов в вечномерзлых отложениях, где метаболическая активность была показана в эксперименте с использованием резазурина в качестве индикатора микробного дыхания. Позже в лабораторных экспериментах наблюдалось включение D- ^{14}C -глюкозы в бактериальную биомассу криопэггов при $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, что также подтвердило способность микроорганизмов криопэггов к метаболическим реакциям при отрицательных температурах.

Большинство исследователей полагают, что около 20% микробного сообщества вечномерзлых отложений может размножаться при температурах от -2 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как 95% бактерий, выделенных из вечной мерзлоты, не растут вообще, или очень плохо растут при температурах выше $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выживание биоты в мерзлых и переохлажденных соленых экосистемах кайнозойского возраста, а также в пермско-триасовых соляных залежах – пример уникальной адаптации бактерий. Исследователям важно было понять, связана ли устойчивость этих клеток к соли с их толерантностью к низким температурам. Эксперименты показали, что при отрицательных температурах галофильные (солелюбивые) бактерии выживают лучше, чем негалофильные, и способны сохранять жизнеспособность при температуре $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ в присутствии 25% NaCl.

Вечная мерзлота – это, в основном, психро-галотолерантное микробное сообщество, которое может быть описано как сообщество выживших, для которых пребывание в «голодных» условиях является нормальным физиологическим состоянием. Можно заключить, что микробное сообщество вечной мерзлоты представляет собой только «избранных» представителей, которые смогли адаптироваться к условиям, существующим в этих отложениях, и имеющих эффективный аппарат репарации, что позволил ему, в отличие, например, от многих микроорганизмов современных тундровых почв, сохранить жизнеспособность в вечной мерзлоте.

Возможно, поэтому бактерии, обнаруженные в вечномерзлых отложениях, встречаются и в арктических тундровых почвах, в то время как многие типы бактерий, выделенные из современных арктических почв, не были встречены в вечномерзлых отложениях.

Сохранение жизнеспособности микроорганизмами при отрицательных температурах в течение геологического времени позволяет предположить возможность метаболических реакций в вечномерзлых отложениях.

Некоторые факты косвенно подтверждают, что древние микроорганизмы могут участвовать в осуществлении биогеохимических реакций

в условиях отрицательных температур и дефицита питательных веществ *in situ*: способность иммобилизованных ферментов из вечной мерзлоты быстро активироваться; присутствие метастабильных сульфидов железа и способность расти на питательных средах после воздействия фоновой радиации в течение миллионов лет. Выживаемость микроорганизмов в мерзлоте предполагает возможность репарации ДНК, т. е. существование механизма репарации, сопоставимого по скорости с процессом накопления повреждений в геноме. Процесс адаптации к условиям вечной мерзлоты подразумевает реализацию некоторых процессов, таких как синтез холодаадаптированных белков и метаболические реакции при отрицательных температурах. Исследования показали, что антарктические лишайники могут быть метаболически активными при $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, были получены доказательства новообразования ДНК и белков при температуре от -12 до $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, что говорит о возможности деления клеток в снежном покрове Южного полюса. В экспериментах с радиоактивно меченым субстратом было показано, что древние микроорганизмы в вечномерзлых отложениях возраста от 600 тыс. до 1 млн лет не находятся в состоянии абсолютного покоя. Включение меченого углерода из $\text{CH}_3^{14}\text{CO}_2^-$ в бактериальные липиды при температурах до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ показало, что в древних вечномерзлых породах возможен анаболический метаболизм. Используя ^{14}C меченые субстраты: бикарбонат, $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$; и ацетат, $^{14}\text{CH}_3\text{CO}_2^-$, было продемонстрировано, что идет процесс метанобразования, осуществляемый естественной популяцией метанобразующих архей вечномерзлых отложений позднелиценевого и голоценевого возраста при температурах до $-16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (минимальная температура мерзлоты в Арктике), и даже до $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура мерзлоты Антарктиды в районе долины Бикон), доказывающий способность микроорганизмов к энергетическому метаболизму – осуществлению окислительно-восстановительных реакций после длительного пребывания в вечной мерзлоте (Gilichinsky et al., 2007).

С биологической точки зрения доза, получаемая в результате естественной радиации, 1–2 миллигрей (mGy) в год, источником которой являются минералы, рассеянные в мерзлых породах Арктики, не достаточна для полной стерилизации микробных комплексов. Вместе с тем, фоновое излучение, не являясь фатальным, способно привести к селекции и вызвать значительное повреждение ДНК древних клеток. Однако сам факт роста микроорганизмов из вечномерзлых пород на питательных средах подразумевает их способность к репарации ДНК, то есть позволяет считать, что скорость разрушения ДНК в мерзлоте ниже скорости ее репарации. Используя молекулярно-биологические подходы и непосредственное измерение продукции CO_2 в вечномерзлых отложениях, исследователи нашли доказательства тому, что сохранение жизнеспособности в течение длительного времени тесно связано с метаболической активностью и репарацией ДНК как механизмами поддержания этой жизнеспособности.

Анализ полных геномов микроорганизмов, выделенных из вечной мерзлоты, выявил в них гены, ответственные за продукцию липолитических

ферментов. Дальнейшие исследования позволили получить и проанализировать полученные белки. Было показано, что как эстеразы, так и липазы, продуцируемые психротолерантной бактерией *Psychrobacter cryohalolentis*, выделенной из Колымского криопэга, обладают активностью и стабильностью в широком диапазоне температур 0–35 °С, причем для эстеразы уровень относительной активности, 85–90%, остается практически одинаковым в интервале 30–0 °С.

В последние 15 лет микробное сообщество различных биотопов начали оценивать с использованием современных молекулярных методов: ПЦР амплификация 16S rРНК генов природных бактерий и архей, 18S rRNA генов эукариот и метагеномики.

Полимеразная цепная реакция (ПЦР) позволяет добиться значительного увеличения малых концентраций определенных фрагментов нуклеиновой кислоты (ДНК или РНК) в биологическом материале, что необходимо для дальнейших исследований.

Факт длительного сохранения бактериальных, архейных и грибных ДНК был отмечен в относительно молодых отложениях позднплейстоценового и голоценового возраста в вечномерзлых отложениях Канадской Арктики и Тибетского плато, а также в более древних отложениях поздеплиоценового и раннеплейстоценового возраста Сибири.

Исследования показывают, что в большинстве экосистем ДНК обычно разрушается довольно быстро. На сегодняшний день самая древняя ДНК была выделена из вечномерзлых отложений возраста около 1 млн лет. Однако этот предел не является до конца установленным, и исследования, направленные на выделение и анализ тотальной ДНК из более древних мерзлых отложений, необходимо, безусловно, продолжать, потому что ответ на этот вопрос позволяет трезво оценивать возможность поисков ДНК микробных клеток в мерзлоте Марса.

Следует заметить, что одной из слабых сторон вечной мерзлоты Земли, как модели для астробиологии, является несопоставимость возраста вечной мерзлоты Земли с возрастом мерзлоты на других планетах криогенного типа. Как известно, самая древняя мерзлота на Земле, в лучшем случае, нескольких десятков миллионов лет (Сухие долины Антарктиды), тогда как возраст мерзлоты Марса составляет миллиарды лет. Для того, чтобы как-то разрешить эту проблему, следует попытаться найти самую древнюю мерзлоту на Земле и самую молодую на Марсе. На Земле таким объектом являются Сухие долины Антарктиды. Анализ снимков, полученных с камер наблюдений за поверхностью Марса (DTM provided by Mars Express High Resolution Stereo Camera, HRSC) позволил предположить, что наиболее молодую мерзлоту на Марсе надо искать в районе его Северного полюса, где, вероятно, находятся относительно молодые вулканы и продукты их извержения, возраст которых может быть сопоставим с возрастом мерзлоты Земли (Gilichinsky et al., 2015). Было показано, что термофильные микроорганизмы, связанные

с деятельностью вулканов, сохраняют жизнеспособность в вечной мерзлоте. Из многолетнемерзлых отложений антарктического острова Десеппен (Deception island) были изолированы бактерии, принадлежащие роду *Geobacillus*, с оптимальной температурой роста 62–65 °С. Это дает нам надежду на возможность находок следов жизни и в мерзлых вулканических отложениях Марса.

В обзоре «Earth's perennially frozen environments as a model of cryogenic planet ecosystems» (Rivkina et al., 2018) обобщены последние результаты исследований жизнеспособной биоты многолетнемерзлых отложений Земли. Самые последние сведения о фотосинтетических микроорганизмах, сохранивших жизнеспособность в вечной мерзлоте, приведены в обзоре «Insights into community of photosynthetic microorganisms from permafrost» (Vishnivetskaya et al., 2020).

Выводы

Вечномерзлые породы кайнозоя – это экосистемы, не испытывавшие на себе воздействия антропогенных факторов, а микробные клетки, сохранившие жизнеспособность, их гены и продукты жизнедеятельности являются свидетелями былых эпох. Микробиологические и молекулярные исследования палеобиологических объектов в вечномерзлых отложениях расширяют наши знания о пространственно-временной границе Биосферы и создают новое направление в четвертичной геологии, геокриологии, бактериальной палеонтологии и экзобиологии. Возможно, в будущем генетические ресурсы могут оказаться более важными природными компонентами, чем геологические, а микроорганизмы вечномерзлых отложений, так же как их метаболиты, белки и ферменты, могут оказаться уникальным, еще мало изученным ресурсом для биотехнологии. Помимо этого, сам факт сохранения жизнеспособных микроорганизмов в вечной мерзлоте, способность их к метаболическим реакциям при отрицательных температурах и продукции хладоактивных ферментов, делает вечную мерзлоту Земли одной из немногих природных моделей для экзобиологии.

2.5. Ископаемые почвы геологического прошлого Земли как аналоги солоидов внеземных объектов

Ископаемые почвы разного возраста широко наблюдаются на Земле, и современные исследования предполагают, что сходные с палеопочвами объекты могут сохраняться в геологической летописи других планет. В ряде современных публикаций поверхностные рыхлые субстраты на Луне и Марсе называются «почвами». Почвоподобные тела Марса близки к Земным прошлых геологических эпох, прежде всего геохимически, и предполагается, что для их изучения возможно применение методов палеопочвоведения, что, вероятно, позволит заглянуть далеко в прошлое Марса. Для внеземных

почвоподобных тел на данный момент не существует единого общепризнанного термина. В научной литературе кроме термина палеопочвы встречается также определение «астросоли» и «планетарные солоиды» (*extraterrestrial soloids*). Внеземные «почвоподобные тела» следует рассматривать как абиотические почвы. Отечественные почвоведы во главе с В.А. Таргульяном образования такого типа относят к инситным почвоподобным телам – солоидам (Таргульян и др., 2017).

Последнее десятилетие получило развитие научное направление «астропедология», направленное на изучение древних палеопочв и метеоритов, имеющих отношение к происхождению жизни и различным планетарным почвенным системам (Retallack, 2016). Изучение палеопочв позволяет развить и детализировать наши представления об эволюции биосферы Земли, а также использовать полученные результаты для исследования внеземных объектов. При этом, применение теории почвообразующих факторов В.В. Докучаева для изучения реголитов других планет является предметом дискуссий, прежде всего ввиду того, что все больше внимания уделяется абиотическим путям почвообразования на планетах, отличных от Земли. Современное понимание абиотического почвообразования включает субэральные низкотемпературные взаимодействия вода–порода (гидролиз), явления физико-химического выветривания, выщелачивания слоистых осадочных пород в субэральных условиях и фотохимическое образование почвенных минералов, все из которых были обнаружены на Марсе (Retallack, 2014 и др.).

Палеопочвы – древние почвы, которые включены в геологическую летопись и формируют палеопочвенные архивы, сохраняющие физическую, биологическую и химическую информацию о прошлых эпохах. Палеопочвы – это геологическая запись состава атмосферы, климата, рельефа и организмов на Земле, присутствовавших до захоронения в почве. Биогеохимическая информация, заключенная в палеопочвах, позволяет воспроизвести практически непрерывную картину эволюции ландшафтной оболочки Земли.

Современные исследования палеопочв позволили ввести полуколичественные и количественные показатели для экологических и хронометрических палеореконструкций, которые дают представление о крупных региональных и глобальных изменениях температуры, атмосферных осадков и атмосферного CO₂ Земли. (Alekseeva et al., 2007; Alekseev et al., 2018; Алексеев и др., 2019; Алексеева, 2020а; Alekseev et al., 2023; Retallack, 2001, 2022; Sheldon, Tabor, 2009; Tabor, Myers, 2015; Dzombak, Sheldon, 2022). Палеопочвы являются важным компонентом стратиграфической летописи и все чаще используются в реконструкциях континентальных этапов развития Земли: палеоклимата и палеоэкосистем в целом.

Зарубежные исследователи современности сошлись во мнении, что древнейшие микробиальные палеопочвы и их абиотичные аналоги появились в архее (3.7 млрд лет назад). На Земле они описаны на территории Гренландии, Австралии, ЮАР. Вне Земли их аналоги обнаружены

на поверхности Марса (Retallack, 2014, 2018; Retallack et al., 2023; Retallack, Noffke, 2019).

Коры выветривания, демонстрирующие некоторые признаки почвенного строения, распознаются, начиная с архея (Retallack, 2001). Предполагается, что древние протопочвы возникли уже на самых первых этапах взаимодействия микроорганизмов с породой (~3,7 млрд л. н.). Колонизация суши сосудистыми растениями в позднем силуре (около 420 млн лет) дает начало почвам как среде обитания высших растений (Wellman et al., 2023). В девоне распространение получают корнеобитаемые почвы (Retallack, 2022). За последние годы существенно изменились представления о распространении первых экосистем на суше (Stüeken et al., 2012; Beraldi-Campesi, 2013; Wellman, Strother, 2015; Lenton, Daines, 2017). Появились данные о микробных матах на терригенных осадках возрастом старше 3,2 млрд лет (Homann et al., 2018), что приближается к общепринятым оценкам самой ранней микробной активности в аквальных обстановках. Парадигма «докембрийских» палеонаук аккуратно трансформируется: от «зарождения жизни в океане» до «синхронного развития биоты на суше и в океане». Методология развивающейся в последнее десятилетие концепции почвообразования в экстремальных условиях (Горячкин и др., 2019) дает возможность поиска ближайших современных аналогов протопочв различных геологических периодов (Mitchell et al., 2021) и сопоставлять их с обнаруженными ископаемыми вариантами (Alekseeva et al., 2021a, b). К вероятным аналогам самых древних первичных почв могут быть отнесены подповерхностные протопочвы или криптопочвы: эндолитные и гиполитные разности (Mergelov et al., 2018). Также мы можем рассматривать вариант амфибиальных протопочв прибрежных мелководий с субаквально-субаэральным режимом (амфибиальные) ландшафты по Г.А. Заварзину (2010, 2011). Еще одним вариантом протопочв являются криокониты (пылевые включения на поверхности ледников) (Cook et al., 2016).

При том, что ископаемые почвы четвертичного периода широко изучаются, системное изучение дочетвертичных палеопочв – сравнительно молодое направление в почвоведении. У истоков отечественных исследований дочетвертичных палеопочв стоял В.И. Чалышев (1978). Сведения о находках дочетвертичных палеопочв на территории России и Земли в целом сравнительно редки, и каждая такая находка представляет несомненный научный интерес. Сведения об этих находках фрагментарны, отсутствуют карты почвенного покрова древних континентов.

Сравнительно недавно после длительного перерыва были возобновлены исследования древних ископаемых почв отечественными учеными (Шумилов, Мингалев, 2009). Исследования палеозойских палеопочв на территории Русской равнины позволили провести реконструкции палеоландшафтов и растительности, количественные реконструкции палеоклимата в среднем и позднем девоне и карбоне для данной территории (см. Приложение, рис. I) (Алексеева, 2020а, б; Alekseeva et al., 2016а, б; Alekseev et al., 2018). Были обобщены литературные сведения по находкам палеопочв девонского

и каменноугольного возрастов на территории современных Европы и Северной Америки, по которым были впервые составлены палеопочвенные карты-схемы (Алексеева, 2020б).

Недавно в рамках этих исследований в деталях были изучены палеопочвы среднего девона, сформированные на породах доэйфельского D2 возраста (>390 млн лет?): коре выветривания железистых кварцитов (район КМА) и риолитовом туфе (Павловский ГОК) (см. Приложение, рис. II) (Alekseeva et al., 2021a; Alekseeva et al., 2023). По своим аналитическим характеристикам эти палеопочвы представляют собой аналоги современных кислых сульфатных почв. Кислые сульфатные почвы формируются на отложениях, содержащих пирит. На воздухе пирит окисляется с формированием серной кислоты, что вызывает снижение величины pH почвы до 4 и менее единиц. Продуктами окисления пирита являются гипс, различные Fe-сульфаты (ярозит и др.), а также оксиды/гидроксиды Fe (Красильников и др., 1995). Ввиду разнообразия источников пирита (как природных, так и антропогенных) кислые сульфатные почвы распространены на всех континентах Земли и относятся к группе азональных. Их вклад в почвенный покров нашей планеты составляет около 1%. Палеопочвы этого типа – одни из первых, появившихся на Земле. Самые древние содержащие сульфаты палеопочвы – архейские – были баритовыми, в фанерозое преобладающим конечным продуктом окисления пирита становится гипс (Retallack, 2022). Изучение состава образцов марсианских грунтов выявило, что характерным химическим элементом поверхности Марса является сера. Марсианские породы сцементированы сульфатами Mg, Ca, Na и Fe и оксидами железа (гематит, гетит, ферригидрит, акагенеит). Такая ассоциация минералов дала основание полагать, что сульфатнокислые палеопочвы были распространены и за пределами Земли. На Марсе содержащие гипс палеопочвы имеют архейский возраст и отнесены к ариднему ряду (Retallack et al., 2023).

Обозначенные выше почвообразующие породы содержат включения пирита. В железистом кварците пирит является продуктом диагенетических преобразований додевонской коры выветривания. В риолите пирит замещает содержащиеся в нем включения углей. Электронно-микроскопическое изучение углей показало, что большинство из них принадлежит остаткам нематофитов (*Nematasketum* и *Prototaxites*). Относительно равномерная локализация углей по глубине, отсутствие сортировки по размеру свидетельствуют в пользу их аллохтонной природы. Обе изученные палеопочвы формировались под бескорневой литофитной растительностью. Массивные почвообразующие породы, наличие пирита, литофитная растительность позволяют охарактеризовать изученные палеопочвы как литоэкстремальные, биотичные и, скорее всего, инситные. Почвообразование осуществлялось преимущественно в ходе химического преобразования пород, когда роль триггера выполнял пирит и процессы его окисления. Отличительной особенностью палеопочвы на железистых кварцитах являются масштабные преобразования породы на глуби-

не ~15 см на фоне слабых преобразований кровли палеопочвы. Развитый матоподобный органогенный горизонт выполнял, прежде всего, протекторную роль и служил средой обитания микроорганизмов. Такие особенности ставят изучаемую палеопочву в один ряд с эпилитными и эндолитными системами современности, такими, например, как почвы Антарктиды (Mergelov et al., 2018, 2020). Палеопочва на риолите демонстрирует наличие следующих морфологических признаков почвообразования: иллювирирование глины и формирование кутан, языковатая подошва, новообразования в виде Fe-гипсовых нодулей. В ней формируются каолинит, гипс, гетит, Fe-сульфаты (ярозит и вольтаит). Для кровли палеопочвы характерны рост содержания Al_2O_3 , Fe_2O_3 , величины отношений Al/Ti, Ba/Sr, K/Rb, индекса латеритизации (IOL). Будучи гипс-содержащими, изученные палеопочвы вместе с тем несут черты, характерные для теплых и влажных обстановок, которые господствовали на изученной территории в первой половине девона (Alekseeva et al., 2023). Развитие палеопочвоведения и подходов к палеореконструкциям во многом способствует пониманию процессов почвообразования, факторной теории почвообразования и элементарных процессов, формирующих твердофазные продукты функционирования почв. Необходимо продолжать получение новых данных для генетической интерпретации почвенно-геохимических процессов, эволюции почв и природной среды на основе сравнительного анализа минералогических, геохимических, изотопных и магнитных характеристик для палеопочв в широком временном диапазоне. Полученные результаты могут быть использованы как при изучении дочетвертичных палеопочв, так и астробиологических задач, в частности, в качестве моделей для понимания процессов формирования почвоподобных тел на различных объектах Солнечной системы.

2.6. Содовые озера как реликтовые биотопы

Современные содовые озера и населяющие их микроорганизмы вызывают значительный интерес, поскольку могут представлять собой модель для изучения биогеохимических процессов, происходивших на ранних этапах развития биосферы Земли. Они встречаются на всех континентах и представляют собой естественные системы, в которых высокое содержание солей сочетается со стабильно щелочными значениями pH. Существуют представления о том, что первичный океан имел повышенную карбонатную щелочность, т. е. был содовым (Kemper, Degens, 1985; Kadoya et al., 2020). В качестве альтернативы (или дополнения) развиваются представления о распространении в раннем докембрии обширных эпиконтинентальных водоемов содового типа на поверхности суши (Заварзин, 1993; Stüeken et al., 2015). Таким образом, представляется очевидным, что содовые озера существовали на протяжении всей геологической истории Земли и могут рассматриваться как реликтовые биотопы. Однако с геологической точки зрения это достаточно эфемерные системы, и современные содовые озера нельзя в прямом смысле считать

древними. Например, возраст озер Магади и Натрон (самых старых среди озер Восточно-Африканского Рифта) оценивается примерно в 10–12 тыс. лет, а в плейстоцене (800–300 тыс. лет назад) на их месте находилось пресноводное озеро Олоронго (Behr, Röhrlich, 2000). Безусловно, при смене геохимической обстановки должно было измениться и обитавшее там сообщество организмов. Широко применяя актуалистический микробиологический подход к изучению функционирования протерозойских экосистем, академик Г.А. Заварзин, тем не менее, разумно ограничивал его использование по отношению к более ранним периодам (Жилина и др., 2007). В данном разделе подняты вопросы о том, в какой мере современные содовые водоемы можно рассматривать в качестве реликтовых биотопов.

Содовые озера как особый тип соляных озер

В составе вод соляных озер (таблица 5) преобладают восемь основных компонентов: катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и анионы HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- и SO_4^{2-} . Соотношение этих компонентов определяет тип рассола. По химической классификации Курнакова-Валяшко (Валяшко, 1962) выделяют три основных типа рассолов: карбонатный (содовый), сульфатный и хлоридный.

Таблица 5. Анионный состав и химический тип рассолов (по классификации Борос-Колпаковой) некоторых соляных озер, ставших объектами активных микробиологических исследований

Озеро	М, г/л	рН	Анионы, мг/л				Химический тип
			HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}	
Моно Лэйк (4)	56,6	9,6	5410	10300	13500	7380	Содово-солёный
Магади (4)	263,2	10,5	5000	83600	64500	1680	Содовый
Вади Натрун (7)	557	8,5	1970	7190	125700	61100	Солёный
Доронинское (2)	46,9	9,8	15450	10260	4530	210	Содовый
Хилганта (3)	46,6	9,8	1160	330	16630	12470	Солёный
Верхнее Белое (1)	9	9,7	4200	1300	1060	1530	Содово-солёный
Нижнее Белое (1)	3,8	9,6	1430	420	920	1390	Солёный
Хадын (4)	1,3	8,4	2400	-	2600	3800	Солёный
Киран (6)	35	9,3	14644	3601	230,5	5594	Содово-солёный
Петуховское содовое (5)	53,8	9,8	7470	17900	10300	1400	Содовый
Танатар VI (5)	51,3	9,8	6560	15300	10600	2660	Содовый

Примечание: (1) – Банзаракцаева и др., 2007; (2) – Борзенко и Замана, 2008; (3) – Намсараев и др., 2010; (4) – Труды ИНМИ, 2007; (5) – Borzenko et al., 2018; (6) – Burganskaya et al., 2018; (7) – Taher, 1999.

Главными компонентами *содовых рассолов* являются ионы $\text{Na}^+(\text{K}^+)$, HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- и SO_4^{2-} , а содержание Ca^{2+} и Mg^{2+} в жидкой фазе определяется пределами растворимости CaCO_3 и MgCO_3 . Таким образом, в содовых рассолах общая карбонатная щелочность превышает суммарное содержание щелочно-земельных катионов ($[\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] > [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Ca}^{2+}]$), что приводит к стабильным щелочным значениям pH (более 9). Доминирующим катионом является натрий, в то же время соотношение анионов в составе таких рассолов может сильно варьировать. В итоге, в микробиологической литературе содовыми часто называют озера со щелочными значениями pH, но разнообразным химическим составом рассолов (таблица 5), однако с экофизиологической точки зрения соотношение основных анионов является важным фактором для микроорганизмов. Геохимическая классификация Борос–Колпаковой (Boros, Kolpakova, 2018) акцентирована на содовом типе вод и основывается на доминирующих катионах/анионах, содержание которых превышает 25e% (эквивалентных процентов) от общего количества катионов/анионов. Выделяются содовые, содово-соленые и соленые типы озер (таблица 5). В *содовых озерах* карбонат-ионы являются доминирующими анионами: их суммарное содержание в воде/рассоле больше, чем содержание любого другого аниона и >25e% от общего содержания анионов. Классические примеры истинных содовых озер распространены в Восточно-Африканской рифтовой долине (Магади, Натрон, Богория, Накуру, Элементейта и др.), Кулундинской степи (Танатары, Петуховское содовое), Забайкалье (Доронинское). *Содово-соленые озера* являются «промежуточными» между содовым и соленым типами: суммарное содержание карбонат-ионов >25e%, но при этом они не являются доминирующими анионами ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ e% < Cl^- или SO_4^{2-} e%). К этому типу относятся Верхнее Белое и Киран (Бурятия), Моно Лэйк (Калифорния). Все озера, в воде/рассоле которых суммарное содержание карбонат-ионов ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) <25e%, были отнесены к *соленным* без дальнейшего разделения их на химические типы. Примерами таких озер являются Хилганта и Нижнее Белое (Бурятия), Хадын (Тува), Вади Натрун (Египет). Использование этой классификации представляется оптимальным в рамках данного раздела.

Экотипы и филогения галоалкалофильных микроорганизмов

Алкалофильные микробные сообщества включают все основные функциональные группы прокариот. К настоящему времени накоплена обширная информация о филогенетическом разнообразии и экофизиологических свойствах микроорганизмов, выделенных из щелочных соляных озер различного типа, что позволяет рассмотреть генетические и экологические связи между представителями отдельных функциональных групп (Жилина и др., 2007). Оказалось, что для разных групп наблюдается общая закономерность: микроорганизмы из соленных, содово-соленных и содовых озер экофизиологически различны (что согласуется со спецификой их местообитаний), но филогенетически близки на родовом, видовом и иногда штаммовом уровнях. Можно

выделить три экотипа: нейтрофильный галофильный (NaCl-зависимый, морской), алкалитолерантный галоалкалофильный (содово-соленые, соленые щелочные озера) и натронофильный (карбонат-зависимый, содовые озера). Термин «натронофилы» был введен специально для обозначения микроорганизмов, способных к росту в преимущественно карбонатных рассолах и не зависящих от содержания хлора в среде (высокие концентрации хлора, напротив, могут ингибировать рост). Приведем несколько примеров.

Алкалофильные тиотрофные бактерии (аэробные хемолитотрофы, окисляющие тиосульфат и сульфид) представлены тремя родами *Thioalkalimicrobium*, *Thioalkalispira* и *Thioalkalivibrio*. Виды рода *Thioalkalimicrobium* из содово-соленых озер Забайкалья филогенетически оказались довольно близки к морским (галофильным) видам рода *Thiomicrospira*. Штаммы рода *Thioalkalivibrio* оказались различны по толерантности к ионам хлора, что согласуется с химией их местообитаний: натронофилы были выделены из содовых озер Кулунды, Монголии, Кении, в то время как галоалкалофилы из Вади Натрун и Серлс Лейк требовали не менее 0,5 М Cl⁻ в среде (Жилина и др., 2007). Алкалофильные нитрификаторы (нитрит- и аммоний-окисляющие бактерии родов *Nitrobacter* и *Nitrosomonas*, соответственно), выделенные из содовых и содово-соленых озер Сибири, Кении, Монголии, Египта, на родовом и/или видовом уровне оказались очень близки с галофильными нейтрофильными (морскими) представителями (Жилина и др., 2007). Различные виды рода *Spirochaeta* (анаэробные диссипотрофы, использующие органические вещества в низких концентрациях) были выделены из озер трех континентов, при этом виды из Магади и Моно-Лейк были натронофильными, а вид из оз. Хадын – галоалкалофильным (Жилина и др., 2007). Известны экотипы пурпурных серных бактерий (аноксигенные фототрофы) *Ectothiorhodospira* и *Halorhodospira*: близкие виды этих родов были выделены из морских лагун, соленых и содовых водоемов (Жилина и др., 2007). Экотипы можно выделить и для цианобактерий (оксигенные фототрофы). Например, среди одноклеточных цианобактерий выделяется тесный филогенетический кластер, который включает галофильных и экстремально галофильных представителей родов *Halotheca*, *Rubidibacter* и субкластера родового уровня *Euhalotheca*. Представители *Halotheca* и *Rubidibacter* – нейтрофильные галофилы, облигатно зависимые от высокого содержания хлора в среде. Представители *Euhalotheca* распространены не только в соленых нейтральных местообитаниях (Эйлат, Шарк-Бей, Солар-Лейк, Мертвое море), но и в щелочных гиперсоленых (Вади-Натрун) и содовых озерах (Магади, озера Кулундинской степи). Штаммы, выделенные из содовых озер, являются натронофильными и доминируют при максимальных соленостях (в эндоэвапоритовых условиях). Второй пример – нитчатые цианобактерии с простой морфологией, распространенные в широком диапазоне солености в содовых, содово-соленых и соленых озерах, которые совместно с галофильными нейтрофильными представителями сходной морфологии образуют единый филогенетический кластер «морские *Geitlerinema*». Морфологически близкие

пресноводные формы, идентифицированные как представители рода *Geitlerinema*, филогенетически оказались далеки от «морского» кластера.

Таким образом, можно заключить, что филогения функционально разных микроорганизмов в составе прокариотных сообществ содовых, содово-соленых и соленых озер свидетельствует, с одной стороны, об общих эволюционных корнях представителей трех экотипов, а с другой – об их обособленности от прокариотных сообществ несоленых (пресноводных и термальных) наземных систем.

Современные содовые озера – рефугиумы древней жизни

Обитаемость (исходная среда, создаваемая абиотическими факторами) предшествовала обитанию. Этот постулат, сформулированный академиком Г.А. Заварзиным (Заварзин, 2003), означает, что жизнь заселяет ниши, уже пригодные для ее обитания. В этом контексте существование экотипов микроорганизмов можно расценивать как свидетельство эволюции не отдельных таксонов, а экосистем, включающих сообщества организмов и среду их обитания.

Поскольку экотипы микроорганизмов физиологически и филогенетически связаны с условиями их обитания, можно ожидать, что древнейшие микробные сообщества могли быть алкалофильными. Но можно ли считать их аналогичными современным? В функциональном аспекте такой подход, по всей видимости, является оправданным (Жилина и др., 2007), хотя нельзя исключать того, что трофическая структура сообщества могла быть несколько проще. Второй вопрос, являются ли современные содовые озера рефугиумами древней жизни, зародившейся, предположительно, в катархее? При попытках разобраться с этим вопросом возникают определенные проблемы. Так, прямой (морфологический) анализ состава микробных сообществ, которые могли бы развиваться в катархее, невозможен из-за отсутствия палеонтологического материала данного возраста. Подходом, который мог бы позволить выявить разнообразие экотипов ранних микроорганизмов, можно считать эволюционно-филогенетический (метод молекулярных часов). Однако микроорганизмы из современных содовых озер не образуют глубоких филогенетических линий и имеют позднее происхождение, а базовые линии прокариот в эволюционных деревьях представлены термофилами. Соответственно, возникает вопрос, отражает ли молекулярная эволюция отдельных таксонов эволюцию экосистем?

В недавних молекулярно-эволюционных работах, выполненных различными методами и на различных массивах данных, выявлено экспоненциальное увеличение разнообразия филогенетических линий прокариот без признаков снижения скорости диверсификации (Marin et al., 2017; Louca et al., 2018). Был сделан вывод, что диверсификация таксонов прокариот в целом является результатом случайного расщепления линий, не ограничена уже существующим филогенетическим разнообразием и не реагирует каким-

либо существенным образом на глобальные изменения окружающей среды. Эти выводы представляются логичными, если рассматривать разнообразие прокариот не как разнообразие дискретных видов, а как разнообразие функций, которые суммарно должны обеспечить круговорот биогеохимических циклов (Заварзин, 2003).

Итак, разнообразие современных прокариот – это результат, к которому привела эволюционная диверсификация древних филогенетических линий. Но может ли так быть, что современное разнообразие не отражает всех линий, которые когда-либо существовали на Земле? Иными словами, вымирают ли таксоны прокариот в ходе эволюции? По молекулярно-биологическим оценкам несмотря на то, что разнообразие прокариот постоянно увеличивается, большинство бактериальных линий, когда-либо обитавших на Земле, к настоящему моменту исчезло (Louca et al., 2018). Палеонтологический подход в этом вопросе может быть применим, видимо, только к цианобактериям. Появление новых морфологических форм (палеотаксонов) хорошо изучено и в общих чертах согласуется с молекулярно-биологическими данными. Но исчезновение комплексов цианобактерий, типичных для тех или иных периодов времени и палеообстановок, не трактуется как их вымирание (Сергеев, 2017). Эти представления исходят из соображений о морфологической консервативности цианобактерий (древние формы имеют современные аналоги на родовом и видовом уровнях). В данном случае не учитывается тот факт, что морфологически сходные цианобактерии могут представлять собой экологически и филогенетически различные таксоны. Поэтому существование всего морфологического разнообразия цианобактерий уже в раннем протерозое нельзя однозначно расценивать как законченную эволюцию и отсутствие генетических изменений внутри филы. Соответственно, вымирание цианобактериальных (как и других прокариотных) палеотаксонов нельзя исключать из рассмотрения.

Таким образом, учитывая геологическую эфемерность содовых озер и их крайнюю изменчивость, можно предположить, что в ходе эволюции биосферы прокариотные сообщества древних содовых озер многократно исчезали. Соответственно, современное филогенетическое разнообразие галоалкалофильных прокариот не является отражением древнего их разнообразия, и современные содовые озера нельзя считать рефугиумами древней прокариотной жизни. При этом филогенетическая близость микроорганизмов, относящихся к разным экотипам, могла способствовать сохранению и перекрестному возобновлению прокариотных сообществ соленых, содово-соленых и содовых озер.

2.7. Выживаемость в условиях космоса

Космическое пространство характеризуется такими неблагоприятными для жизни факторами, как условия вакуума, экстремальных температур и воз-

действие ионизирующего излучения (ИИ), как электромагнитного, так и корпускулярного типов. Мера устойчивости организма к воздействию ИИ называется радиорезистентностью. Для различных организмов она варьирует и обусловливается различными механизмами адаптации. Наиболее устойчивые к данному воздействию организмы называются радиорезистентными экстремофилами.

Космическое излучение межпланетного пространства Солнечной системы представлено следующими компонентами: солнечным ветром (СВ), солнечными вспышками, солнечными протонными событиями (СПС) и галактическим космическим излучением (ГКИ) (также встречается термин ГКЛ – галактические космические лучи) (Тимошенко, 2021).

Солнечный ветер представлен потоком разнозаряженных ионизированных частиц (электронов, протонов, тритонов, альфа-частиц низких энергий – диапазонов энергий 0,5–10 кэВ), эмитируемых солнечной короной. В результате вспышек на Солнце генерируются СПС – выброс протонов гораздо большей энергии, чем СВ. Помимо протонов (десятки ГэВ и выше), генерируются и ускоряются электроны (до 10 МэВ), нейтроны (сотни МэВ), легкие и тяжелые ядра, и вспыхивают нейтрино. Возникает кратковременное электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн – от жесткого рентгеновского излучения до длинных радиоволн (Тимошенко, 2021).

ГКИ имеет стационарный и изотропный поток (до E частиц 10^{14} эВ). В его составе атомы водорода – протоны (~87%), гелий – альфа-частицы (~12%) и ядра более тяжелых элементов (менее ~1%). Также имеются электроны (~ 10^{14} эВ) и очень малое количество гамма-квантов (~0,01% при энергиях >100 МэВ). Низкое содержание легких ядер в солнечных лучах объясняется их «выгоранием» в результате термоядерных реакций в Солнце, а высокое содержание легких ядер в ГКИ связано с расщеплением более тяжелых ядер из-за столкновений с ядрами межзвездного газа (Тимошенко, 2021).

В рамках звездных систем звездный ветер формирует астросферу (в Солнечной системе – гелиосфера), оказывающую компенсирующее воздействие по отношению к ГКЛ.

Земная биосфера экранирована от космического излучения магнитосферой и атмосферой. Тем не менее, ряд представителей ее биоты представляет интерес с точки зрения астробиологических исследований, позволяющих лучше понять пределы приспособляемости организмов к условиям радиации. Наиболее перспективными представляются, прежде всего, бактерии и археи, но также и некоторые беспозвоночные, такие как тихоходки *Tardigrada*.

В контексте данного вопроса, в зависимости от исследуемой части внеземного пространства, эксперименты и модели можно разделить на следующие группы: исследования межпланетного (околоземного) пространства, моделирование марсианского реголита, реголита спутников газовых гигантов, моделирование условий на кометах, исследования космической пыли.

На Земле обнаружен ряд организмов, особо выделяющихся своей способностью переносить ИИ. Одним из примеров являются бактерии

Deinococcus radiodurans, выдерживающие дозу до 10 кГр, повышающих эффективность репарации за счет множественных копий ДНК. Теоретически, широкая распространенность *D. radiodurans* может говорить о том, что его адаптационный механизм мог возникнуть не как ответ на экстремальные условия, но носит более древнее универсальное происхождение (Мямин, 2022). Также интерес представляют многоклеточные тихоходки, выдерживающие до 5 кГр, адаптационный механизм которых заключается в комбинации анабиоза, при котором они теряют до 99% воды, и белка *Dusp*, связывающегося с ДНК и защищающим их от разрывов. По результатам проведенного опыта по экспонированию тихоходок в открытом космосе, в течение года они сохранили жизнеспособность (Зарубин и др., 2022).

Космическое пространство также отличается весьма низкими температурами и давлением, в связи с чем проводились опыты по изучению совместного действия радиации, низкой температуры и низкого давления на сообщества микроорганизмов, населяющих экстремальные, но принципиально различные по генезису и физико-химическим условиям местообитания Земли. В качестве объектов исследования послужили образцы вечномерзлой породы Арктики и Антарктики, серозем пустыни Негев (Израиль) и др. Было проведено облучение этих образцов гамма-излучением в градиенте доз от 1 Гр до 1 МГр при низком давлении (1 Торр) и низкой температуре (-50°C), т. е. были смоделированы условия поверхностного слоя реголита Марса. Результаты показали высокую долю выживаемости клеток данных микробных сообществ и сохранение ими видового разнообразия при облучении дозой до 1 МГр. В каждом из них происходили сходные ответные реакции. Часть популяций переходила в некультивируемое покоящееся состояние, а некоторые из них, наоборот, активизировались, что приводило к таксономической перестройке структуры сообщества. То есть, ранее доминировавшие микроорганизмы могли уйти в инактивированное состояние и передать свою доминанту совсем другим микроорганизмам, которые в новых условиях развивались на порядок активнее. После облучения дозой 100 кГр наибольшую устойчивость и активность проявляли бактерии родов *Deinococcus*, *Methylococcus*, *Clostridium* и *Arthrobacter*, после воздействия больших нагрузок они сохраняли свою метаболическую активность (Чепцов и др., 2016).

Эксперименты во внеземном пространстве можно условно подразделить на те, в которых экспонирование осуществляется внутри космического аппарата, и на те, в которых экспонирование проводится в условиях открытого космоса. Анализ ряда экспериментов показал, что в условиях открытого космоса (на внешней поверхности МКС) среди сохранивших жизнеспособность организмов преобладают археи, споровые бактерии и грибы, бактерии рода *Bacillus* и гриба *Aureobasidium pullulans*. Целенаправленные исследования двух последних показали способность сохранять жизнеспособность после экспонирования в течение, как минимум, двух лет. Причем, в случае с *A. pullulans* 30% популяции обнаружили способность к повышению



Рис. 39. Возвращение космического аппарата БИОН-М1 на Землю. На фото показаны отсеки с образцами, которые открываются во время полета на орбите спутника. Научный проект «Биоспутник» (фото О. Волошина, ИМБП РАН).

устойчивости к радиационному воздействию со временем, а также способность сохранять новоприобретенные свойства (Дешева и др., 2020).

Известно, что авто- и гетеротрофные протисты способны сохранять жизнеспособность на протяжении десятков и сотен тысяч лет в толщах многолетнемерзлых отложений, в условиях фоновой радиации, отрицательных температур, отсутствии свободной воды. Предполагается, что эта способность обусловлена малоизученной адаптивной способностью к репарации и возобновлению метаболизма. Как следствие, протисты представляют собой определенный интерес для экспериментов в условиях открытого космоса. Эксперименты проводились на борту космических аппаратов «Бион-М1» и «Фотон-М4» в 2013 и 2014 гг., экспонировались цисты инфузорий на высоте 575 км на протяжении 30 и 42 суток (рис. 39). Часть была предварительно высушена на мембранах, часть инкубирована в культуральной среде в PCR пробирках. В результате экспериментов было показано, что цисты почвенных инфузорий способны сохранять жизнеспособность в условиях открытого космоса. Однако в послеполетных пробах был высокий процент цист с поврежденной мембраной – более 70% от контроля. При этом доля неповрежденных цист в послеполетных пробах была значительно выше при инкубации в жидких культуральных средах, чем при высушивании на мембранных фильтрах (34% и 3% от контроля, соответственно). Анализ жизнеспособности цист селективных вариантов штаммов *C. steinii*, полученных после одно- и двукратного

полетов на борту спутников «Бион» и «Фотон» показал значительный рост устойчивости цист инфузорий при экстремальных воздействиях (Шатилович, Ривкина, 2020). Это говорит о том, что адаптационный механизм, заложенный в геноме изначально, начинал активизироваться уже во втором поколении.

Особый интерес представляют собой наиболее примитивные организмы, такие как вирусы и микоплазмы, как наиболее приближенные к самовоспроизводящимся молекулярным колониям и «минимальным клеткам».

Микоплазмы обладают наименьшими размерами среди организмов, способных к росту на искусственных питательных средах, их геномы редуцированы, они не способны к спорообразованию, а размеры некоторых из них меньше теоретически рассчитанного минимального размера, необходимого для стабильного функционирования систем жизнедеятельности. Эксперимент по экспонированию в условиях открытого космоса и внутри спутника (21–22 °С) культуры *Acholeplasma laidlawii* в условиях жидкой питательной среды в виде суспензии в питательной среде и в виде суспензии, помещенной в почвогрунт, в течение 72 часов (включая время приземления и доставки образцов) показал их способность к сохранению жизнеспособности. Стоит отметить, что из образцов, облучавшихся в условиях открытого космоса, сохранились лишь те, что были помещены в почвогрунт (Вишняков и др., 2020).

Как известно, вирусы не имеют систем репарации повреждений, трансляции и транскрипции. Эксперимент по облучению бактериофагов DT57C в специальных камерах при низких температуре и давлении ускоренными электронами показал их устойчивость к высоким дозам в рамках заданных физических условий, сохранение высокой популяции и вирулентности. Также исследование выявило большую устойчивость фага при иммобилизации в монтмориллоните по сравнению с жидкой средой, а также рост устойчивости к ИИ по мере понижения температуры (Сухова и др., 2020).

Экспонирование микроорганизмов в космосе вплоть до шести лет было изучено различными авторами (Horneck et al., 1974; Horneck, 1993; Rettberg et al., 2002) на низкой околоземной орбите, где воздействие радиации относительно мало, и за пределами земной магнитосферы, в условиях межпланетной радиационной среды, но в течение непродолжительного времени (несколько дней) (Bucker et al., 1973, 1975a, b; Bucker, 1974; Facius et al., 1978, 1979; Graul et al., 1975; Reitz et al., 1995; Rettberg et al., 2002).

Если объединить результаты всех исследований, можно заметить, что легче всего радиация переносится организмами при пониженной температуре и давлении, поэтому можно сказать, что это не дополнительные факторы стресса для организмов в открытом космосе, а некоторая форма защиты от радиации. Все упомянутые выше исследования продемонстрировали возможность выживания в космосе различных организмов, среди которых, в контексте панспермии, наибольший интерес представляют бактерии, археи и грибы.

ГЛАВА III

Астробиологические исследования внеземного материала

3.1. Основы метеоритики

Хотя метеориты известны человечеству еще с древнейших времен, метеоритика как наука возникла на рубеже XVIII и XIX столетий благодаря работам Э. Хладни, Э. Говарда, Дж.-Л. де Бурнона и А.-Л. де Лавуазье. К 1860-м гг. сложилось понимание, что метеориты являются фрагментами астероидов или же формируются в космическом пространстве.

С точки зрения астробиологии, имеется значительный интерес к метеоритам, прежде всего, как к телам, способным к переноске фоссильных остатков внеземного происхождения. Также известно, что в составе метеоритов присутствует широкое разнообразие сложных органических соединений (в т. ч. индигенных аминокислот), экспериментально показана возможность процессов их формирования на метеоритной минеральной матрице (Saladino et al., 2015). Помимо этого, анализ метеоритов позволяет получить информацию о разных стадиях эволюции вещества звездных систем – считается, что большинство метеоритов, упавших на Землю, происходит из пояса астероидов, где образуются в результате столкновения оных под действием гравитационного поля Юпитера (Sephton, 2002).

Происхождение метеоритов

Метеориты – метеороиды или астероиды, достигшие земной поверхности, и при этом, после прохождения через атмосферу, сохранившие размеры больше гранул космической пыли. По классификации Международного астрономического союза (IAU), метеоритами считаются тела, имеющие размеры от 30 мкм до 1 м в диаметре, тела диаметром до 2 мм классифицируются как микрометеориты (стоит отметить, что существуют различные системы классификации). Метеориты обнаруживаются или в результате наблюдения

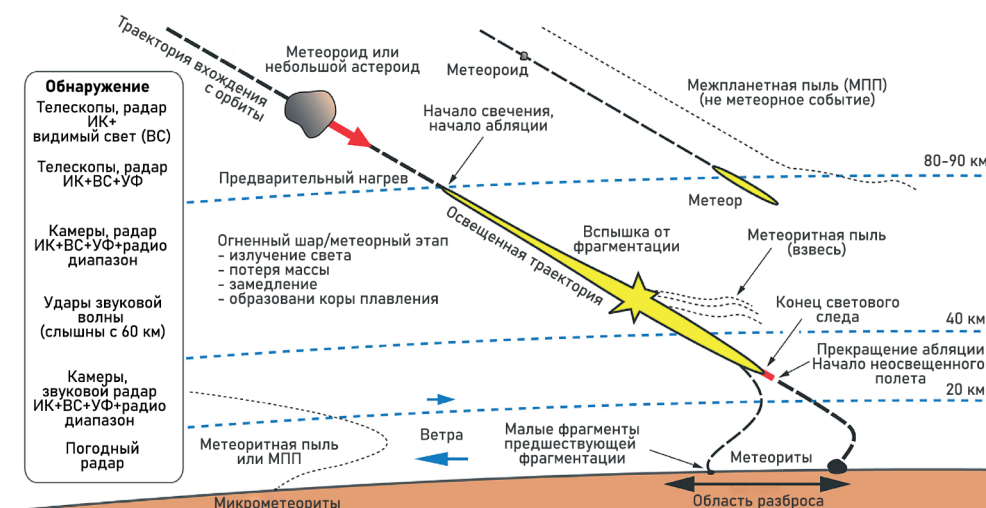


Рис. 40. Схематическое изображение стадий прохождения метеороида через земную атмосферу (Moilanen et al., 2021).

процесса их торможения в земной атмосфере (визуальный феномен называется метеором, при большой интенсивности – болидом) в ходе падения, или же, если падение не наблюдалось, они идентифицируются по своему химическому и изотопному составу, а также по некоторым особенностям внутреннего строения.

Как уже упоминалось ранее, при прохождении метеорного тела (скорость варьирует от 11 до 72 км/с) через атмосферу (рис. 40) образуется метеор или болид, который можно наблюдать на протяжении нескольких секунд (изредка до 5–10 сек), после чего тело замедлится (или разрушится) настолько, что визуальный феномен прекратится. Во время этого процесса происходит разогрев внешних слоев тела, что приводит к формированию коры плавления. В дальнейшем в результате абляции (испарения под действием горячих потоков атмосферных газов) кора плавления может быть утеряна, однако, согласно современным представлениям, внутренние структуры метеорита не подвергаются нагреву, сохраняя свою интактность (хотя возможен их последующий шоковый метаморфизм). Метеоры формируются на высоте примерно 80–120 км над уровнем поверхности (Kornin et al., 2008), состоят из ионизированных молекул метеороида и атмосферных газов, размеры метеора составляют порядка ~1 м в диаметре и до десятков километров в длину. Некоторые метеороиды могут взрываться при прохождении через атмосферу, что обусловлено большим градиентом давления между фронтальной и задней сторонами метеороида, ибо при наличии в нем пор входение в них воздуха приводит к разрушению его изнутри (Tabetah, Melosh, 2018). Подобные взрывы приводят к рассеянию обломков метеороида на расстояния в десятки километров (Moilanen et al., 2021).

В основном, родительскими телами метеоритов являются астероиды и кометы. Ряд метеоритов представляет собой планетарную или спутниковую эжекту, выбитую в результате импактных событий, при этом в минеральном составе метеорита может присутствовать, временами значимая, доля аккрецированного материала (космическая пыль, небольшие фрагменты и т. д.).

Большая часть упавшего на Землю метеоритного материала представлена микрометеоритами, размеры которых слишком малы для их достоверного обнаружения (Додд, 1986).

Возраст метеоритов определяется посредством радиоизотопного датирования. Однако подобный метод может быть не применим, если произошла гомогенизация изотопов (например, в результате нагрева), или если метеорит состоит из компонентов различающихся возрастов. Тем не менее, стоит отметить, что в первом случае сохраняется возможность определить, какое время назад произошел нагрев, а во втором случае – строить гипотезы о формировании родительского тела метеорита.

Классификация метеоритов

Классифицируют метеориты по их химическому составу, в частности, по содержанию никелистого железа и силикатов (рис. 41), что позволяет выделить три основных класса: каменные (аэролиты), железные (сидериты) и железокаменные (сидеролиты) метеориты (рис. 42–44). Каменные метеориты (таблица 6) состоят из природных силикатов (преобладают оливин и пироксен), делятся на два подкласса: хондриты (недифференцированные метеориты, содержат хондры (рис. 45) – силикатные гранулы <1 мм) и ахондриты (дифференцированные метеориты, не содержат хондр); железные метеориты состоят, в основном, из никелистого железа, по содержанию никеля делятся на: гексаэдриты (<6%), октаэдриты (6–16%) и атакситы (16–30%); железокаменные состоят из силикатов и никелистого железа примерно в равных пропорциях и на основании состава силикатов делятся на палласиты (преобладает оливин) и мезосидериты (преобладает пироксен) (Додд, 1986).

По происхождению метеориты можно разделить на две большие группы: недифференцированные, куда входят хондриты и часть ахондритов (примитивные), образованные в результате конденсации вещества первичного газопылевого облака; и дифференцированные, куда входят все железокаменные, железные и большая часть ахондритов – метеориты данной группы образовались в недрах протопланетных и планетных тел, где проходили процессы плавления вещества, разделения металлического и силикатного расплавов с последующей кристаллизацией силикатов – т. е. процесс магматической дифференциации. Отдельно стоят примитивные ахондриты, по химическому составу схожие с хондритами, но при этом содержащие магматические или рекристаллизованные породы, свойственные ахондритам (Weisberg et al., 2006).

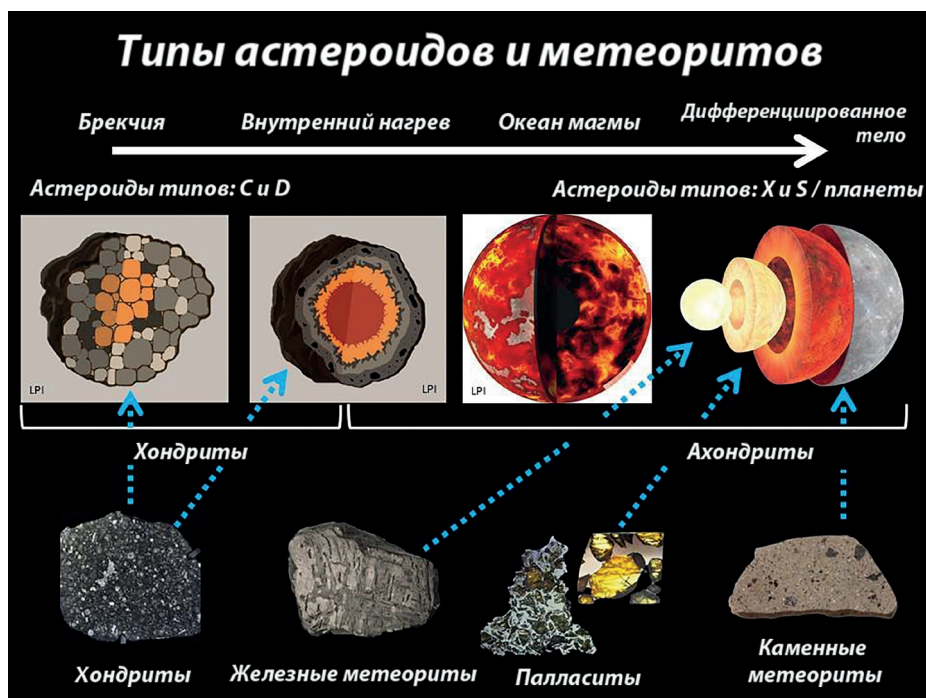


Рис. 41. Зависимость типов метеорита от степени дифференцированности родительского тела. При нагреве происходят дифференциация и метаморфизм вещества, формируется ядро (железоникелевое), окруженное переходной зоной (смесь вещества ядра и матрицы), и минеральная «кора» (URL: <https://ukantarcticmeteorites.wordpress.com/meteorite-classification>).



Рис. 42. Железный метеорит *Arispe* (полированная поверхность). Видно прорастание двух железоникелевых сплавов с различной кристаллической структурой и различным содержанием Ni (Додд, 1986).

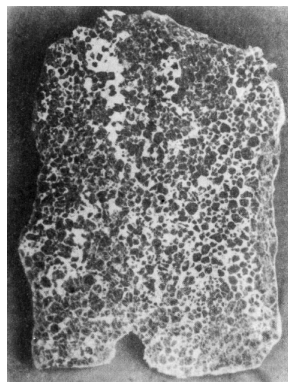


Рис. 43. Палласит *Mount Vernon* (полированная поверхность). Видны области преобладания оливина (темные) и никелистого железа (светлые) (Dodd, 1986).

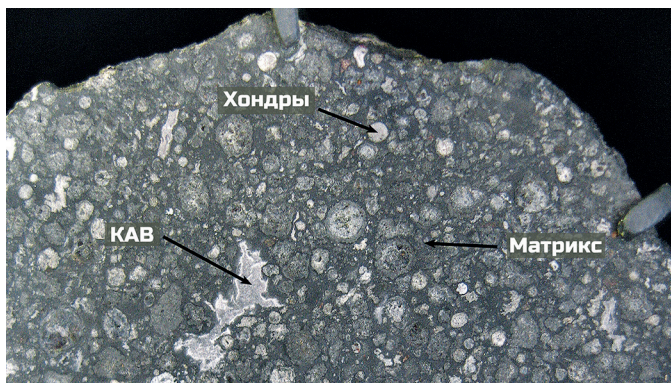


Рис. 44. Углистый хондрит *Allende* (CV3, полированная поверхность), видны хондры и кальциево-алюминиевые включения (КАВ, САИ в англоязычной литературе; возрастом 4,567 млрд лет). (Andersen, Haack, 2005; URL: <https://www.dlr.de/en/images/2020/1/the-allende-meteorite-a-carbonaceous-chondrite>).

Таблица 6. Химический состав некоторых типов хондритов (*с изм.*) (Dalrymple, 1991)

Тип метеорита SiO ₂		Усредненное содержание (в % от веса)								
		Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	MgO	H ₂ O	C	
Углистые хондриты	CI	23	1,8	0,07	1,5	0,08	24	16	21	3,6
	CM	27	2,3	0,05	2	0,1	28	19	13	2,4
	CO CV	34	2,6	0,05	2,3	0,12	32	24	1	0,05
Обыкновенные хондриты	H	36	2,6	0,1	1,9	0,11	36	23	0,3	-
	L LL	40	2,8	0,1	1,9	0,11	28	25	0,2	-
Энстатитовые хондриты		39	1,9	0,11	1	0,06	36	21	0,6	0,4

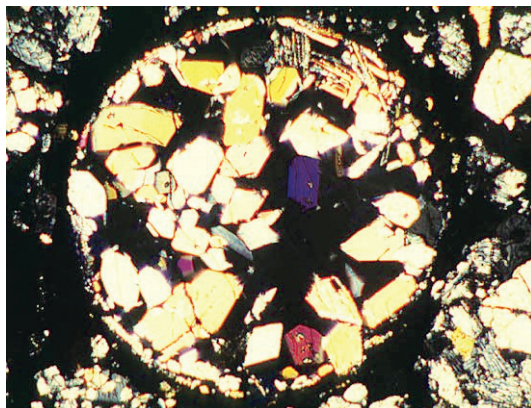


Рис. 45. Изображение хондры (1 мм диаметр) в обыкновенном хондрите Semarkona, полученное посредством СЭМ. Светлые области – кристаллы минералов. Темные области – стекло (результат плавления) (URL: https://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/meteorites/origin.html).

Большинство метеоритов, упавших на Землю, сформировались в поясе астероидов (т. е. из первичного вещества), и лишь часть идентифицирована как выбитые с поверхности планет и спутников.

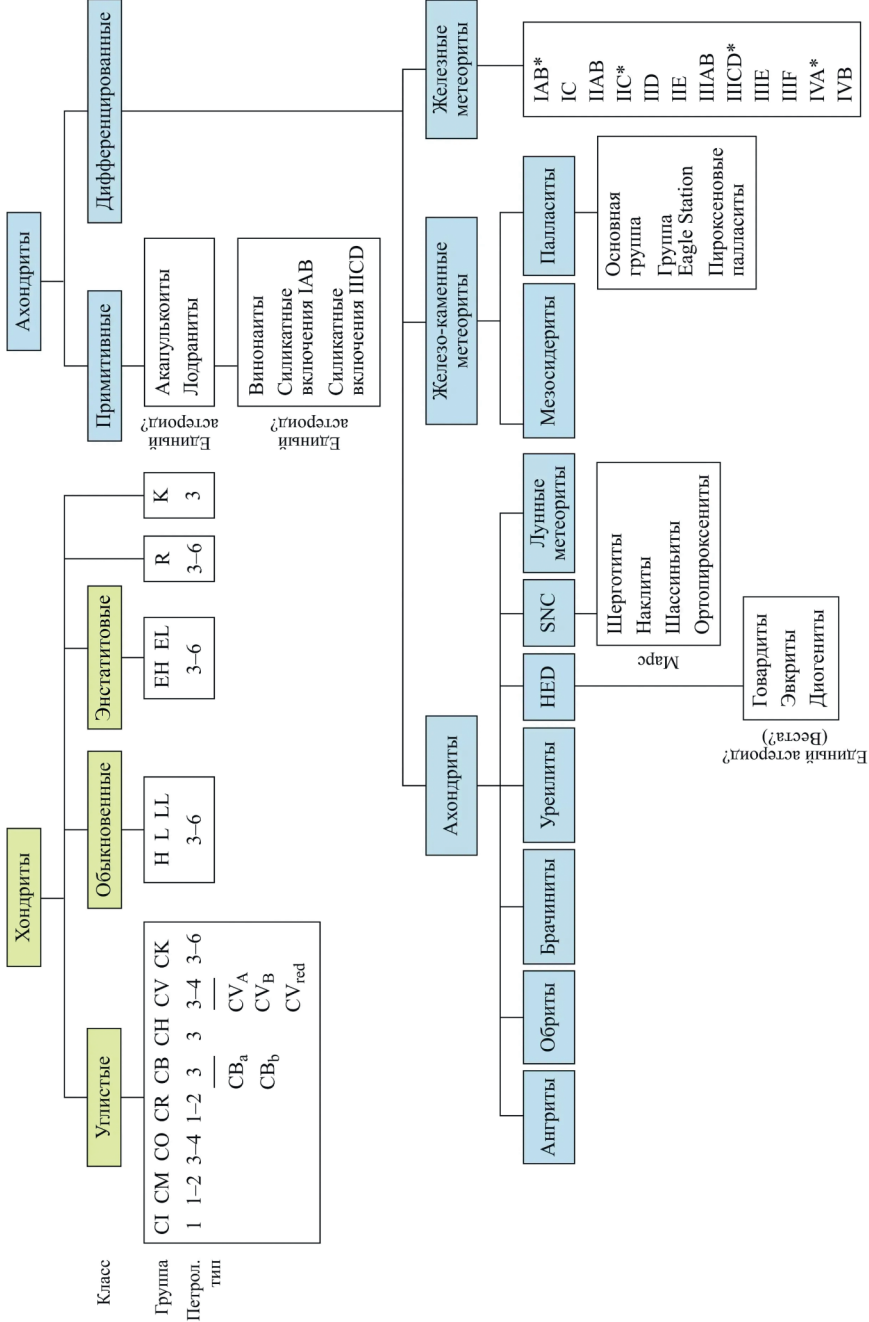
Наименование метеоритов происходит по месту обнаружения. В случае обнаружения двух отдельных метеоритов в одном районе им присваивается одинаковое наименование, после которого в скобках ставится прописная буква. При необходимости различения экземпляров одной находки после наименования ставится порядковый номер. Для метеоритов, обнаруженных в Антарктиде, наименование присваивается по названию географического района, индексу полевой группы, году и порядковому номеру образца (Додд, 1986).

Классификация метеоритов подвергается изменениям на протяжении всей истории своего существования, на сегодняшний день ее можно представить в следующей форме.

Стойт учитывать, что все существующие ныне системы классификации носят приближенный характер, некоторые метеориты могут быть отнесены сразу к нескольким группам, или же ни к одной из существующих.

Для хондритов принята следующая классификация (Додд, 1986; Weisberg et al., 2006; Krot et al., 2007):

- Энстатитовые (**E**) – в зависимости от содержания сидерофильных элементов по отношению к кремнию делятся на: **EH** (высокое), **EL** (низкое)



*Железные метеориты с силикатными включениями

Рис. 46. Современная классификация метеоритов (URL: <https://bigenc.ru/c/meteority-4f7c31>) (Weisberg et al., 2006).

- Обыкновенные (**O**) – разделены по содержанию железа: **LL** – амфотериты (Fe 18–22%), **L** – оливин-гиперстеновые хондриты (Fe 19–24%), **H** – бронзиты (оливин-бронзиты) (Fe 25–30%)
- Углистые (**C**) – группы названы по эталонным представителям: **CI** – Ivuna, **CM** – Mighei, **CO** – Ornans, **CV** – Vigarano, **CK** – Karoonda, **CR** – Renazzo, **CB** – Bencubbin, **CH** – ALH85085 (*high metal*)
- Не входящие в вышеперечисленные **R** (Rumuruti) и **K** (Kakangari)
- Без группы – которые не удается соотнести ни с одной из групп классификации (104 наименования по состоянию на 2024 г.) (URL: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>).

В классификации хондритов буквенное название соответствует химическому составу, стоящая после химического названия цифра обозначает петрологический тип.

В более старой литературе могут встречаться обозначения: C1, C2, C3, а также другие классификации.

На основе проявлений теплового метаморфизма хондриты подразделяются на шесть петрологических типов (рис. 46), хотя иногда добавляется седьмой: типы 1–2 описывают гидрологические альтерации (в сторону снижения выраженности воздействия), типы 3–7 описывают тепловой метаморфизм (в сторону возрастания выраженности воздействия). По мере воздействия, типу 1 соответствует наибольшая выраженность гидрологической альтерации. Типы 3–7 описывают выраженность термальной альтерации, где типы 6 и 7 соответствуют температурам метаморфизма, близким к температуре плавления. Тип 3 соответствует метеоритам, не подвергшимся гидрологическим альтерациям и тепловому метаморфизму, т. е. наиболее близких к исходному материалу (Van Schmus, Wood, 1967; Weisberg et al., 2006).

Стоит отметить, что на сегодняшний день не во всех хондритных группах обнаружен полный набор петрологических типов, более того, ряд метеоритов не вписывается в существующие критерии, будучи, к примеру, сначала подвергнутым гидрологической альтерации, а затем термической. В большинстве своем хондриты представлены геномиктовыми брекчиями (т. е. представлены материалом, относящимся к одной хондритной группе), в редких случаях – полимиктовыми брекчиями (т. е. сформированы материалом разных хондритных групп). Иногда хондритные брекчии могут быть геномиктовыми, но состоять из фрагментов различных петрологических типов (Weisberg et al., 2006; Bischoff et al., 2006).

Хондритовые брекчии, составляющие минеральную матрицу, подразделяются на: каменные, реголитовые, обломочные, импактные расплавленные, зернистые и примитивные (Krot et al., 2007).

Также стоит помнить об определенной условности деления метеоритов на типы, ибо результат метаморфизма зависит от длительности воздействия и конкретных исходных минералов.

В результате импактных событий (столкновения с другими телами, падения на поверхности планет и спутников) метеориты подвергаются шоковому (импактному) метаморфизму, приводящему к изменениям их минерального состава. Для оценки шокового метаморфизма оцениваются состояния оливинов, плагиоклазов и ортопироксенов, после чего им присваиваются значения по шкале S1-S6, плюс стадия расплавления (Krot et al., 2007).

Находясь на поверхности Земли, метеориты подвергаются тем же процессам эрозии, окисления и выветривания, что и земные породы. Для различения степени выраженности этих процессов применяется ряд классификаций, различающихся, впрочем, для каждого индивидуального класса метеоритов. По находкам метеоритов установлено, что в среднем антарктические образцы собираются спустя $\sim 10^5$ лет после падения, образцы, обнаруживаемые в горячих пустынях, находились там порядка 15–20 тыс. лет (Bland et al., 2006).

Классификация, используемая для антарктических метеоритов, различает их по степени выраженности окисления (Grossman, 1994): А – незначительная ржавость, В – умеренная ржавость, С – значительная ржавость.

Для классификации обыкновенных хондритов оцениваются их полированные срезы (Wlotzka, 1993): W0 – нет видимых следов окисления металлов и сульфидов, W1 – незначительное присутствие окисленных прожилок вокруг металлов и троилита, W2 – окисление порядка 20–60% металлов и троилита; W3 – значительная (60–95%) степень окисления металлов и троилита, W4 – весь металл и троилит окислены, но нет признаков окисления силикатов, W5 – начальные стадии альтерации мафических (с высоким содержанием Fe-Mg) силикатов, в основном вокруг щелей и трещин, W6 – высокая степень замещения силикатов глинистыми минералами и оксидами.

Система оценки степени выветривания углистых хондритов близка к системе, используемой для обыкновенных хондритов, однако углистые хондриты значительно менее устойчивы к воздействию земных факторов, а потому «земной» возраст собранных образцов значительно меньше. В случае углистых хондритов оцениваются степени обогащения/обеднения отдельными элементами (Br, I, Na, Sr, Bi, In, Cd, U и др.), изотопные составы (C, O), изменения в составах органических соединений и железосодержащих минералов, формирование сульфатных и карбонатных прожилок (Bland et al., 2006).

В контексте астробиологии отдельно также стоит выделить марсианские ахондриты, которым, как и в случае с углистыми хондритами, номенклатурно присваивается имя в соответствии с эталонным представителем группы:

- SHE – шерготтиты (эталон – Shergotty)
- NAK – нахлиты (эталон – Nakhla)
- CHA – шассиньиты (эталон – Chassigny)
- OPX – ортопироксениты (единственный представитель – ALH84001).

Марсианские метеориты представлены вулканическими (базальтовые шерготтиты и нахлиты) и плутоническими (шассиньиты, лерцолитные и некоторые оливин-содержащие шерготтиты, ALH84001) породами. Представление о планетарном происхождении основывается на сравнительно недавнем времени кристаллизации (диапазон от сотен миллионов лет до 1,3 млрд лет, с исключением в виде ALH84001, возраст кристаллизации которого составляет примерно 4,5 млрд лет), а обнаруживаемое сходство содержащихся в метеоритных телах газов с марсианской атмосферой указывает непосредственно на марсианское происхождение (Weisberg et al., 2006).

Сбор метеоритного материала

Лишь часть метеоритного материала собирается после наблюдения их падения, большинство же классифицируются как «находки», т. е. давно упавшие метеориты, но лишь недавно собранные и идентифицированные (таблица 7). Проще всего происходит сбор тех метеоритов, которые явно контрастируют с земными почвами и породами – т. е. железные и железокремнистые. Также относительно просто собирать метеориты на снежном покрове.

Таблица 7. Статистика падения метеоритов. Под упавшими понимаются те, падение которых зафиксировано визуально. Данные с сайта Международного общества метеорологии и планетологии на 10.11.2023. (URL: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>)

Классификация	Тип	Класс / Клан	Количество			
			Найденные	Упавшие	В Антарктиде	Всего
Каменные	Хондриты	С	3029	52	1344	68638
		О	60841	966	40974	
		Е	661	17	417	
	Ахондриты	Примитивные ахондриты	1020	9	218	
		Луна	648	0	44	
		Марс	361	5	30	
Железосодержащие	Ахондриты	Другие	1020	9	218	
		Палласиты	166	4	34	521
Железные	Ахондриты	Мезосидериты	344	7	63	
		Примитивные ахондриты	357	10	50	1076
Неклассифицированные / без группы		Ахондриты	683	26	98	
			417	54	78	471

Идентификация каменных метеоритов, как правило, затруднена по причине сложности их различения с земным материалом. При длительном нахождении метеоритов на поверхности Земли они подвергаются загрязнению (биологическому, индустриальному и др.), воздействию окружающей среды.

По оценкам ежегодно на Землю попадает ~2 000–2 500 метеоритов, однако порядка ~75% из них падает в океаны, а большая часть из оставшегося материала – в ненаселенные районы, где визуальное наблюдение падения может быть затруднено или невозможно. Как следствие, рост метеоритных коллекций происходит достаточно медленно.

Количественные оценки скорости привнесения внеземного вещества, как правило, основаны на микрометеоритах. Среди применяемых методов основными являются: атмосферные пробы, исследования осадков и астрономические наблюдения (Додд, 1986).

Отдельно стоит отметить влияние социо-экономических факторов на сбор метеоритных образцов. Местное население, принимая участие в сборе метеоритного материала, может как изымать метеоритные образцы (как для личных коллекций, так и с целью продажи на черном рынке), так и привносить объекты земного, или даже индустриального происхождения, иногда затрудняя последующие идентификацию и анализ собранных образцов.

При попадании метеоритов в официальные метеоритные коллекции происходит их внесение в реестры, они становятся государственным достоянием, подпадая под соответствующую законодательную базу. В России верификация ценности и подлинности метеоритов, в соответствии с законодательством, происходит в ГЕОХИ.

3.2. Органические соединения в углистых хондритах

Исследования углистых хондритов показали наличие в них широкого спектра органических молекул (составляющих до 5% от их веса), включающих в себя как простые, так и высокомолекулярные соединения. Преобладающей фракцией являются нерастворимые органические соединения, составляющие порядка 75%.

Растворимые органические вещества обычно извлекают путем промывки метеоритных порошков сверхчистой водой, водными кислотными или основными растворами, или органическими растворителями, как правило, при повышенных температурах. Полученные экстракты анализируются посредством методов хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией.

Анализ нерастворимых фракций требует более сложной химической обработки и применения различных инструментов аналитических методик, таких как: растворители и термическое извлечение органических веществ из метеоритов; газовая хроматография (GC) и масс-спектрометрия (MS); масс-спектрометрия с прямой лазерной десорбцией (LDMS); высокоэффективная

жидкостная хроматография (HPLC); ядерный магнитный резонанс (NMR); масс-анализатор ионно-циклотронного резонанса с Фурье-преобразованием (FTICR-MS); атомно-силовая микроскопия (AFM); флуоресцентная спектроскопия; инфракрасная спектроскопия; ультрафиолетовая спектроскопия; масс-спектрометры для определения изотопного состава (IRMS); матрично-активированная лазерная десорбция/ионизация (MALDI) и др.

Тем не менее, не существует универсального прибора или метода, с помощью которого можно определить весь спектр разнообразия присутствующих в образце органических соединений.

В углистых хондритах обнаружены многие классы соединений: алифатические и ароматические углеводороды, аминокислоты, карбоновые кислоты, сульфокислоты, фосфоновые кислоты, спирты, альдегиды, кетоны, сахара, амины, амиды, азотистые основания и даже белки. Большая часть знаний об органических веществах в метеоритах основана на исследованиях углистого хондрита Мурчисон (Murchison CM2) (Schmitt-Kopplin et al., 2010). Анализы упавших ранее метеоритов часто подвергались сомнению из-за возможности контаминации земными молекулами, однако в случае с Мурчисоном основная часть фрагментов Мурчисона была собрана сразу после его падения, поэтому вероятность его загрязнения земными материалами минимальна (Sephton, 2002).

Ароматические углеводороды (АУ)

Ароматические углеводороды на ранних этапах исследований определяли с помощью растворителей и термического извлечения в метеоритах Оргей (Orgueil C11), Мюррей (Murray CM2), Колд Боккевельд (Cold Bokkeveld CM2) и Альенде (Allende CV3), Мурчисон (Murchison CM2), Ямато-791198 (Yamato-791198 CM2) и Ямато-74662 (Yamato-74662 CM2).

Ряд полиароматических углеводородов (ПАУ) со средней и высокой молекулярной массой были обнаружены в метеоритах Мурчисон, Мигеи (Mighei CM2), Мюррей, Харипура (Haripura CM2) и Альенде с помощью LDMS. Также в них обнаружены нафталин, фенантрен, пирен, флуорантен и аценафтен и различные алкильные производные. Обнаружено преобладание трехкольцевых ПАУ в Ивуне (Ivuna C11).

Изотопный анализ углерода в АУ посредством GC-IRMS в метеоритах Мурчисон, Оргей, Колд Боккевельд, Асука-881458 (Asuka-881458 CM2), Тагиш Лейк (Tagish Lake C2 без группы) показал, что часть их имеет внеземное происхождение.

Алифатические углеводороды

В порых некоторых метеоритов (Оргей, Колд Боккевельд, Мюррей, Альенде, Мурчисон и др.) были обнаружены метан и другие алифатические соединения в диапазоне от C_1 до C_7 . Исследования показали, что часть алифатических углеводородов являются индигенными (обогащены дейтерием

и имеют характерные для внеземного материала значения δD). Дальнейшие исследования показали, что, как правило, метеориты, содержащие алканы, содержат также пристан и фитан, которые, как известно, могут формироваться только в ходе сложных реакций при участии ферментов (Nagy et al., 1961).

Более поздние исследования показали, что н-алканы в углистых хондритах являются земным засорением, количество которых уменьшалось по мере продвижения внутрь метеорита. Кроме того, результаты анализа метеорита Мурчисон в течение двух десятилетий после его падения показали, что большинство метеоритных органических соединений характеризовалось изомерным разнообразием, а структурная специфичность н-алканов не соответствовала этой общей черте. Также у алканов в метеоритах CM2 отсутствует отчетливое увеличение или уменьшение значений $\delta^{13}C$, зависимое от числа атомов углерода, которое характерно для других классов соединений в CM2 метеоритах. Изотопный анализ н-алканов в метеорите Тагиш Лейк тоже указывает на земное происхождение.

Аминокислоты

Первые сообщения об обнаружении аминокислот в метеоритах датируются 1961 г. (Nagy et al., 1961), но в тот момент были интерпретированы как засорение. Более поздние исследования аминокислот в метеорите Мурчисон показали, что они представлены рацематом, что явно указывало на их индигенность.

К настоящему времени в метеоритах обнаружено ~100 аминокислот, большинство которых редки или отсутствуют в биосфере (Glavin et al., 2019). Исследования осуществляются посредством ионообменной хроматографии, ГХ и ГХ-МС и др. методов. Аминокислоты представлены молекулами обеих хиральностей с небольшим перевесом в пользу левых энантиомеров (Pizzarello, 2006).

Многие протеиногенные аминокислоты, а также ряд аминокислот, не имеющих известной функции в земной биологии, были обнаружены в метеоритах Оргей, Мурчисон, Агуас Заркас (Aguas Zarcas CM2), Тагиш Лейк и многих других. Лишь семь (Gly, Ala, Asp, Glu, Leu, Pro и Val) из 20 стандартных протеиногенных аминокислот были обнаружены в результате кислотного гидролиза фрагментов Оргея.

Наибольшую результативность в поиске органики показывают исследования метеорита Мурчисон. К 2002 г. в нем было обнаружено более семидесяти аминокислот, и только восемь из них обнаружены в земных белках, и еще 11 являются редкими для земной биоты. Остальные аминокислоты, по-видимому, уникальны для углистых хондритов. Анализ аминокислотной фракции показал высокие значения δD (1370‰) и $\delta^{15}N$ (90‰), что не свойственно земным аминокислотам, но характерно для известных межзвездных молекул. Более поздние изотопные измерения аминокислот в метеорите подтвердили, что они имели D-обогащение, следовательно, эти молекулы или их предшественники появились раньше Солнечной системы. Значения $\delta^{13}C$ аминокислот в Мурчисоне (и в Оргее) указывают на их внеземное происхождение.

Одним из «наименее засоренных» является метеорит Уинчкомб (Winchcombe CM астероидного происхождения), упавший в Англии в 2021 г., так как первые образцы были собраны спустя несколько часов после падения. В нем обнаружены углерод- и азотсодержащие органические вещества, включая растворимые белковые аминокислоты (King et al., 2022).

Карбоновые кислоты

В Мурчисоне с помощью ГХ-МС обнаружены низкомолекулярные ($<C_9$) монокарбоновые кислоты. Также обнаружено до 40 видов алифатических дикарбоновых кислот, многие из которых представлены в виде рацемата. Дикарбоновых кислот на 1–2 порядка было больше, чем аминокислот. Алифатические и ароматические монокарбоновые кислоты найдены в Ямато-791198, Ямато-74662 и Асука-881458.

Согласно изотопному анализу, карбоновые кислоты из Мурчисона и Тагиш Лейк имеют внеземные значения δD и $\delta^{13}C$, указывающие на их индигенность. Высокое содержание D указывает на то, что исходные вещества для альдегидов, кетонов, аммиака и цианистого водорода возникли в межзвездном пространстве.

Спирты, альдегиды, кетоны, сахара, амины

Спирты были обнаружены в Мюррее и Орgee с помощью масс-спектрометрии с термозэкстракцией. В 1976 г. в Мурчисоне с помощью колориметрии, ГХ и ГХ-МС обнаружили метанол, этанол, изопропанол и бутиловые спирты. Карбонильные соединения впервые были обнаружены с помощью ИК-спектроскопии в Мюррее и Орgee (С11). Позднее в Мюррее обнаружили небольшие количества альдегидов и кетонов. В Альенде (CV3) с использованием колориметрического метода был обнаружен формальдегид. В Мурчисоне были обнаружены ароматические кетоны, которые могли образоваться из ароматических углеводородов в результате реакций окисления, происходящих в межзвездном пространстве или во время водного изменения в родительском теле метеорита. Свободные сахара обнаружены в Мюррее, Орgee и Мурчисоне.

В Мурчисоне также были обнаружены амины, амиды монокарбоновых кислот, моноамиды дикарбоновых кислот, амиды гидроксикислот, лактамы, карбоксиллактам, лактимы и небольшие количества N-ацетиламино кислот и гидантоинов. Подтверждено наличие многих соединений внеземного происхождения.

Азотистые основания и гетероциклы

В метеорите Оргей были обнаружены пурины (аденин и гуанин) и гуанилмочевина, а также триазины, меламин и аммелин, не имеющие известного биологического значения. Обнаружены также некоторые необычные и исключительно небιологические пиримидины, в частности, 4-гидроксипиримидин, в Мурчисоне, Мюррее и Орgee. Позже идентифицировали урацил во всех трех

метеоритах. В Мурчисоне было установлено несколько классов основных и нейтральных N-гетероциклов, в том числе пурины (ксантин, гипоксантин, гуанин и аденин), пиримидины и хинолины/изохинолины.

Нестабильные основания цитозин и тимин ни в Оргее, ни в других углистых метеоритах обнаружены не были. При 0 °С период полураспада более стабильных оснований (аденина, гуанина и урацила) превышает 1 млн лет, в то время как для цитозина это время составляет примерно 17 000 лет. Отсутствие тимина и цитозина в Оргее указывает на то, что материал метеорита не подвергался контаминации современными живыми, или недавно умершими, земными микроорганизмами.

Белки

В 2015 г. в метеоритах Альенде и Мурчисон был обнаружен полимер, содержащий три аминокислоты, представленные в виде рацемата: глицин, α -гидроксиглицин и аланин. Для их определения использовался метод времяпролетной масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной десорбцией/ионизацией (MALDI-TOF MS).

В 2020 г. был обнаружен первый внеземной белок (гемолитин) в метеорите Акфер 086 (Acfer 086 CV3) (McGeoch et al., 2020). Его структура включает в себя цепи глицина и гидроксиглициновых остатков, на концах которых расположены атомы железа с дополнительными атомами кислорода и лития. Повышенное отношение D/H указывает на внеземное происхождение белка.

В 2021 г. в метеоритах Акфер 086, Альенде и Каба (Kaba CV3) обнаружены полимеры амидов с белковым остовом, состоящий из глициновых звеньев и железа (McGeoch et al., 2021). Были выделены две молекулярные структуры: гемолитин с массой 2320 Да, состоящий из глицина, гидроксиглицина, Fe, O и Li, и гемолицин (1494 Да) с аналогичным составом, но без лития.

Выводы

Широкий спектр обнаруженных в углистых хондритах индигенных органических соединений (от простых до сложных, служащих основой земной жизни) служит еще одним доказательством в пользу возможности протекания процессов пребиотического синтеза в космическом пространстве. Не исключена роль метеоритов как катализаторов этого синтеза, также метеориты рассматриваются как возможный фактор возникновения гомохиральности. И наконец, еще раз стоит упомянуть о роли метеоритов (и их родительских тел) в процессе переноса пред- и биологического вещества в космическом пространстве.

3.3. Морфология прокариот

Одними из наиболее значимых направлений в астробиологии являются бактериально-палеонтологические исследования земных горных пород и метеоритов. Благодаря микроскопическим размерам ископаемые бактерии и гликокаликс не только могут прекрасно сохраняться в ископаемом состоянии, но и способны сохранять свою форму, после того как вмещающие породы подверглись процессу метаморфизма.

В палеонтологии при анализе микрофоссилий для выяснения их систематического положения и отличия от абиогенных структур важнейшими диагностическими характеристиками являются морфологические – форма и размер.

Размеры клеток большинства прокариот составляют 0,5–10 мкм, однако размеры некоторых прокариотических клеток не превышают 0,3 мкм (род *Mycoplasma*), а диаметр некоторых ультрамикробактерий составляет всего 150–200 нм. Среди наиболее крупных представителей прокариот можно упомянуть *Thiomargarita namibiensis*, имеющих шарообразную форму и достигающих 750 мкм в диаметре, а также *Thiomargarita magnifica*, достигающих 2 мм в длину.

По форме прокариотические клетки делятся на следующие основные группы: кокки, палочковидные, изогнутые, извитые, нитевидные, стебельковые, полигональные, бугристые и плеоморфные формы (рис. 47) (Астафьева и др., 2021; Захарова и др., 2015; Пиневич, 2006, 2009).

Кокки – клетки, сферической или субсферической формы. Могут быть одиночными (**монококки**) или сгруппированными попарно (**диплококки**), в виде цепочек (**стрептококки**), пакетами по четыре (**тетракокки**, или **тетрады**), кубовидно – в результате деления клеток в двух плоскостях (**сарцины**), гроздьями (**стафилококки**). Эллипсоидальные формы называются **коккобаццилами**.

Палочковидные формы – прямые, удлиненные клетки. Выделяют неспорообразующие палочковидные **бактерии** и **бациллы** – палочковидные формы, образующие споры. При расположении споры в центре клетки центральная часть клетки может утолщаться и приобретать вид веретена (**кlostридиальный тип спорообразования**), либо не изменять свою форму (**бацилярный тип спорообразования**). Если спора образуется в конце клетки (**плектридиальный тип спорообразования**), клетка приобретает вид барабанной палочки. Могут встречаться поодиночке (**монобактерии** и **монобациллы**), группироваться попарно (**диплобактерии** и **диплобациллы**), в виде цепочек клеток (**стрептобактерии** и **стрептобациллы**), в виде частокола (**палисады**). Некоторые палочковидные формы могут ветвиться. **Изогнутые формы (вибрионы)** могут иметь форму запятой или изогнутой палочки. Существуют также **кольцеобразно-изогнутые** формы.

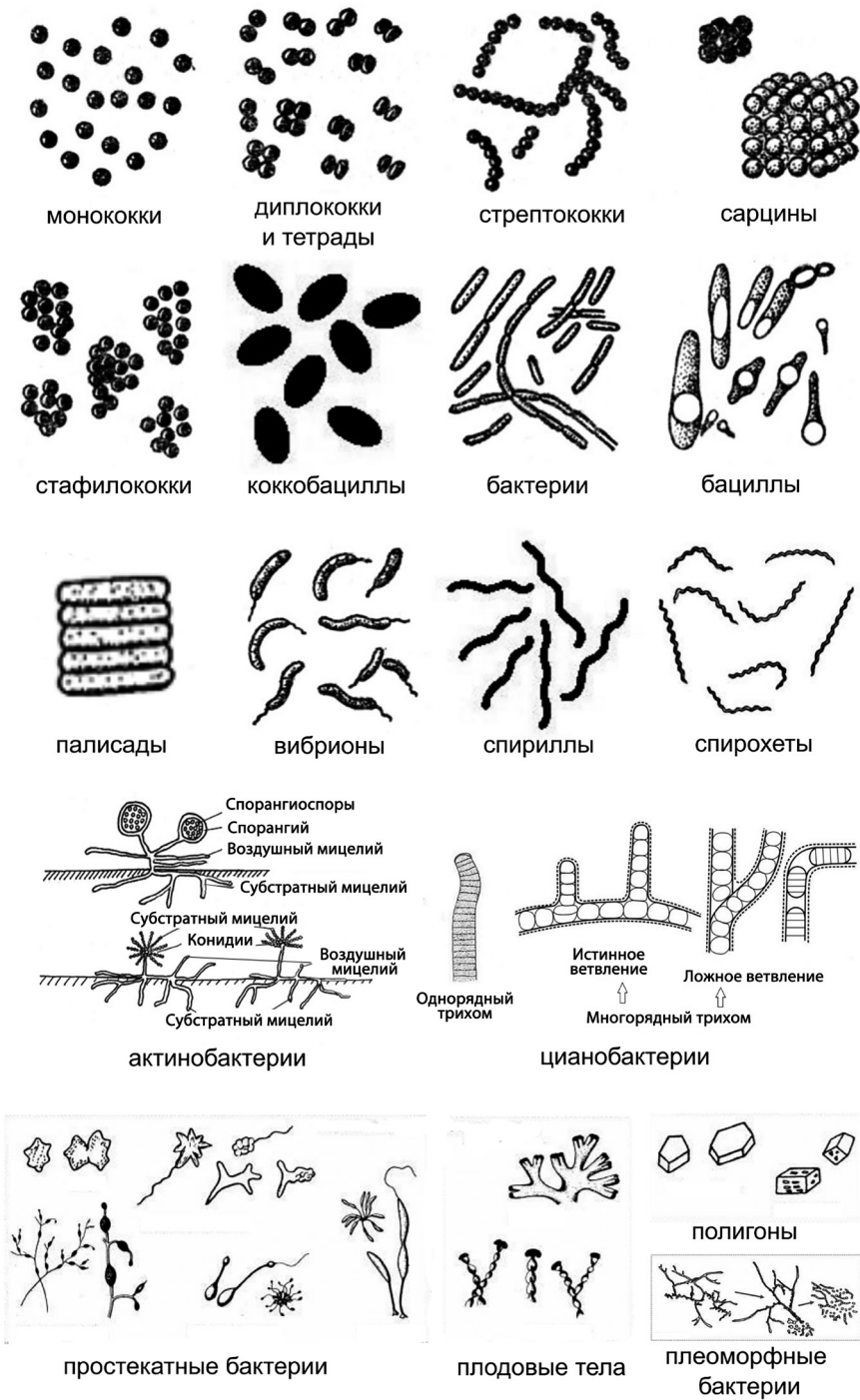


Рис. 47. Морфологическое разнообразие прокариот (с изм.) (Астафьева и др., 2021; Нетрусов, Котова, 2023; Wahid, Khan, 2020).

Извитые формы – вытянутые, штопорообразно-закрученные клетки. Представлены спириллами и спирохетами. **Спириллы** образуют 3–5 грубых завитков, **спирохеты** характеризуются многочисленными тонкими завитками.

Нитевидные формы – очень длинные, тонкие бактерии; могут ветвиться. Актинобактерии образуют грибоподобный ветвящийся **мицелий**, который может быть погруженным в питательную среду – субстрат (**субстратный мицелий**) – или находиться над субстратом (**воздушный мицелий**). Цианобактерии образуют **трихом** – нитевидный или сфероидный агрегат клеток, покрытый общей мембраной. Нитевидный трихом может быть неветвящимся или ветвящимся. Неветвящийся трихом состоит из одного ряда клеток и называется **однорядным**. Ветвящийся (**многорядный**) трихом образуется в результате деления клеток в разных плоскостях и представляет собой однорядную нить с однорядными боковыми трихомами. При **ложном ветвлении** не происходит деление клеток в разных плоскостях, здесь разные нити прикрепляются друг к другу под углом.

Стебельковые формы образуются при помощи конических или нитевидных выростов: клеточных стебельков (простек) или внеклеточных слизистых стебельков. При наличии нескольких простек клетки могут иметь звездообразную форму. Миксобактерии при неблагоприятных условиях формируют **плодовые тела** – скопления резистентных покоящихся форм (миксоспор), окруженных массой слизи. Форма плодовых тел от сферической до древовидно-разветвленной.

Существуют также **дисковидные формы** (поперечное сечение дисков может быть круглым, эллипсовидным, полукруглым, лопастным), **полигональные формы** (треугольные, прямоугольные и т. д.) и **бугристые формы**. **Плеоморфные** прокариоты имеют разную форму на разных стадиях жизненного цикла, отличаются большой морфологической изменчивостью.

Некоторые группы прокариот демонстрируют признаки морфофункциональной клеточной дифференциации. **Метаболически активные дифференцированные формы** отличаются высоким уровнем обмена веществ и относительно низкой резистентностью к неблагоприятным условиям окружающей среды. Для **резистентных покоящихся форм** характерны низкая метаболическая активность и высокая устойчивость к агрессивным факторам окружающей среды.

Метаболически активные дифференцированные формы служат либо для бесполого размножения (беоциты и гормогонии), либо для снабжения вегетативных клеток соединениями азота (гетероцисты, диазоциты, бактериоиды и везикулы). **Беоциты** образуются в результате дробления одной очень крупной материнской клетки; выделяют **подвижные** (без чехла) и **неподвижные** (с чехлом) беоциты. **Гормогонии** – короткие дочерние трихомы, не покрытые чехлом и состоящие из клеток, меньших по размеру, чем вегетативные клетки родительского трихома. **Гетероцисты** формируются при азотном голодании у некоторых цианобактерий; характеризуются отсутствием способности

к делению и оксигенному фотосинтезу; умирают в результате запрограммированной смерти; покрыты многослойным чехлом. **Диазоциты** образуются при недостатке азота в центральной части трихома ряда цианобактерий, способны к возврату к вегетативному состоянию. **Бактероиды** – дифференцированные клетки клубеньковых бактерий, расположенные в вакуолях растительных клеток, имеют неправильную разветвленную форму; способность к делению отсутствует. **Везикулы** симбиотических актинобактерий формируются на субстратном мицелии, могут быть сферической, грушевидной, булавовидной или нитевидной формы, имеют наружный чехол, отграничивающий их от внутренней среды растительной клетки хозяина.

Основная функция резистентных покоящихся форм – переживание неблагоприятных условий и пространственное расселение. К данной группе клеток относятся цисты и эндоспоры.

Цисты – округлые клетки с несколько сниженным метаболизмом и умеренно повышенной резистентностью по сравнению с вегетативными клетками; характеризуются формированием защитных покровов и способностью прорасти с образованием дочерних вегетативных клеток.

Цисты прокариот, образованные путем почкования вегетативной клетки, называются **экзоспорами**. Могут располагаться либо непосредственно на концах гиф субстратного или воздушного мицелия одиночно, попарно или в виде цепочек; либо внутри специализированной структуры – **спорангия**. В последнем случае они называются **спорангиоспорами**. Экзоспоры могут быть неподвижными (**конидии**, или **артроспоры**) или передвигающимися при помощи жгутиков (**зооспоры**).

Миксоспоры, или **миксоцисты** – цисты сферической или палочковидной формы, образующиеся в плодовых телах миксобактерий. В силу компактности расположения, прорастая, миксоспоры дают начало сразу новой популяции.

Цисты цианобактерий (**акинеты**) – крупные сферические или эллипсоидальные клетки, покрытые толстым двуслойным чехлом.

Галоцистами называются цисты экстремально галофильных архей, представленные группами округлых клеток, окруженных общим чехлом. Галоцисты образуются при понижении солености.

Эндоспоры – резистентные покоящиеся формы, образованные за счет поглощения одной клетки (**преспоры**) другой (**материнской клеткой**). При этом внешняя (материнская) клетка подвергается запрограммированной клеточной смерти и становится спорангием, а внутренняя (преспора) – эндоспорой. Эндоспоры характеризуются повышенной резистентностью к экстремальным условиям внешней среды и имеют специфические многослойные покровы.

К **придаточным структурам** прокариотических клеток можно отнести покровы и поверхностные органеллы. **Покровы** – полисахаридные (реже белковые) структуры, окружающие отдельные клетки, клеточные агрегаты, трихомы или группы трихомов. Среди покровов выделяют чехлы, капсулы и слизи. **Чехлы** – слизистые покровы с четкой внешней границей,

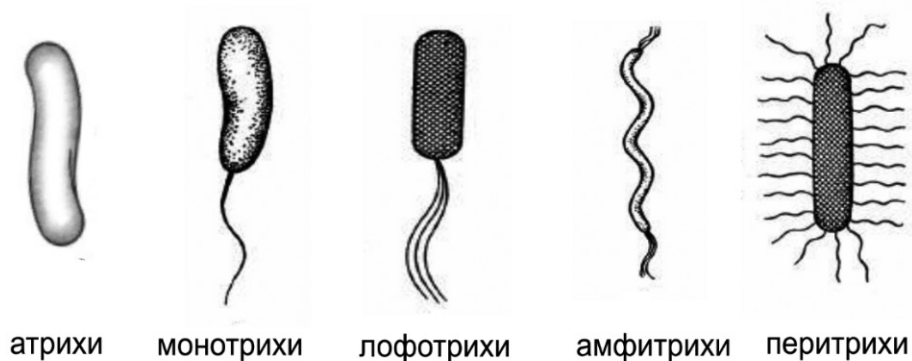


Рис. 48. Основные типы жгутикования прокариот (с изм.) (Астафьева и др., 2021).

не прилегающие к поверхности клетки; имеют упорядоченную структуру; часто состоят из нескольких слоев. **Капсулы**, в отличие от чехлов, прилегают к клеточной поверхности и слабо структурированы. **Слизи** характеризуются неопределенной морфологией, отсутствием тесного контакта с поверхностью клетки.

Поверхностные органеллы могут быть представлены жгутиками или фимбриями.

Жгутики, или **флагеллы**, – органеллы движения в виде подвижных нитевидных структур диаметром 10–60 нм и длиной 3–15 мкм. По количеству жгутиков выделяются прокариоты без жгутиков (**атрихи**), с одним полярным жгутиком (**монотрихи**) или множеством жгутиков (**политрихи**). В последнем случае может присутствовать пучок жгутиков, расположенный на одном полюсе клетки (**лофотрихи**), на противоположных полюсах (**амфитрихи**) или по всей поверхности клетки (**перитрихи**) (рис. 48).

Фимбрии, или **пили**, – нитевидные контактные структуры диаметром 3–10 нм и длиной до 20 мкм. Фимбрии могут служить для обмена генетическим материалом между бактериальными клетками в ходе конъюгации, а также для прикрепления к субстрату или другим клеткам.

3.4. Бактериальная палеонтология и исследования метеоритов

История бактериально-палеонтологических исследований берет свое начало с 60-х гг. XX в., когда Э. Баргхурн с коллегами опубликовал ряд работ по докембрийским бактериям (Barghoorn, Schopf, 1965; Barghoorn, Tyler, 1965; Schopf et al., 1965 и др.). В то время микрофоссилии изучались преимущественно под световым микроскопом в шлифах или после мацерации. Современный этап развития бактериальной палеонтологии (Розанов, Жегалло, 1989; Розанов, Заварзин, 1997; Розанов, 1999; Абызов и др., 2002 и др.) характеризуется активным использованием сканирующей электронной микроскопии.

Первые работы по фоссильным остаткам микроорганизмов в метеоритах были опубликованы 1960-х гг. (Claus, Nagy, 1961; Nagy et al., 1961; Palik, 1962; Timofejev, 1963). Вторая половина 1990-х гг. ознаменовалась началом активного микропалеонтологического изучения метеоритов при помощи методов сканирующей электронной микроскопии (McKay et al., 1996; Розанов, 1996; Жмур и др., 1997; Hoover, 1997; Hoover et al., 1998; Герасименко и др., 1999). К настоящему времени накоплен обширный материал по ископаемым микроорганизмам в метеоритах, в особенности в углистых хондритах.

Согласно данным, полученным в ходе микропалеонтологического исследования углистых хондритов (Розанов, 1996; Жмур и др., 1997; Герасименко и др., 1999; Hoover et al., 2018; Hoover, Rozanov, 2002; Астафьева и др., 2011; Розанов и др., 2020), микрофоссилии в них могут быть представлены как остатками прокариот (кокки, бациллы, спириллы, нитевидные формы, псевдонитевидные формы, полу- и субсферические формы, гифы актиномицет), так и эукариот (акритархи и акритархоподобные формы, одиночные и колониальные прازیнофиты, спороподобные формы, пеннатные диатомеи, диатомоподобные фрагменты, раковинные амебы и альвеоляты) (рис. 49–64, таблица 8). Кроме того, в метеоритах Оргей и, возможно, Ногойя были обнаружены магнитотактические бактерии.

На то, что ископаемые микроорганизмы из метеоритов имеют внеземное происхождение, указывают следующие факты: микрофоссилии, найденные в углистых хондритах, имеют морфологические отличия от земных аналогов и, в частности, объекты, обнаруженные в метеоритах, значительно, зачастую в разы, меньше; исследования микрофоссилий под сканирующим электронным микроскопом проводятся по свежим сколам, для выявления земной контаминации используется EDS-анализ, к тому же известно, что в метеорите Оргей концентрация микрофоссилий очень велика, хотя следы земного засорения крайне незначительны (Aerts et al., 2016); возраст углистых хондритов сопоставим с возрастом Солнечной системы, а наиболее древние

представители таксонов-аналогов на Земле появились значительно позже; родительскими телами для углистых хондритов были различные астероиды и кометы. Таким образом, попадание изучаемых микрофоссилий в метеориты путем земного происхождения этих метеоритов или путем контаминации метеоритов после падения на Землю исключается. Вероятность контаминации углистых хондритов земными микроорганизмами во время их странствия в космическом пространстве ничтожно мала. Если рассмотреть эту вероятность, то морфологические отличия от земных форм и обилие микрофоссилий в метеоритах указывают на то, что метеоритные формы не могут быть земными фоссилиями, которые, уже будучи окаменелыми, каким-то образом загрязнили родительские тела метеоритов во время их полета в космосе, следовательно, жизнедеятельность этих организмов протекала в условиях за пределами Земли.

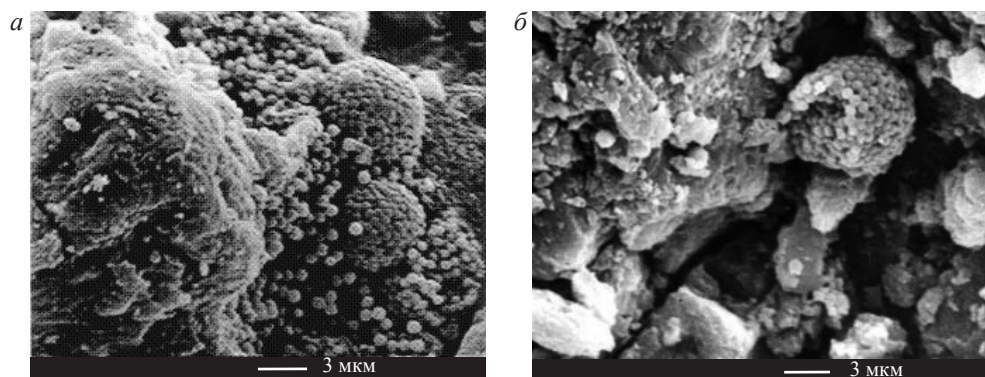


Рис. 49. Метеорит Алаис (С11): *а*, *б* – фрамбоиды пирита; размер кристаллов, слагающих фрамбоиды не превышает 1 мкм. На Земле такие фрамбоиды образуются из органики в отсутствие кислорода (Астафьева и др., 2011).

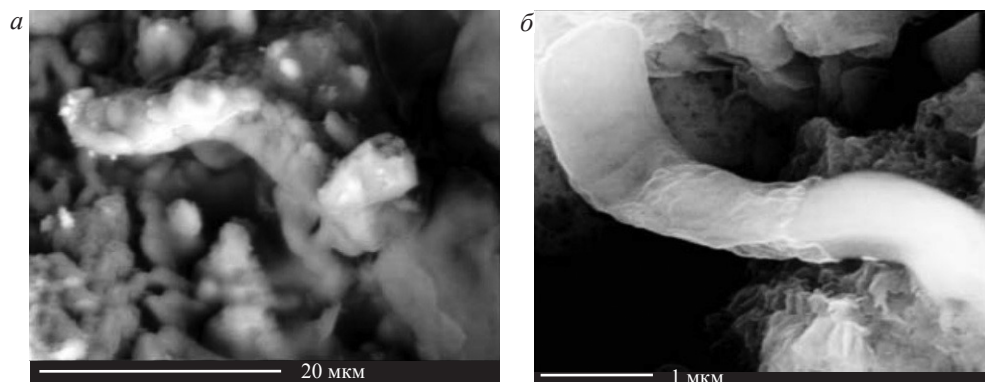


Рис. 50. Метеорит Ивуна (С11): *а* – нитевидные формы диаметром 5 – 7 мкм; *б* – уплощенно-изогнутая нитевидная форма (спирилла) шириной 0,7–1 мкм (Астафьева и др., 2011).

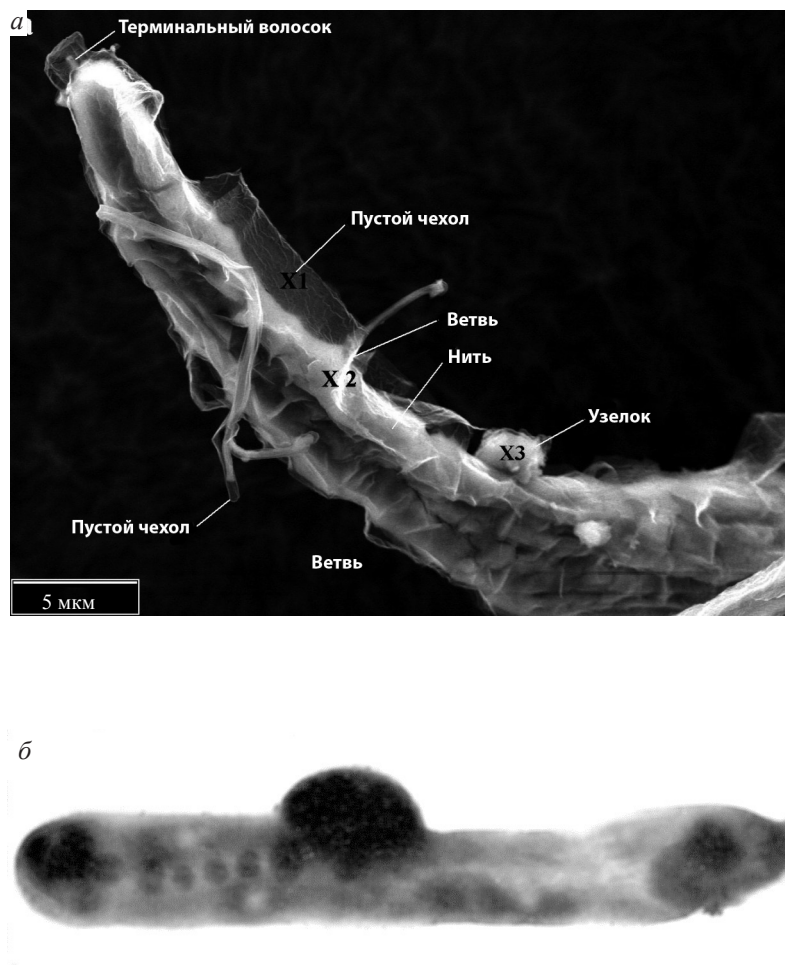


Рис. 51. Метеорит Оргей (С11): *а* – расслоенный чехол с нитями (шириной 8 мкм, сужающейся до 3 мкм на вершине), присутствует апикальный волосок и узелки (Розанов и др., 2020); *б* – магнитотактическая бактерия, видны домены магнетита (Tan, Van Landingham, 1967).

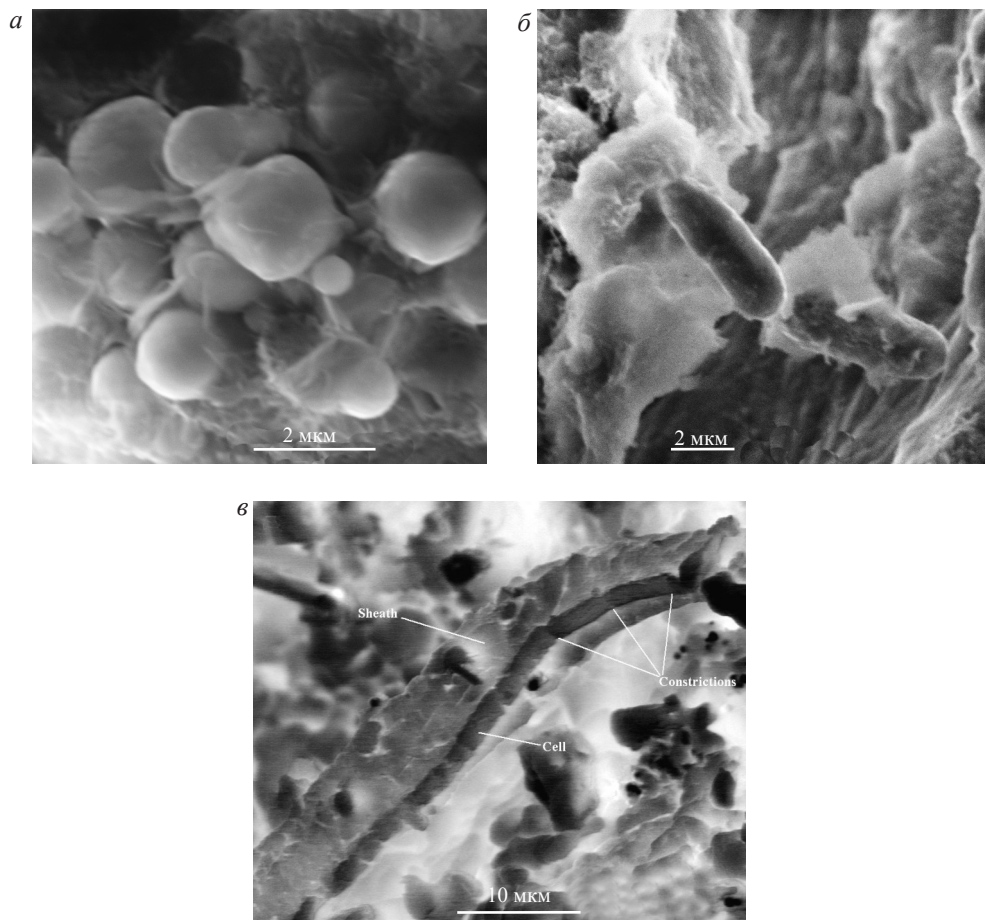


Рис. 52. Метеорит Оргей (CI1): *a* – кокковидные формы размером 0,5–2 мкм; компактное расположение и значительный диапазон размеров клеток, а также наличие окружающей фоссилизированной органической пленки указывает на то, что клетки фоссилизировались на разных стадиях роста за очень короткий промежуток времени, *б* – две палочковидные формы длиной около 5 мкм, диаметром 1,5–2 мкм; *в* – нитевидная цианобактериальная форма с толстым (9 мкм в ширину) чехлом и трихомом с линейной цепочкой клеток (диаметр 1,8 мкм × 5,5 мкм), с закругленными концами и характерными поперечными сужениями (изображение получено при помощи BSE-детектора СЭМ с полевой эмиссией) (Розанов и др., 2020).

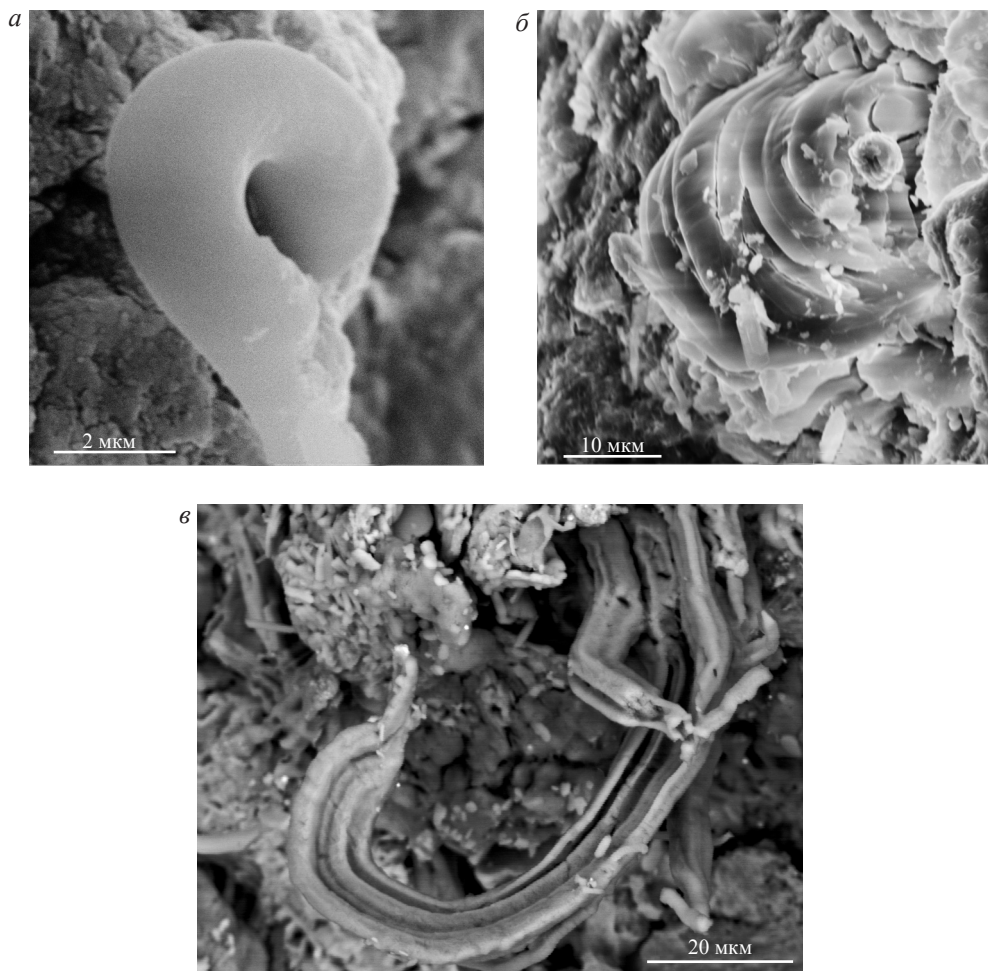


Рис. 53. Метеорит Оргей (CI1): *а* – нитчатый бактериальный микроорганизм, толщина нити около 2 мкм; спиральный бактериальный микроорганизм, сходный с вымершим родом *Obruchevella*; *б* – спиральный микроорганизм; *в* – нитчатые цианобактерии с множественными трихомами в общем чехле (Розанов и др., 2020).

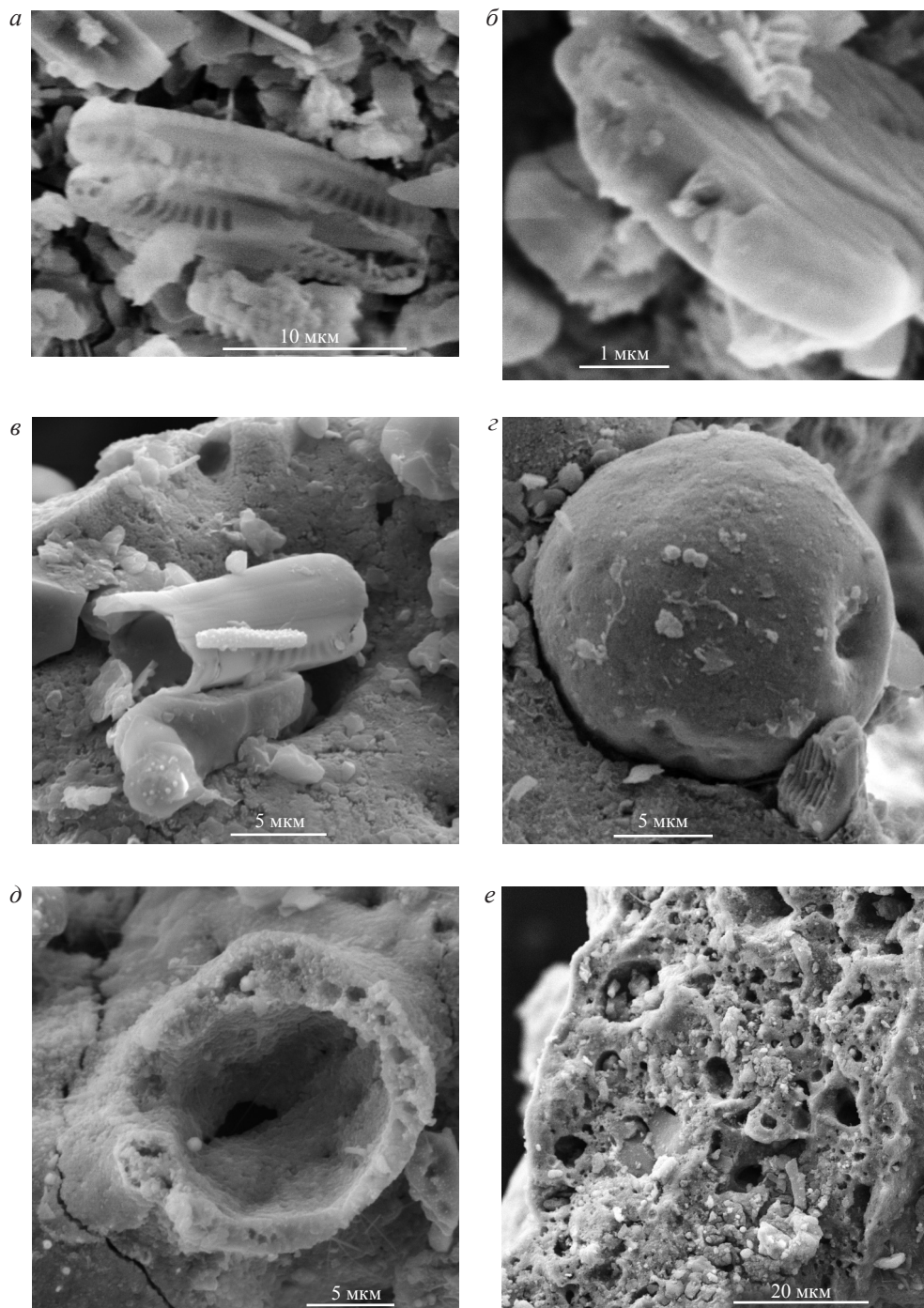


Рис. 54. Эукариотические формы в метеорите Оргей (С11): *а* – два панциря пеннатных диатомей; *б* – пеннатная диатомея, покрытая эпсомитом; *в* – фрагмент панциря пеннатной диатомеи; *з* – клетка прازیнофита сферической формы с порами; *д* – одиночный прازیнофит, трубчатая форма; видна двойная стенка с порами; *е* – колония прازیнофитов (Розанов и др., 2020).

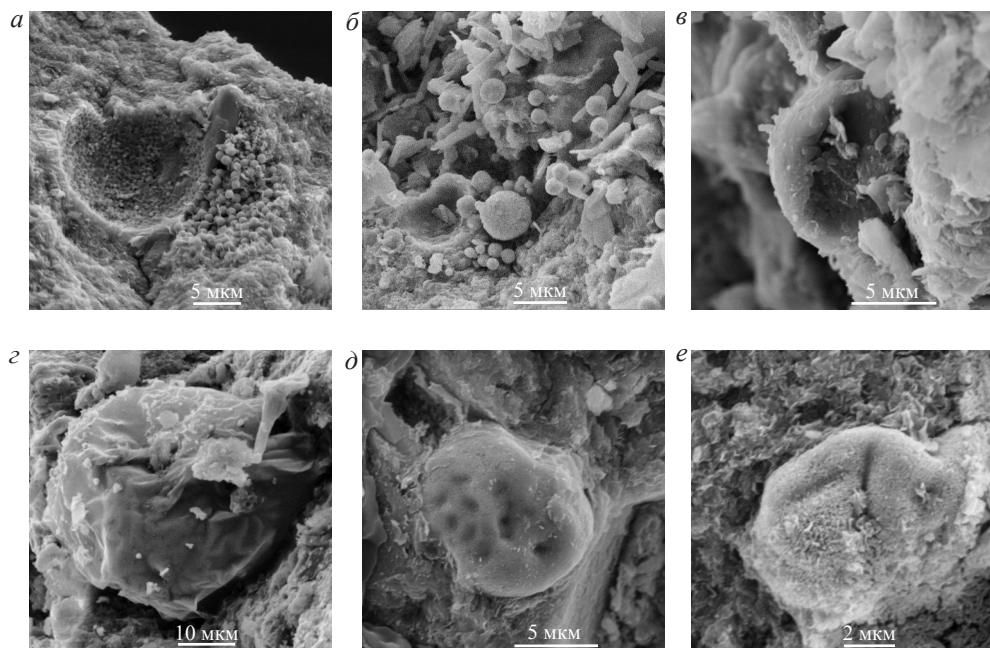


Рис. 55. Эукариотические формы в метеорите Оргей (С11): *a* – фрагмент стенки полого сферического объекта (эукариотической клетки) диаметром около 19 мкм с коротким отростком; толщина стенки около 2–2,5 мкм; объект ранее был заполнен кристаллами магнетита, видны остатки органической пленки; *b* – эукариотические клетки сферической формы разной размерности (1–3 мкм); крупная клетка около 5 мкм в диаметре, имеет короткий отросток; *c* – мешковидная форма со складкой смятия, возможно акритарх; *d* – крупная (около 40 мкм) эукариотическая клетка мешковидной формы со складками смятия; *e* – спороподобная форма с ямками; *f* – мешковидная форма с бороздами, напоминающими щель разверзания (Розанов и др., 2020).

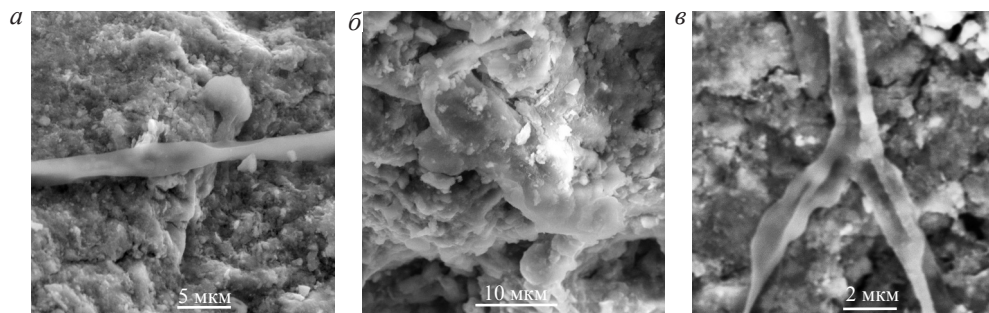


Рис. 56. Метеорит Агуас Заркас (СМ2): *а, б, в* – полые чехлы цианобактерий диаметром 2–8 мкм.

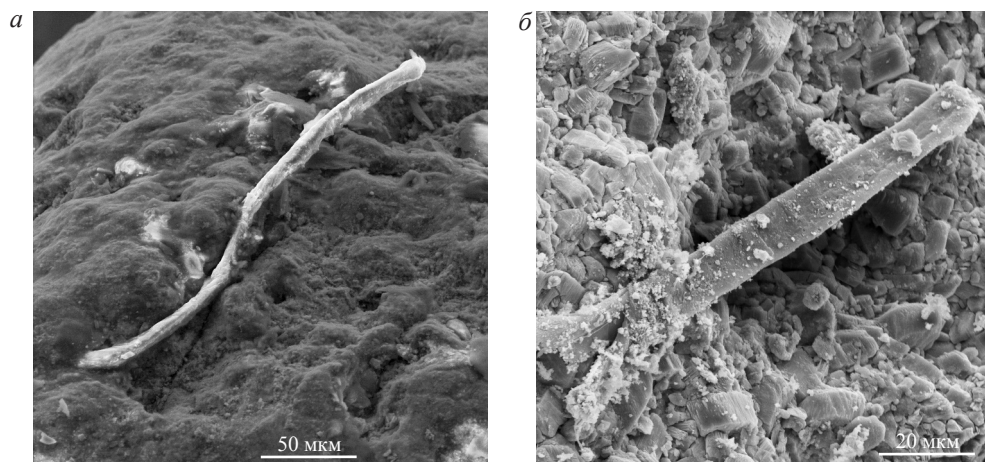


Рис. 57. Метеорит Джбилет Винсельван (СМ2): *а, б* – нитевидные формы диаметром 10–15 мкм.

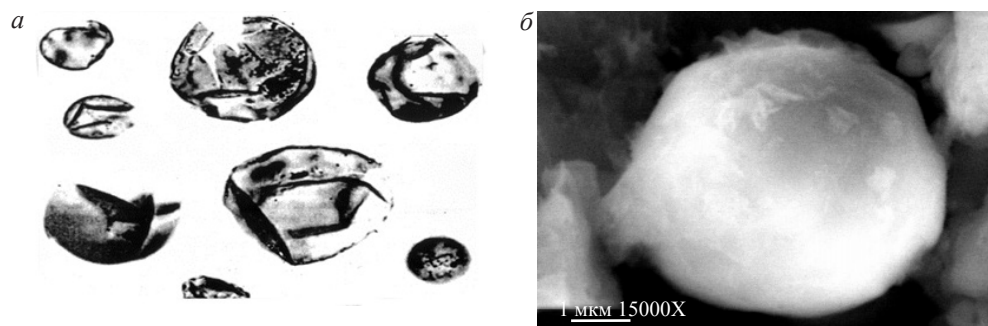


Рис. 58. Метеорит Мигей (СМ2): *a* – акритархоподобные формы (Timofeev, 1963),
b – акритархоподобные формы (Астафьева и др., 2011).

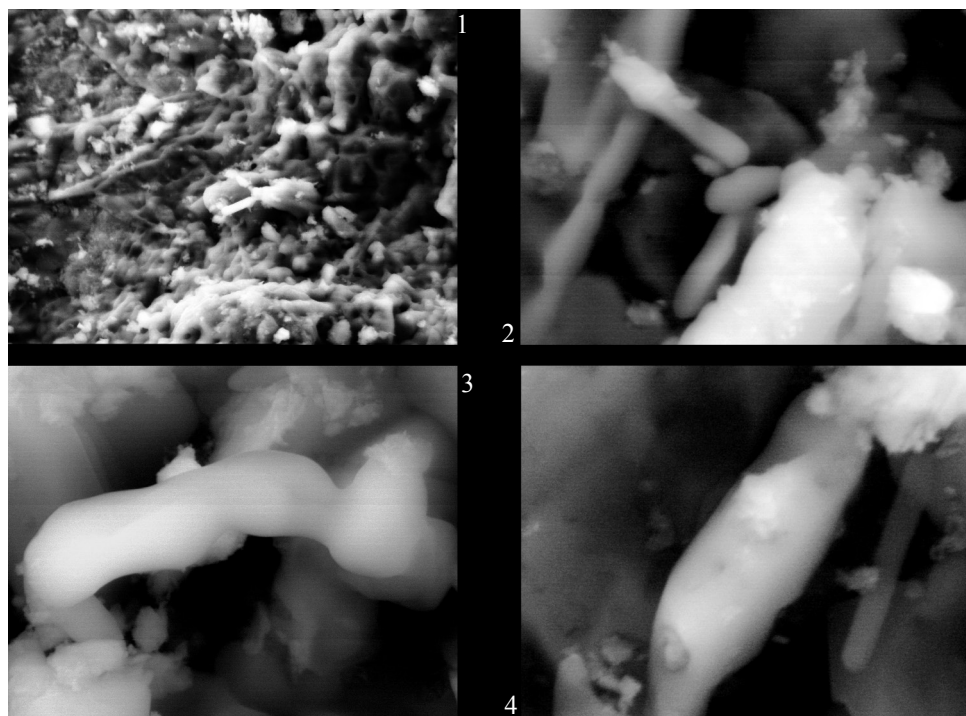


Рис. 59. Метеорит Ногойя (СМ2): 1–4 нитевидные формы (длина до 40 мкм, диаметр ~2 мкм),
 образованные шаровидными или овальными клетками возможно, серобактерии (поле обзора
 100 мкм) (Астафьева и др., 2011).

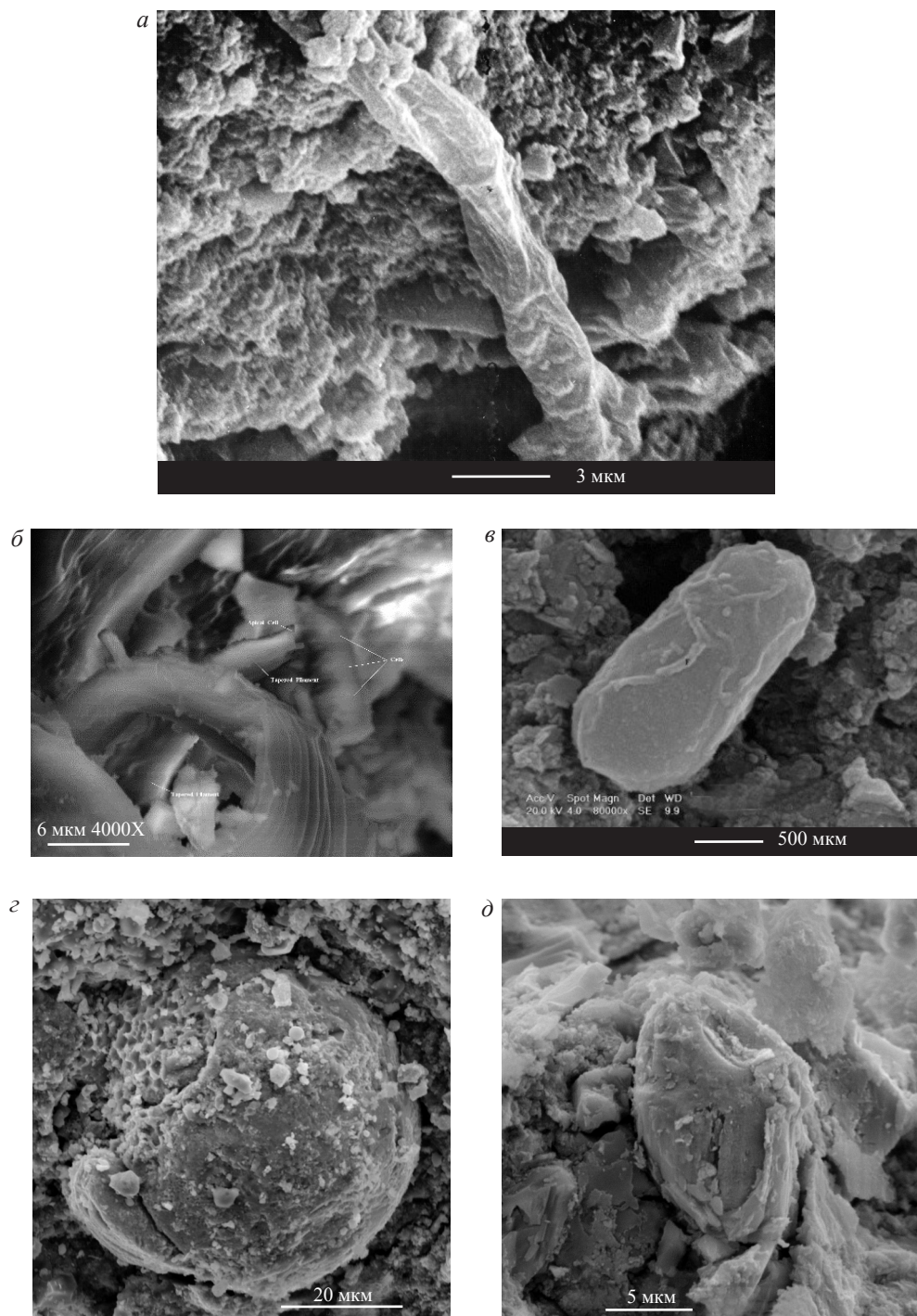


Рис. 60. Метеорит Мурчисон (СМ2): а, б – нитевидные формы (Астафьева и др., 2011); в – палочковидная форма с остатками предположительно жгутиков (Hoover et al., 2004); г – празиофит; д – альвеолята.

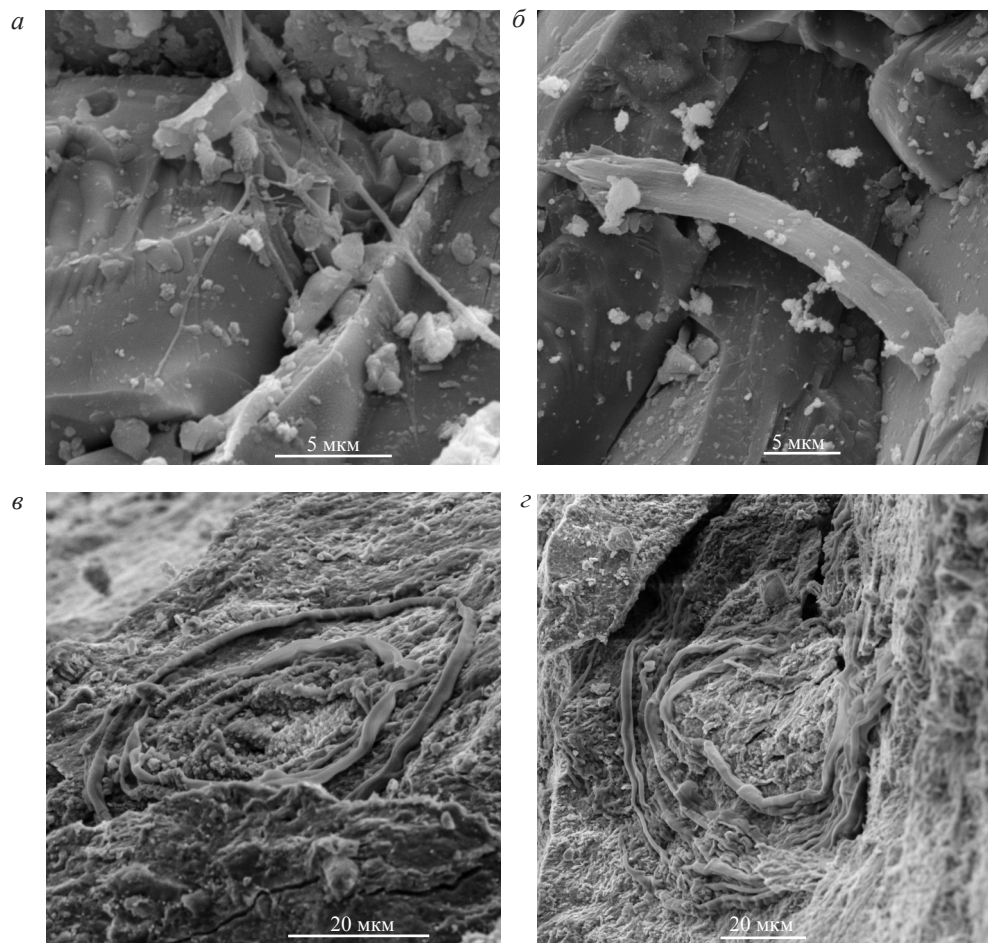


Рис. 61. Метеорит Саттерз Милл (СМ2): *а, б* – нитевидные формы; *в, г* – нитевидные кольцеобразно-свернутые формы, представленные чехлами цианобактерий.

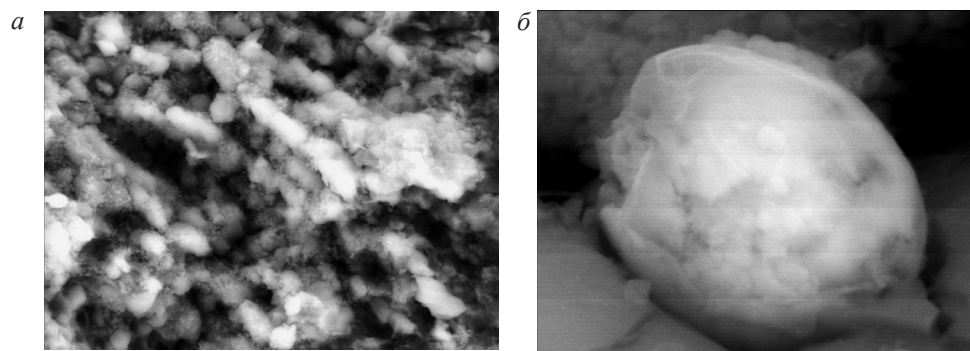


Рис. 62. Метеорит Мюррей (СМ2): *а* – короткие нити, состоящие из овальных или шарообразных клеток (поле обзора 54 мкм); *б* – овальная форма с отростком (поле обзора 10 мкм) (Астафьева и др., 2011).

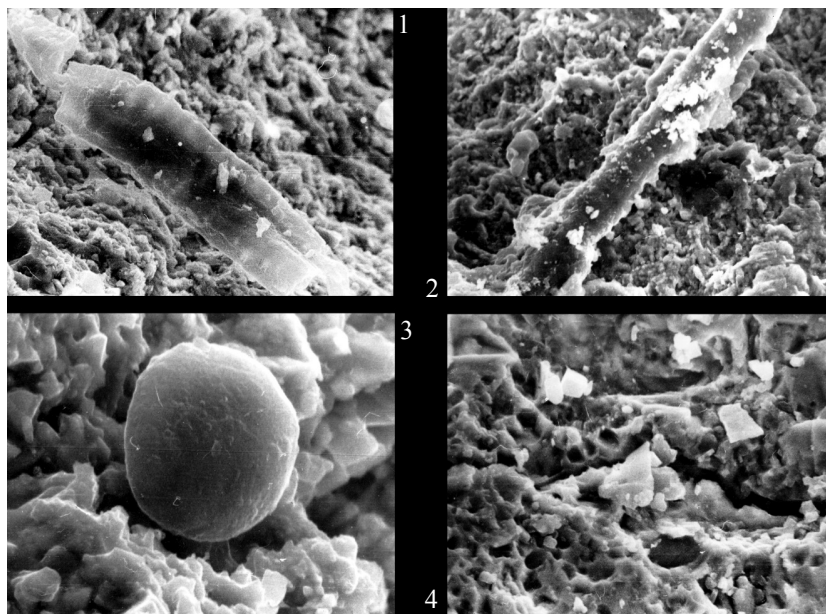


Рис. 63. Метеорит Альенде (CV3): 1 – псевдоморфоза по чехлу цианобактерии, вероятно, заключавшего несколько трихомов (поле обзора 107 мкм); 2 – нитчатая форма, видны следы клеточного строения (поле обзора 178 мкм); 3 – сферическая форма (~20 мкм), возможно, коккоидная колония, но не исключено, что эукариот; 4 – минерализованный гликокаликс с пустотами сферической формы (поле обзора 27 мкм) (Астафьева и др., 2011).

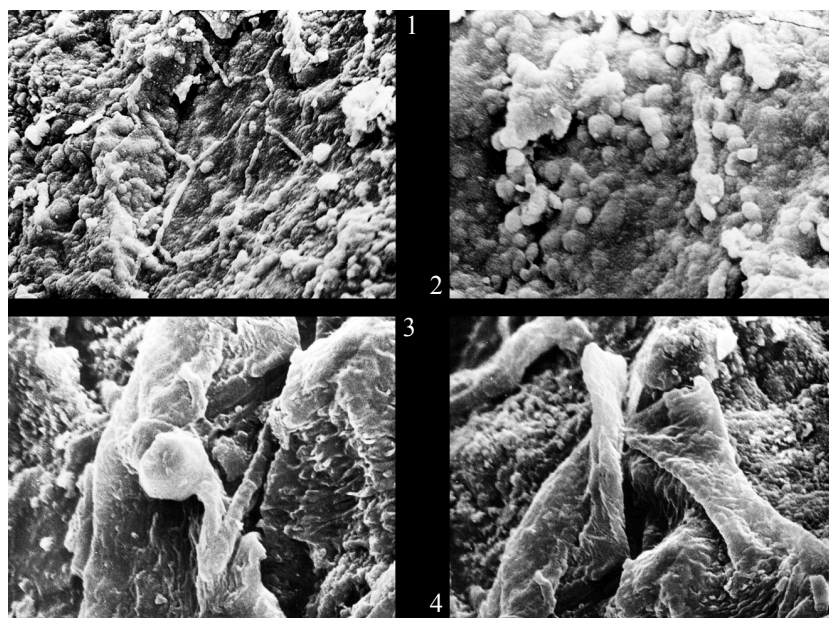


Рис. 64. Метеорит Ефремовка (CV3): 1 – нитчатые формы (поле обзора 47 мкм); 2 – коккоидные формы, иногда образующие дипло- и тетрадки или короткие нити (поле обзора 27 мкм); 3 – псевдоморфозы по нитям цианобактерий (поле обзора 21 мкм), на тонкой нити видно деление на клетки, на нити рядом возможный спорангий; 4 – псевдоморфозы по нитям цианобактерий, состоящим из нескольких трихомов, одетых общим чехлом (поле обзора 27 мкм) (Астафьева и др., 2011).

Таблица 8. Распространение основных групп микрофоссилий в углистых хондритах

Тип	Название метеорита	Хемо- или биогенные структуры			Прокариоты							
		Фрамбонды пирита	Фрамбонды магнетита	Сферические формы, глобулы	Кокковидные формы	Тороидальные формы	Палочковидные формы (бациллы)	Спириллы	Нитевидные цианобактерии или серобактерии (трихомы, чехлы)	Псевдонитевидные формы	Полу- и субсферические формы акинеты или гетероцисты	Гифы актиномицет
CI	Alais	++							+			
	Ivuna			++				+	+			
	Orgueil	++	++	++	++	++	+		+	+	+	
	Tagish Lake	++	++		++				+			+
CM2	Agua Zarcas			++					+			
	Bells								+			
	Jbilet Winselwan								+			
	Cold Bokkeveld								+			
	Mighei				++				+			
	Nogoya				++		+					
	Murchison	++		++	++		+		+		+	+
	Murray				++				+			
	Sutter's Mill								+			
CO3	Dar al Gani								+			
	Kainsaz	++										
	Rainbow				++				+			
CR3	Acfer 324								+			
CV3	Allende			++	++				+			
	Efremovka				++				+			+

Тип	Название метеорита	Эукариоты						
		Акритархи и акритархоподобные формы	Празиофиты одиночные	Празиофиты колониальные	Диатомеи или диатомоподобные формы	Спороподобные формы	Раковинные амёбы	Альвеоляты
CI	Alais							
	Ivuna	++						
	Orgueil	++	+	+	+	+	+	++
	Tagish Lake	++						
CM2	Aguas Zarcas							
	Bells							
	Jbilet Winselwan							
	Cold Bokkeveld							
	Mighei	++						
	Nogoya							
	Murchison	++	+		+			++
	Murray	++						
Sutter's Mill								
CO3	Dar al Gani	++						
	Kainsaz							
	Rainbow							
CR3	Acfer 324							
CV3	Allende							
	Efremovka							

3.5. Космическая пыль и ее роль в астробиологии

Под космической пылью понимают частицы твердого вещества, размером от долей микрона до нескольких микрон. Космическая пыль заполняет межзвездное, межпланетное и околоземное пространство, пронизывает верхние слои земной атмосферы и, выпадая на поверхность Земли, является одной из форм материального (вещественного и энергетического) обмена в системе «Космос – Земля».

Первые упоминания в научной литературе о космической пыли на Земле относятся к шестидесятым годам XIX в., когда известный голландский полярный исследователь А. Норденшельд (А.Е. Nordenskjold) обнаружил на поверхности льда порошкообразное вещество и предположил, что оно имеет космическое происхождение (Иванова и др., 1975). В 1870-х гг. по результатам экспедиции на судне «Челленджер» в глубоководных осадках Тихого океана были обнаружены округлые магнетитовые частицы, магнитные сферы, впервые описанные Дж. Мюррейем (J. Murray) (Murray, 1876; Murray, Renard, 1891), в отношении которых также было высказано предположение, что они имеют космическое происхождение.

В России в первой половине XX в. на необходимость изучения космической пыли указывал академик В.И. Вернадский (1932, 1941). В феврале 1941 г. он выступил с докладом «О необходимости организации научной работы по космической пыли» на заседании Комитета по метеоритам АН СССР (1941). В этом докладе Вернадский подробно обосновывает программу поисков и сбора вещества космической пыли, выпадающей на поверхность Земли, для решения задач геологии, геохимии и космогонии. Для изучения космической пыли, подчеркивал Вернадский, необходимо иметь достаточный материал для ее исследования. Организацию сбора космической пыли и научное исследование собранного материала он считал важнейшей научной задачей. Современный подход к изучению космической пыли был сформулирован на конференции 1963 г. в США (Cassidy, 1964). В СССР в послевоенные годы сбор и изучение космической пыли проводились на высокогорных вершинах (Дивари, 1948), в Антарктиде (Виленский, 1972), в месте падения Тунгусского метеорита (Флоренский, 1961). В 1962 г. при Сибирском отделении АН СССР была создана Комиссия по метеоритам и космической пыли, возглавляемая В.С. Соболевым. Работы по изучению космической пыли в рамках этой комиссии проводились под руководством Н.В. Васильева. Значительный прогресс в изучении космической пыли в верхней атмосфере и околоземном пространстве был связан с применением космических средств (Т.Н. Назарова, В.И. Мороз и др.). В 1990-е гг., после распада СССР, развала советской экономики и катастрофического сокращения ассигнований на науку, исследования космической пыли в России практически полностью прекратились. Прекратила существование и Комиссия по метеоритам и космической пыли при Сибирском



Рис. 65. Туманность Киля, удаленная от нас на 7 500 световых лет. Снимок был получен космическим телескопом «Хаббл» (URL: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-highlights/exploring-the-birth-of-stars>).

отделении Академии наук. В 2000-е гг. исследование ископаемой космической пыли успешно проводилось учеными Института физики Земли РАН (А.Ф. Грачев, О.А. Корчагин, Д.М. Печерский, В.А. Цельмович и др.).

Космическая пыль существует в двух основных видах: межзвездная (рис. 65) и межпланетная. Межзвездная пыль оказывает существенное влияние на астрономические процессы. Она вызывает ослабление звездного света и его поляризацию, оказывает влияние на звездообразование и другие процессы. На поверхности пылинок образуются молекулярные, в том числе органические соединения, поступающие в межзвездную среду. Размеры пылинок, в основном, от тысячных до десятых долей микрона.

Размер частиц

Для больших частиц (размером много больше длины волны) ослабление звездного света не зависит от длины волны. Для малых частиц характер ослабления зависит как от размеров частиц, так и от их свойств. Для чисто диэлектрических частиц поглощение отсутствует, а ослабление света определяется рассеянием (закон Рэлея: эффективность рассеяния пропорциональна λ^{-4}). Реальные частицы не являются чистыми диэлектриками, поэтому небольшое поглощение имеет место, и зависимость от длины волны отличается от релеевской. Наблюдаемое ослабление, пропорциональное λ^{-1} , обусловлено частицами, малыми по сравнению с длиной волны, размером порядка 10^{-5} см (0,1 мкм). В далеком ультрафиолете ($\lambda \leq 1500$ Å) ослабление пропорционально $\lambda^{-\alpha}$ ($\alpha=1 \div 2$), такое ослабление обусловлено частицами размером 0,005–0,01 мкм. Как было отмечено выше, крупные частицы размером более 1 мкм должны были бы давать в оптической области нейтральное ослабление, чего не наблюдается. Это говорит о том, что такие частицы в межзвездной среде отсутствуют (или их доля очень мала). В отличие от этого в межпланетной среде такие частицы присутствуют, что связано с различными механизмами образования межзвездной и межпланетной пыли.

Межзвездная поляризация света. Форма частиц и их ориентация

Еще одним важным фактором воздействия межзвездной пыли является поляризация света звезд. Она была обнаружена в конце 1940-х – начале 1950-х гг. До этого предполагалось, что частицы должны быть сферическими или квазисферическими. Однако обнаружение поляризации света звезд заставило изменить эти представления. То обстоятельство, что поляризация наблюдается в непрерывном спектре и имеет место ее корреляция с избытком цвета звезд, указывает, что она обусловлена межзвездной пылью. А значит, пылинки должны быть несферическими, иметь вытянутую форму и быть ориентированными в пространстве. Ориентация пылинок происходит под действием магнитного поля галактики (рис. 66). Данные наблюдений показывают, что пылинки ориентированы большими осями поперек магнитного поля. Однако механизм их ориентации до конца не ясен.

Температура пыли

Температура определяется по собственному излучению пыли в ИК- и субмиллиметровой области. Для межоблачной среды, облаков нейтрального водорода HI и молекулярных облаков она составляет 10–20 К. В областях ионизованного водорода HII температура пыли выше. Тепловой баланс пыли в основном определяется поглощением и излучением. Поглощается излучение в видимой и УФ-областях спектра, а излучается в ИК-области. Поскольку излучательная способность пылинок значительна, они холоднее газа. Низкая

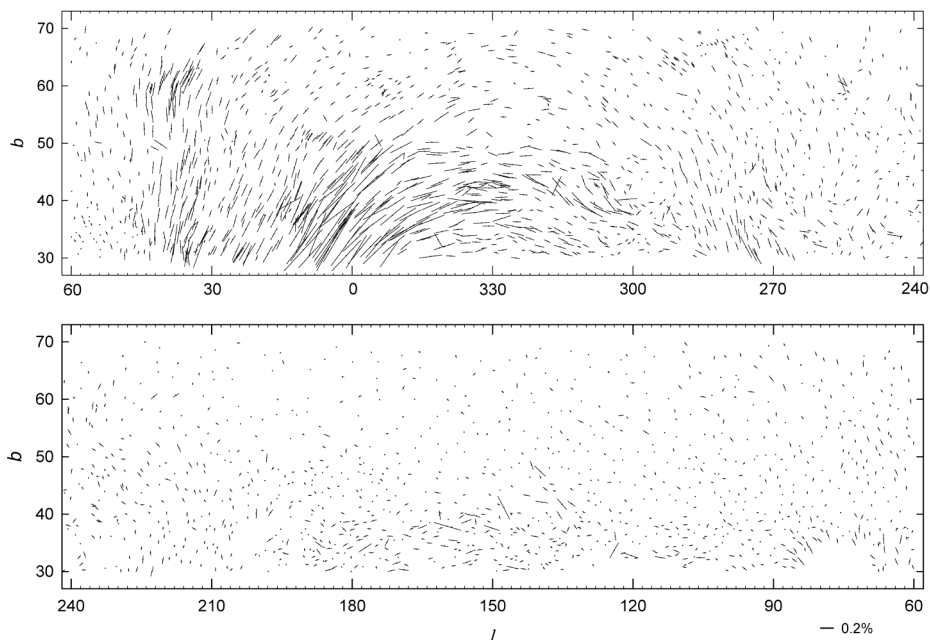


Рис. 66. Межзвездная поляризация света (Piigola et al., 2020).

температура пылинок в межзвездной среде оказывает влияние на их рост и эволюцию.

Электрический заряд частиц

Межзвездные пылинки обычно электрически заряжены. Отрицательный заряд образуется из-за налипания электронов на поверхность частицы, а положительный – из-за фотоэффекта. Углеродные частицы всегда заряжены отрицательно, их заряд порядка 10 элементарных электрических зарядов, а силикатные заряжены положительно (их заряд 200–500). Большинство пылинок в областях HI имеют положительный электрический заряд. Электрические заряды пылинок приводят к взаимодействию их с межзвездными магнитными полями, а также играют важную роль в физико-химических процессах, протекающих на поверхности межзвездной пыли.

Строение и состав пылинок

В спектре поглощения межзвездной пыли в ИК-области наблюдаются полосы поглощения льда ($\lambda=3,1$ мкм) и силикатов ($\lambda=9,7$ мкм).

Отождествлены следующие соединения: MgSiO_3 , Mg_2SiO_4 , SiC , H_2O , NH_3 , H_2S , CO , MgS . Несколько полос отождествлены с полициклическими ароматическими углеводородами типа коронена $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$. По мнению Дж. Гринберга, сложные органические молекулы, присутствующие в межзвездной пыли,

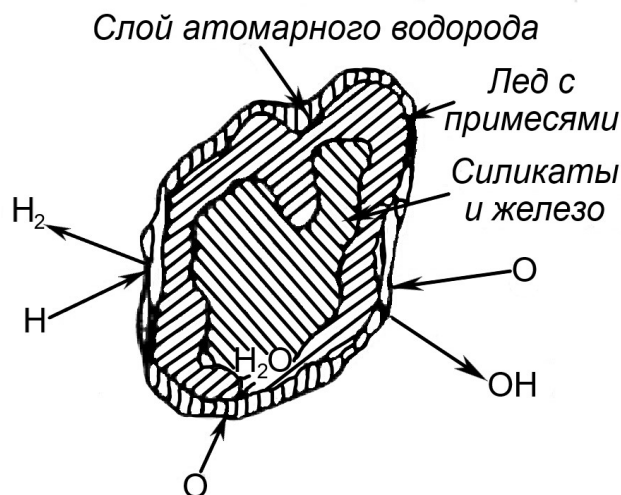


Рис. 67. Строение частицы межзвездной пыли (по: Н.В. Вошинников, 1986).

близки к стадии, за которой уже начинается предбиологическая эволюция.

Считается, что частица состоит из тугоплавкого кристаллического ядра размером в сотые доли микрона, оболочки из грязного льда и пленки из летучих соединений (рис. 67). В состав ядра входят железо, силикаты, графит, карбид кремния и др. тугоплавкие соединения. Пленка состоит из атомарного и молекулярного водорода, кислорода и гидроксила OH . Размер ледяной оболочки порядка $0,1$ мкм.

Помимо сравнительно крупных частиц типа ядро-оболочка, имеются очень маленькие силикатные и графитовые частицы (без оболочки) размером порядка сотых долей микрона. Сильная полоса поглощения в УФ-области ($\lambda=2200$ А) принадлежит мелкораздробленному графиту ($a \leq 0,04$ мкм).

Образование и эволюция пылинок

Пылинки образуются в атмосферах холодных звезд (гигантов и сверхгигантов) при температуре порядка 1500 К путем конденсации из газовой среды, а также при взрывах сверхновых (обнаружено недавно). Центрами конденсации являются так называемые кластеры – небольшие группы атомов и молекул (кластер, содержащий 10 атомов, уже может рассматриваться как зародыш твердой фазы).

Состав возникающих пылинок зависит от содержания элементов в атмосферах звезд. Холодные звезды по обилию углерода и кислорода можно разделить на два типа: углеродные и кислородные. В углеродных звездах содержание углерода превышает содержание кислорода ($[C]/[O]>1$), в кислородных звездах содержание углерода меньше, чем содержание кислорода ($[C]/[O]<1$). В углеродных звездах практически весь кислород связан

в молекулы CO и не способен образовывать окислы других элементов и кислородосодержащие минералы. Но имеется избыток углерода. В этих условиях формируются углеродные частицы и пылинки из карбида кремния SiC. В кислородных звездах, напротив, весь углерод связан в молекулы CO. Имеется избыток кислорода. Здесь образуются частицы, содержащие окислы металлов, например, магнетит Fe_3O_4 , а также силикаты – форстерит Mg_2SiO_4 , энстатит $MgSiO_3$ и др. Из этих веществ формируются сначала зародыши, а затем ядра пылинок. Газовыми потоками и давлением излучения они выносятся в межзвездную среду, успевая дорасти до размеров в сотые доли микрона.

Эволюция пылинок, образование молекул

В межзвездной среде зародыши пылинок тормозятся и охлаждаются. Налетающие на них атомы и молекулы газа налипают на пылинки, обуславливая их рост. В результате зародыши пылинок (рис. 68), представляющие собой ядра конденсации, быстро обрастают оболочками из наиболее распространенных летучих элементов H, C, N и O. Под действием УФ-излучения на поверхности частиц происходит распад молекул (фотолиз) и образование радикалов. Последние, вступая в реакции, либо воссоздают исходную молекулу, либо создают новую. Таким путем создаются все более

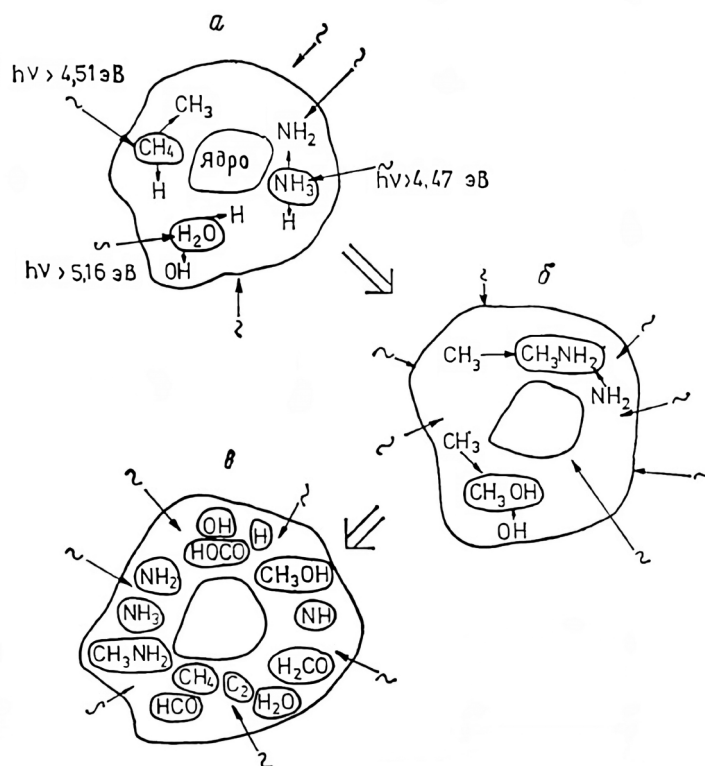


Рис. 68. Схема эволюции оболочек пылевых частиц (Гринберг, 1984; Симаков, 2005).

и более сложные молекулы. В газопылевых облаках процесс образования молекул идет более интенсивно.

Асимметрия формы образующихся частиц связана с электрическим зарядом. На частицах с размерами $\leq 0,01$ мкм образования оболочек, скорее всего, не происходит. Помимо налипания атомов и молекул, действует процесс коагуляции – слипания частичек при столкновениях.

Этот процесс наиболее эффективно идет в плотных молекулярных облаках. Здесь возникают многоядерные пылинки, типичные для межпланетной среды. Наиболее эффективно коагуляция работает в протопланетных дисках, здесь частицы вырастают до более крупных размеров, чем в межзвездной среде. Это одна из причин, почему межпланетная пыль крупнее межзвездной.

Считается, что в протопланетных дисках частицы вследствие коагуляции могут дорасти до макроскопических размеров, создавая ядра комет и планетезимали (небесное тело на орбите вокруг протозвезды, образующееся в результате постепенного приращения более мелких тел, состоящих из частиц пыли протопланетного диска).

Разрушение пылинок происходит за счет испарения при нагревании и за счет физического разрушения при столкновении пылинок между собой и с энергичными атомами и молекулами, а также при прохождении сильной ударной волны через газопылевую среду. Равновесие процессов роста и разрушения пылинок формирует спектр их размеров.

Органические молекулы

К настоящему времени в межзвездной среде обнаружено около 300 различных молекул. Из органических соединений следует отметить обнаружение молекул цианистоводородной кислоты HCN и формамида NH_2CONH_2 , важных для предбиологического синтеза. Несколько полос отождествлены с полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) типа коронена $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$. Кластеры из ПАУ образуют промежуточное звено между молекулами и наночастицами.

Особый интерес представляет обнаружение фуллеренов. Эти удивительные образования, видимо, занимают промежуточное положение между гигантскими молекулами и частицами. Структура напоминает додекаэдр. Не исключено, что внутри молекул фуллерена могут сохраняться зародыши жизни.

Межпланетная пыль

Межпланетная космическая пыль представлена частицами, имеющими большие размеры зерен, нежели межзвездная пыль. Межпланетная пыль может быть образована в результате конденсации межпланетного газа (на стадии протопланетного диска), захвата межзвездного вещества, распада комет или дробления астероидов. Общая масса пыли в Солнечной системе оценивается в 10^{19} – 10^{20} г.

Межпланетная пыль постоянно оседает на поверхностях тел Солнечной системы. В частности, на Землю, по различным оценкам, выпадает от 4 до 10 тыс. тонн космической пыли ежегодно, при этом порядка 95% процентов этой массы приходится на частицы размером 50–400 мкм. Рассматривая космическую пыль, оседающую на Землю, ее условно можно разделить на три группы. Первая представлена частицами размерами от долей миллиметра до 10 мм и массой от 10^{-4} г до нескольких граммов, которые полностью сгорают при прохождении через атмосферу. Более крупные частицы не успевают сгореть полностью и достигают поверхности в виде метеоритов. Мелкие частицы, образующиеся в результате их разрушения при прохождении через атмосферу, выпадают на поверхность Земли в форме микрометеоритов. Третья группа пылевых частиц, размерами от десятков микрон и менее, не успевает нагреться при прохождении через атмосферу, и, как следствие, достигает поверхности в практически неизменном виде. Метеорная компонента космической пыли утрачивает значительную часть несомой информации, но вышеупомянутая группа мелких частиц сохраняется в неискаженном виде, что обуславливает их исследовательскую ценность. Теоретически эти частицы могут участвовать в доставке пребиогенного органического, а возможно, и биогенного, вещества на Землю.

Полициклические ароматические углеводороды

Межпланетная пыль имеет существенно более крупные размеры – в среднем нескольких микрон (возможно, вплоть до 100 мкм). Она образуется в процессе распада комет, а также при дроблении астероидов. В межпланетной среде присутствуют также частицы межзвездной пыли. Вероятно, они попадают в Солнечную систему вследствие аккреции при ее прохождении через межзвездные газопылевые облака, а также под действием межзвездного ветра. При рассеянии света на частицах межпланетной пыли возникают такие оптические явления, как зодиакальный свет, фраунгоферова составляющая солнечной короны, зодиакальная полоса, противосияние. Рассеянием на пылинках обусловлена и зодиакальная составляющая свечения ночного неба. Поскольку межпланетная пыль вызывает явление зодиакального света, ее иногда называют зодиакальной пылью. А так как подобные частицы более крупного размера при прохождении через земную атмосферу вызывают явление метеоров, межпланетную пыль иногда называют метеорной.

Особый интерес представляет космическая пыль, выпадающая на поверхность Земли. Она обнаруживается в глубоководных морских и океанических отложениях, в ледовом и снеговом покрове Арктики и Антарктики, в снеговом покрове горных вершин, в толще земных пород и других природных планшетах. При исследовании вещества, выпадающего на поверхность Земли, мы сталкиваемся с телами различного размера и происхождения. Частицы размером от долей миллиметра до 10 мм и массой от 10^{-4} г до нескольких граммов при пролете через атмосферу образуют хорошо

известное явление метеоров или «падающих звезд». Они полностью сгорают, не достигая поверхности Земли, однако более мелкие продукты дезинтеграции метеорных тел достигают поверхности Земли. Тела размером несколько сантиметров и более не успевают полностью сгореть в атмосфере и выпадают на поверхность Земли в виде метеоритов. Вместе с ними выпадают и мелкие частицы – продукты их дезинтеграции. Эти частицы, а также продукты дезинтеграции метеорных тел, часто называют микрометеоритами.

В отличие от метеорных частиц, более мелкие частицы космической пыли размером порядка нескольких десятков микрон и меньше при торможении в атмосфере не успевают нагреться до температуры плавления и, спускаясь под действием собственной тяжести, в конце концов достигают поверхности Земли практически в неизменном виде.

Таким образом, мы сталкиваемся с тремя видами космического вещества, выпадающего на Землю: (1) метеориты – крупные тела, которые не полностью сгорают при прохождении через атмосферу; (2) микрометеориты – мельчайшие частицы, образующиеся при горении метеорных тел и метеоритов в атмосфере и собственно (3) космическая пыль – частицы, которые в силу малой массы не расплавляются при прохождении через атмосферу и в неизменном виде достигают поверхности Земли.

С позиций астробиологии именно эта составляющая космической пыли (в международной аббревиатуре она обозначается IDP – Interplanetary Dust Particle) представляет наибольший интерес, ибо, достигая поверхности Земли в неизменном виде, частицы IDP несут неискаженную информацию о составе и структуре космической пыли. Кроме того, они могут быть весьма эффективны в доставке добиогеогенного органического, а возможно, и биогеогенного, вещества на Землю. В отличие от них микрометеориты подвергаются изменениям при пролете через атмосферу и органическое вещество, не говоря уже о живых микроорганизмах, в них не сохраняется.

В отношении космической пыли, выпадающей на Землю, существует значительная терминологическая неопределенность. Наряду с термином «метеорная пыль» широко используется термин «микрометеориты», причем разные авторы вкладывают в него различные значения.

В.Г. Фесенков вслед за Ф. Уипплом, называл микрометеоритами те частицы межпланетной пыли, которые, в силу малой массы, практически не нагреваются при прохождении через атмосферу и достигают поверхности Земли в неизменном виде (Фесенков, 1955). Впоследствии Е.Л. Кринов, в согласии с П.Л. Дравертом, предложил подразделять внеземную пыль, поступающую на Землю, на метеорную, метеоритную и космическую. Метеорная пыль представляет собой продукт разрушения в атмосфере метеорных тел и состоит из сфероидальных частиц поперечником от нескольких микрон до десятых долей миллиметра. Частицы метеорной пыли представляют собой продукт переплавления и окисления вещества метеорных тел и, следовательно, изменяют свой состав и микроструктуру по сравнению

с метеорными телами. Метеоритная пыль представляет собой продукт дробления метеоритов на мельчайшие остроугольные и/или плоские частицы. Они сохраняют состав и микроструктуру, свойственную метеоритам. Космическая пыль представляет собой мельчайшие частицы, которые вторгаются в земную атмосферу из межпланетного пространства и вследствие своих малых масс достигают земной поверхности практически в неизменном виде (Кринов, 1955). Космическая пыль, по Кринову, соответствует IDP.

В работе Дженджа с соавторами (Genge et al., 1997) предложено выделять собственно межпланетную пыль с размерами менее 30 мкм и микрометеориты с размерами более 50 мкм. Следует, однако, иметь в виду, что граница 50 мкм – условна. С одной стороны, Грачев и др. обнаружили в разрезе Гамс на границе мела и палеогена оплавленные частицы (микрометеориты) размером 5–20 мкм (Грачев и др., 2008). С другой – среди частиц размером более 50 мкм могут быть не только продукты дезинтеграции метеорных тел, но и космические частицы очень малой плотности, достигающие поверхности Земли без разрушения. Согласно Д.Е. Браунли, предельный размер подобных частиц 100 мкм. Частицы размерами 0,1–1 мм он называет *миниметеоритами*. Более крупные частицы становятся метеорами (Браунли, 1984).

В настоящее время представляется целесообразным придерживаться единой терминологии.

Метеороиды – твердые тела, движущиеся в межпланетном пространстве, по размеру промежуточные между астероидами и космической пылью. Размеры от долей миллиметра до нескольких десятков метров.

Метеорные тела – метеороиды, сгорающие в земной атмосфере и порождающие явление метеоров. Размеры от долей миллиметра до 10 мм.

Метеориты – метеороиды, не сгоревшие в земной атмосфере и упавшие на поверхность Земли. Размер более нескольких сантиметров. Метеоритами называют и астероиды, упавшие на поверхность Земли.

Микрометеориты – продукты дезинтеграции метеороидов (метеорных тел и метеоритов) при прохождении через земную атмосферу (наиболее крупные из них – ядра комет и астероиды выпадают сравнительно редко и являются источником кометно-астероидной опасности). Размеры несколько десятков микрон (в среднем). При более детальном рассмотрении среди микрометеоритов следует различать метеорную и метеоритную пыль (по Кринову).

Космическая пыль (Cosmic dust) – частицы твердого вещества в космическом пространстве размером от долей микрона до нескольких микрон. Делится на межзвездную (размеры от тысячных до десятых долей микрона) и межпланетную (размеры порядка нескольких микрон, может быть, до десятков микрон и больше).

Космическая пыль на Земле подразделяется на микрометеориты – продукты дезинтеграции метеороидов и собственно межпланетную пыль – IDP – Interplanetary Dust Particle. Большой интерес представляет обнаружение на Земле частиц межзвездной пыли – Interstellar Dust Particle (ISDP).

В комплекс исследований космической составляющей пыли (КП) входят:

- исследование минералогического, химического и элементного состава КП;
- исследование изотопного состава элементов, референтных для КП;
- поиск биомаркеров: биофоссилий, органических веществ, метаболитов, нуклеиновых кислот, жизнеспособных клеток в КП;
- оценка общего количества КП, выпадающей на поверхность Земли;
- пространственное распределение КП по поверхности Земли, исследование временных вариаций, изучение вариаций состава КП в геологической истории Земли;
- сравнительный анализ ископаемой КП и межпланетной пыли, собранной космическими аппаратами;
- влияние КП на палеоклимат Земли;
- влияние КП на плодородие почв и биологические объекты.

Межзвездная пыль

Молекулярные облака — это межзвездные облака, сформированные межзвездной космической пылью, молекулярным водородом и монооксидом углерода. Их гравитации достаточно для протекания в них молекулярного синтеза, а возникновение в них гравитационных неустойчивостей приводит к звездообразованию.

Согласно некоторым представлениям, некоторая фракция импактной эжекты планет может достигать удаленных радиусов звездных систем, и мелкие фрагменты, вероятно, могут быть включены в состав холодных молекулярных облаков при прохождении звездных систем через оные. Теоретически в их составе споры (~1 мкм) могли бы быть частично экранированы от воздействия ГК слоем льда, и при последующем взаимодействии молекулярного облака с другой звездной системой мог бы происходить своего рода обмен веществом между ними (Wallis, Wikramasinghe, 2003).

Движение пылинок внутри галактик

Пылинки в основном двигаются вместе с межзвездным газом. Из-за неоднородности распределения светового давления могут иметь скорость до 2–10 км/с относительно газа. В некоторых случаях могут ускоряться бетатронным механизмом до ~30–100 км/с. В галактиках с бурным звездообразованием выносятся вместе с газом в гало галактики (так называемые галактические фонтаны) и даже в межгалактическое пространство (Бочкарев, 2014).

Гипотеза о релятивистских пылинках

Иногда обсуждается вопрос о возможности ускорения пылевых частиц до скоростей близких к скорости света (например, Dasgupta, Stiglitz, 1980). Такие частицы могли бы переносить содержащиеся в них молекулы на еще большие расстояния. Но даже если процесс ускорения сможет произойти плавно, то механизмов плавного торможения таких гипотетических частиц не найдено. Они погибают, врезаясь в какое-нибудь препятствие. В этом случае вероятность сохранения возможно имеющихся в этих пылинках молекул равна нулю.

Движение пылинок между галактиками

В галактиках с бурным звездообразованием пылинки могут выноситься вместе с газом в межгалактическое пространство. Если пылинки оказываются внутри плотного скопления галактик, то разрушаются горячим ($T \sim 10^8$ К) межгалактическим газом, иначе могут через ~ 1 млрд лет попасть в др. галактику на периферии скопления галактик.

Вероятные пределы миграции

Пекулярные скорости как галактик, так и выбрасываемых из них фрагментов, содержащих звезды и межзвездное вещество, не превышают ~ 3000 км/с = 1% скорости света. Поэтому за время существования галактик (10–13 млрд лет) органическое вещество могло переместиться на расстояние, не превышающее $\sim 1\%$ радиуса наблюдаемой части Вселенной, то есть ~ 100 млн световых лет. Такой объем содержит примерно $1/10^6$ часть всех галактик, т.е. $\sim 10^5$ галактик. Это, по-видимому, верхний предел объема, в котором могла успеть произойти панспермия. Таким образом, перенос зародышей жизни с одной планеты на другую ограничен $\sim 10^{15}$ – 10^{16} планетными системами. Высокая эффективность может осуществляться лишь в пределах одного скопления галактик, т.е. между 100–10 000 галактиками, содержащими 10^{12} – 10^{14} планетных систем. Наша Галактика не является членом скопления, поэтому частичный обмен веществом мог, вероятно, охватывать область, не превышающую объем Местной группы галактик (10^{11} – 10^{12} планетных систем).

Гипотеза Хойла и Викрамасинга

Согласно гипотезе Ф. Хойла и Ч. Викрамасинга, значительная доля межзвездной пыли (60–80%) состоит из бактерий. Основанием для подобного предположения послужило то обстоятельство, что профиль полосы поглощения в области 3 мкм, которая приписывается льду, по их мнению, лучше согласуется с поглощением света бактериями, находящимися в межзвездной среде. Хотя интерпретация спектральных деталей Хойлом и Викрамасингом не является однозначной, их гипотезу нельзя исключить

из рассмотрения. Она не противоречит наблюдениям, по крайней мере, если доля бактерий среди пылинок не слишком мала.

Следует иметь в виду, что одноклеточные организмы (особенно споры) весьма устойчивы к ионизирующему излучению космического пространства. В еще большей степени это относится к вирусам и вириодам. А внутри плотных молекулярных облаков такие органические «пылинки» (подобно ядрам обычных пылинок) будут обрывать ледяными оболочками, которые играют роль дополнительного экрана, защищающего ядро от излучений, способных повредить находящийся внутри замороженный организм.

В последнее время Викрамасинг видоизменил эту гипотезу. Согласно его новым взглядам (Wickramasinghe, 2011), это не живые бактерии, а их обломки. Викрамасинг считает, что каждая обитаемая планета выбрасывает в межзвездное пространство огромное число микроорганизмов, большинство из которых погибает, и лишь ничтожная доля порядка 10–24 достигает подходящих планет и дает начало жизни на них. Большинство же разрушается и их обломки входят в состав межзвездной пыли.

В противоположность распространенной точке зрения, согласно которой органические соединения в межзвездной среде выстраиваются в ряд от простейших соединений к более сложным, воспроизводя шаги, ведущие к жизни, Викрамасинг считает, что, напротив, эти вещества извлечены из живых организмов, образуя ряд – от разрушенных бактерий, генетических фрагментов клеток до соединений типа полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). По-видимому, в межзвездной среде протекают оба процесса: синтез органических соединений и распад микроорганизмов, вынесенных за пределы обитаемых планетных систем.

Аспекты исследования КП

Существуют различные аспекты исследования космической пыли.

Астрономический аспект – исследование КП за пределами Земли путем астрономических наблюдений и с помощью космических аппаратов при полете к планетам, астероидам и кометам. Астрономические наблюдения дают базовые сведения о космической пыли, включая ее компоненты, выпадающие на Землю. При этом важную роль играют лабораторные эксперименты, в которых определяются оптические постоянные и другие характеристики частиц, аналогичных космическим пылинкам, и моделируются процессы образования и роста пылинок в атмосферах звезд и протопланетных дисках, а также образование молекул в условиях, похожих на существующие в межзвездных облаках. Исследование космической пыли астрономическими методами развивается широким фронтом, и в настоящее время, в рамках данной программы, не требует специальной координации. Особняком стоит лунная пыль на поверхности Луны и примыкающем к ней пространстве (пылевая оболочка вокруг Луны). Исследование ее ведется с помощью космических лунных миссий.

Геологический аспект – изучение ископаемой пыли, обнаруживаемой в толще земных пород, которая представляет собой твердые частицы микронного размера – от субмикронных размеров до десятков микрон. Природа этих частиц различна, часть связана с земными процессами, включая вулканическую пыль, часть имеет космическое происхождение (космическая пыль). Пылевая компонента играет важную роль при формировании планет. Органические частицы вместе с газом оседают в протопланетном диске, где, согласно В.Н. Снытникову (Ильин и др., 2014), из-за гравитационной неустойчивости формируются сгустки, содержащие в основном органические соединения; здесь возникают благоприятные условия для астрокатализа, образуется мир РНК, который является предшественником жизни. Побочным продуктом этих процессов и их индикатором могут быть нано- и микрочастицы самородных металлов. Изучение влияния космического вещества, поступающего на Землю, на геологические процессы является одной из актуальных задач в науках о Земле. Количество космической пыли в породах определяется скоростью поступления космического вещества (есть данные, что она неравномерна) и скоростью осадконакопления: чем меньше скорость осадконакопления, тем выше концентрация космогенной компоненты. Выделение космогенной компоненты в породах является важнейшей задачей при исследовании ископаемой КП.

Для определения содержания космической пыли в осадке можно использовать следующие признаки: 1) различие космической и земной распространенности некоторых элементов, например, Ni, Fe, Co, Os, Ir и др.; 2) отличие физических свойств космических и земных пылинок. В частности, признаками «космичности» считаются сферичность частиц, темная окраска поверхности, намагнитченность, характерные размеры (Mathur et al., 2005a, b; Mathur et al., 2006).

Большое значение имеет изучение остатков магнитных бактерий как индикаторов климатических процессов, которые, как показывает опыт, извлекаются попутно при исследовании магнитных частиц. Среди биогенных магнитных минералов важную часть занимают магнетит и грейгит, производимые магнитотактическими бактериями, обитающими в водной среде в условиях наличия достаточно резкой окислительно-восстановительной границы (Kirschvink, Kopp, 2008). В процессе эволюции такие кристаллы приобрели оптимальные параметры (размеры, форму, состав), которые позволяют их узнавать в осадке. Это стехиометрия кристаллов, их специфичная форма, наличие множества совершенно идентичных кристаллов, в том числе и в цепочках (Kirschvink, Kopp, 2008). Обнаружив в породе подобные кристаллы, можно с большой долей уверенности полагать их биогенное происхождение, а по соотношению кислорода и серы делать выводы о климате.

Участие микроорганизмов в преобразованиях горных пород – это один из самых горячих вопросов современной геологии. Роль бактерий при образовании минералов и пород неоднократно обсуждалось в современной литературе (Kirschvink et al., 1985; Lowenstam, Weiner, 1989; Tazaki, 1997; Розанов,

Заварзин, 1997) и к настоящему времени показано, что различные бактерии катализируют кристаллизацию и осаждение аутигенных минералов (Абызов и др., 2002; Rozanov, 2006).

Следует отметить и такие аспекты, как исследование космической пыли в снежном и ледовом покрове Арктики и Антарктики, в высокогорных льдах; сбор и исследование растительных образцов – мхов-биомониторов, глубоководного ила и толщи земных пород. Сбор КП осуществляется в различных природных ландшафтах и средах: в снежном и ледовом покрове Арктики и Антарктики, на высокогорных ледниках, в глубоководном морском иле, в толще земных пород. Во всех этих образцах доля космической пыли с ее отличительным химическим составом и морфологическими характеристиками исходно подлежит определению на фоне значительно большей доли земной пыли.

Наименьшая доля земной пыли может оказаться в образцах, собранных в околоземном пространстве и межпланетной среде, при отборе с анализом непосредственно в космосе. Также представляется перспективным накопление КП с помощью специальных ловушек, установленных на космических аппаратах (КА) при обеспечении специальных мер от их загрязнения двигательными установками и научной аппаратурой КА. При этом необходимо обеспечить доставку ловушек после экспонирования на орбите на Землю. Для этой цели могут использоваться возвращаемые спутники или МКС. Следует также изучить возможность установки ловушек на высотных аэростатах.

Ловушки предназначены для сбора КП с целью последующего анализа на элементный и изотопный состав, органическую и минералогическую компоненту, а также на пред- и биологические объекты (биологические объекты космической пыли – БОКП). Ловушки с аэрогелем устанавливаются на внутренней стороне приборного отсека, расположенного снаружи КА. Во время орбитального полета крышки отсека открываются, и ловушка с аэрогелем открыта для сбора КП. До запуска и после приземления КА принимаются меры предосторожности против заражения образцов пылью земного происхождения. Ловушка БОКП с аэрогелем после приземления должна быть сразу же помещена в стерильный (деконтаминированный от земной пыли) контейнер и транспортироваться при отрицательной температуре (изотермический бокс с аккумуляторами холода при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) в ИМБП РАН. После доставки ловушки с гелем в ИМБП она до передачи заказчику хранится при отрицательной температуре.

Открывать контейнер можно только в специальных «чистых» помещениях и разбирать частицы вещества там же (нужен световой микроскоп с микроманипулятором и камерой). Предполагается отдельные частицы извлекать из геля и переносить манипулятором в специальном образом обработанные кварцевые кюветы с крышкой, очищенные от земной органики. Кюветы с частицами передаются на дальнейший анализ в специализированные лаборатории. Анализы включают разного рода микроскопию с зондами. Из отдельных частиц можно также попытаться выделить ДНК специальными наборами

и амплифицировать гены типа микробных 16–18S рРНК. При достаточном количестве собранной КП перечень анализов может быть увеличен.

Основное ограничение при использовании КА этого типа связано с ограниченной площадью экспонирования. При экспозиции 30 суток минимальная площадь облучения составляет порядка 100 см².

Ловушки представляют собой емкости, заполненные аэрогелем. Предполагается использовать аэрогель на основе оксида кремния. В Институте катализа СО РАН имеется аэрогель на основе кремния, который используется в черенковских детекторах на МКС. Однако, как показала предварительная проработка, в силу технологических причин выпускаемый аэрогель черенковских детекторов напрямую не может быть применен для ловушек КП по размерам. В то же время необходимая по чистоте технология резки образцов аэрогеля отсутствует.

В состав геля входят кремний с кислородом и в качестве примесей такие элементы как магний, железо, алюминий и другие, которые подлежат обнаружению в составе космической пыли. В целом это создает серьезные проблемы в анализе получаемой КП. Перспективным является использование геля, который может быть создан на основе циркония, гораздо менее космически распространенного элемента. Разработка аэрогеля на основе циркония может быть выполнена в Институте катализа СО РАН.

Особый интерес представляют *Биологические аспекты исследования КП*. Они включают в себя три аспекта: астробиологический, эволюционный и экологический. В первом случае это вопрос о распределении предбиологического и биологического вещества в Солнечной системе, возможности межпланетного обмена биологическим материалом, то есть проблема транспермии. Второй и третий аспекты касаются воздействия космического вещества: метеоритов и КП, на биологические и биогеохимические процессы в природных системах Земли.

Возможность того, что транспермия, межпланетный перенос микроорганизмов, может играть роль в происхождении жизни на Земле или распространении земной жизни на другие планеты (Марс) зависит от способности микроорганизмов выжить в космическом путешествии. Хотя большая часть межпланетного материала, достигающего Земли, провела в космосе несколько миллионов лет, подсчитано, что, по крайней мере, один из 107 марсианских метеоритов совершает межпланетное путешествие менее чем за год, и что за 1 млн лет приблизительно десять метеоритов массой более 100 г попадают с Марса на Землю всего за два-три года (Gladman, 1997).

С другой стороны, пылевые частицы могут мягко тормозиться в верхних слоях атмосферы Земли, выпадая, таким образом, на поверхность планеты без значительного разогрева внутреннего содержимого в пылевых конгломератах (Anders, 1989). Однако неизвестно, достаточно ли жизнеспособность микроорганизмов, покоящихся форм или спор, в течение собственно фазы космического транзита, чтобы обеспечить транспермию клеток, иммобилизованных в космическом веществе, в частности, в составе КП.

ГЛАВА IV

Механизмы панспермии. Поиск обитаемых зон Вселенной

4.1. Исследования планетарной компоненты Солнечной системы

Солнечная система – звездная система возрастом $\sim 4,568$ млрд лет, расположенная в галактике Млечный Путь (рис. 69), обращающаяся вокруг центра Галактики по орбите радиусом $8\text{--}8,5$ килопарсеков, флуктуация относительно плоскости Галактики составляет ~ 70 пк, периодичность обращения примерно $200\text{--}250$ млн лет. В настоящее время располагается относительно недалеко от области звездообразования, в среде теплого разреженного газа (Бочкарев, 2017; Bouvier, Wadhwa, 2010).

Формирование Галактики началось ~ 13 млрд лет назад (толстый диск), через ~ 2 млрд лет завершается формирование гало, тогда же происходит слияние с карликовой галактикой Гайя-Энцелад, сопровождающееся значительным увеличением количества звезд. Возраст тонкого диска оценивается в $8,8 \pm 1,7$ млрд лет, его звездные популяции характеризуются большей металличностью (степень обогащенности химическими элементами тяжелее H и He), чем в толстом диске. В последующие $5\text{--}6$ млрд лет после слияния происходит десятикратное увеличение средней металличности вещества Галактики (Xiang, Rix, 2022; Peloso et al., 2005; Hayden et al., 2017).

Звездообразование происходит в результате возникновения гравитационной неустойчивости в холодных плотных молекулярных облаках. Гравитационная неустойчивость приводит к возникновению обособленной области, плотность которой возрастает по мере сжатия. Область уплотнения фрагментируется на более мелкие образования, и, как следствие, звездообразование всегда происходит группами. Происходит переход гравитационной энергии в кинетическую, которая затем переходит в тепловую и, в конечном счете, температура и плотность протозвезды достигают значений,

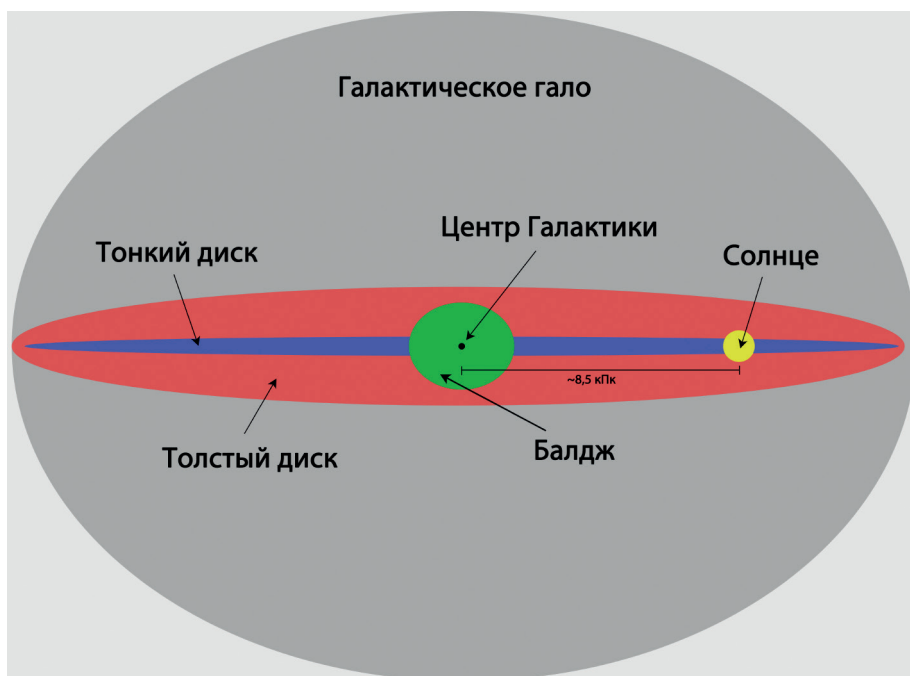


Рис. 69. Расположение Солнечной системы в галактике Млечный Путь.

при которых становится возможным начало реакций термоядерного синтеза, сжатие останавливается и происходит зарождение звезды (Засов, Постнов, 2006).

Нет достоверного понимания о событиях, предшествовавших возникновению Солнечной системы, однако обнаружение в составе некоторых метеоритов досолнечных зерен (карбид кремния, алмазы (возможно) и др.) не только нехарактерного для Солнечной системы изотопного состава, но и сравнимых по возрасту, или даже превышающих его (в случае карбида кремния – 5–7 млрд лет), что позволяет предположить, что триггером к возникновению гравитационных неустойчивостей в молекулярном облаке могла стать серия вспышек сверхновых. Предполагается также, что одним из других последствий этого события могло стать обогащение зарождающейся Солнечной системы тяжелыми элементами (Al-26 и др.) (Hoppe et al., 2022; Lewis et al., 1987; Bernatowicz et al., 1987; Heck et al., 2020).

Согласно ряду моделей, полагается, что ранней планетарной системе была свойственна определенная гравитационная нестабильность, разрешившаяся через изменение орбит газовых гигантов – Сатурн, Уран и Нептун мигрировали к краю Солнечной системы, Юпитер – к центру. Тогда же могло произойти вытеснение гипотетического пятого газового гиганта на очень удаленную орбиту или даже за пределы Солнечной системы. В рамках этих

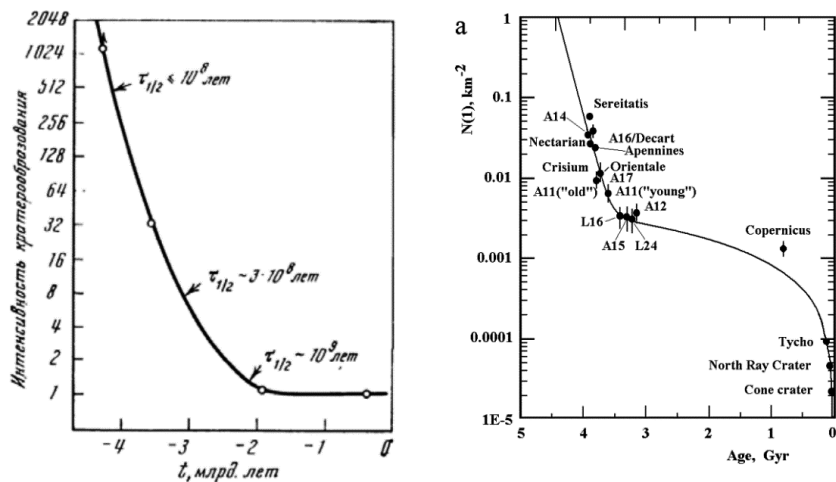


Рис. 70. Интенсивность кратерообразования на Луне (Рускол, 1975; Багров, 2017).

гипотез считается, что подобная планетарная миграция привела к распаду диска планетезималей, в результате чего часть его тел мигрировали во внутренние области Солнечной системы, что привело к Поздней тяжелой бомбардировке (4,1–3,8 млрд лет назад), а из оставшихся малых тел сформировался пояс Койпера (Nesvorný et al., 2018). Альтернативная точка зрения на причины Поздней тяжелой бомбардировки заключается в предположении о существовании и последующем разрушении некой планеты (Фазтон) между орбитами Марса и Юпитера, осколки которой обусловили бомбардировку и сформировали Главный пояс астероидов. Основной массив ударных кратеров на телах Солнечной системы имеет возраст 4,5–3,7 млрд лет, в последние 3,5 млрд лет подобных бомбардировок не наблюдается (рис. 70) (Багров, 2017).

Время от времени выдвигаются различные гипотезы, вводящие в состав Солнечной системы дополнительные планеты с широким диапазоном масс – от карликовых планет до газовых гигантов. Эти гипотезы основываются на наблюдениях аномалий в орбитах. В качестве мест возможной локализации этих гипотетических тел рассматривается прежде всего область транснептуновых объектов (ТНО), в более ранние исторические периоды рассматривались также орбиты между Солнцем и Меркурием (Вулкан), Марсом и Юпитером (Фазтон). Также выдвигаются различные гипотезы о ранее существовавших, но ныне разрушившихся или мигрировавших за пределы гравитационного поля Солнца планетах. Гипотезы о существовании дополнительных планет во внутренних областях Солнечной системы ныне признаны несостоятельными, однако сохраняется возможность существования девятой планеты во внешних областях Солнечной системы (диапазоном орбит вплоть до облака Оорта), на что указывают формы орбит обособленных транснептуновых объектов, однако на данный момент ее поиски не увенчались успехом (Batygin, Brown, 2016).

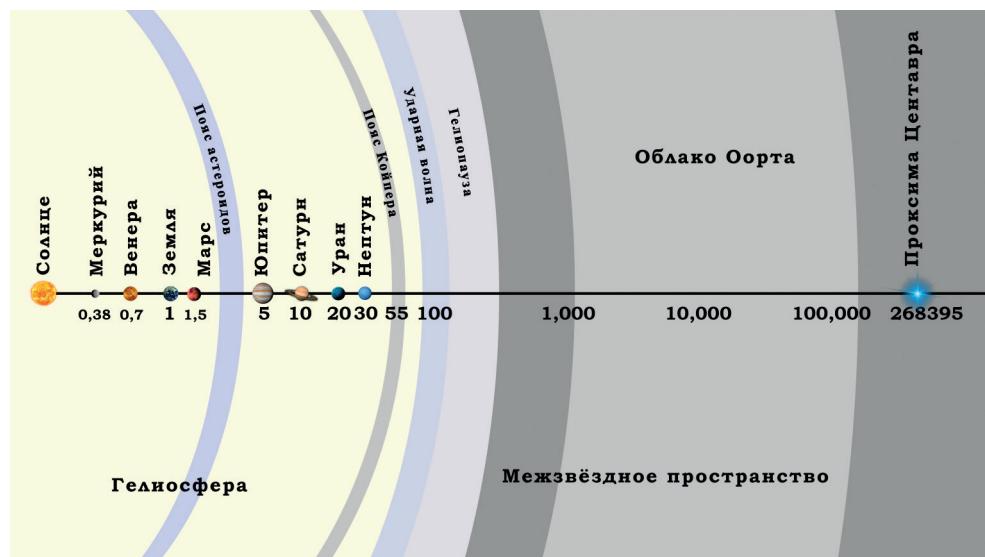


Рис. 71. Схема строения Солнечной системы (в а.е.).

Помимо вышеперечисленных планет в состав Солнечной системы входят карликовые планеты, спутники планет и малые космические тела, такие как кометы, астероиды, метеороиды, космическая пыль, межпланетный газ (рис. 71). Известны два пояса астероидов: главный пояс астероидов между орбитами Марса и Юпитера, и пояс Койпера за орбитой Нептуна. Предполагается, что значительная часть кометной популяции Солнечной системы располагается в гипотетическом облаке Оорта. Вероятно, пояс астероидов возник из вещества протопланетного диска, под действием гравитации Юпитера, воспрепятствовавшей процессу формирования планеты (альтернативно – из обломков Фазтона). Наиболее крупными телами являются Церера, Веста, Паллада и Гигея, в которых сосредоточено более половины массы пояса. По составу объекты главного пояса делятся на три основных класса: углеродные, силикатные и металлические астероиды.

Объекты, расположенные за пределами орбиты Нептуна, называются транснептуновыми объектами (ТНО), к ним относятся пояс Койпера и гипотетическое облако Оорта.

Пояс Койпера состоит из тел, сопоставимых по размерам с астероидами и ядрами комет, входящие в него объекты подразделяются на три класса: классические, резонансные и рассеянные. Эти три класса формируют две динамические популяции. Первая (классический пояс Койпера) состоит из классических и резонансных объектов, с радиусами орбит $\sim 35\text{--}100$ а.е. и характеризующимися низкими эксцентриситетами и малым наклоном орбит. Вторая популяция представляет собой рассеянный диск, состоящий из объектов 3-го класса, с радиусами орбит $\sim 30\text{--}103$ а.е. и характеризующимися перигелиями,

близкими к орбите Нептуна, но отличающимися меньшей плотностью, большими, по сравнению с классическим поясом, орбитальными эксцентриситетами, наклонами орбит и афелиями (Duncan et al., 1988; Levison, Duncan, 1997). Как и в случае с главным поясом, объекты пояса Койпера сформировались на ранних стадиях существования Солнечной системы, однако по составу они схожи с кометами, т. е. состоят из пыли и метановых, аммиачных и водяных льдов. Предполагается, что на некоторых объектах происходят процессы формирования органических веществ под действием радиации.

Облако Оорта — гипотетическая сферическая область, состоящая из ледяных тел, внутренняя граница которого пролегает в области рассеянного диска (один из регионов ТНО), а внешняя граница почти совпадает с радиусом области гравитационного влияния Солнца. Гипотеза о существовании облака основана на результатах наблюдений траекторий долгопериодических комет.

Полагается, что между ТНО и облаком Оорта находится предел гелиосферы, где уравниваются давления солнечной плазмы и межзвездной среды.

Гипотезы о существовании жизни на других планетах Солнечной системы

Исторически, в рамках дискуссии об обитаемости других планет Солнечной системы, наибольший интерес наблюдался по отношению к двум другим планетам земного типа – Венере и Марсу. Представления о возможной их обитаемости основывались на визуальных телескопических наблюдениях поверхности и атмосферы (вторая половина XIX – первая половина XX вв.). Возможность непосредственного исследования их поверхностей космическими аппаратами опровергла существовавшие в то время гипотезы о наличии на них развитых форм жизни и сформировала представление о полной их необитаемости. Тем не менее, в последние десятилетия вновь выдвигаются различные гипотезы о существовании на них жизни, как минимум в прошлом. Подобные гипотезы основаны, прежде всего, на накоплении знаний о текущем строении (в случае Марса) и моделировании их предшествовавших временных эпох, а также на исследованиях метеоритов и земных экстремофилов.

Отдельно стоит отметить, что в последние десятилетия разрабатываются различные планы освоения планет и спутников Солнечной системы. Однако в основе логики подобных построений лежит инженерная мысль, не учитывающая возможный спектр последствий взаимодействия с внеземным веществом. Прежде всего речь идет о возможности контаминирования земной органикой, а также нарушения структурной и хронологической целостности вещества, что приведет к невозможности его последующего анализа и интерпретации. Но также, если предполагать наличие на этих телах Солнечной системы уже существующей биоты, не исключена вероятность ее последующего привнесения на Землю.

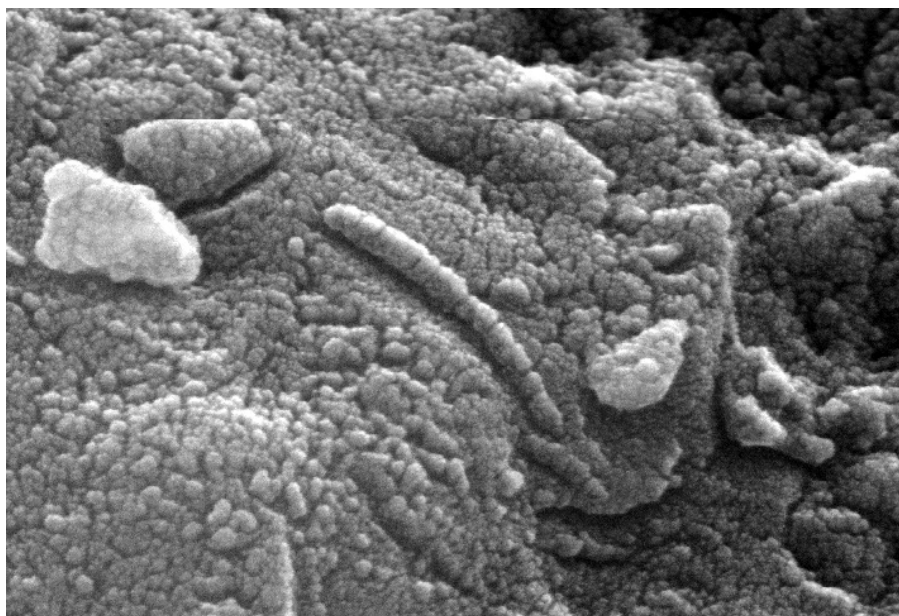


Рис. 72. Метеорит ALH84001 (ортопироксенит). Палочковидная форма (из числа разрешенных к публикации изображений) (Gibson, Jr et al., 2001).

Стоит также учитывать, что при ознакомлении с работами по планетам и спутникам Солнечной системы зачастую предметом исследований будет реголит, понимаемый как поверхностный слой грунта (или его модель) этих тел. Необходимо иметь в виду, что для каждого отдельно взятого тела Солнечной системы под реголитом будут пониматься совершенно различные несопоставимые породы.

Марс – планета земного типа, с каменной поверхностью, слабым магнитным полем, сильно разреженной (3–7 мбар) атмосферой, состоящей, в основном, из углекислого газа (~95%). Вулканическая активность низкая. Магнитное поле отсутствует. Интенсивность ИИ у поверхности в ~100 раз превосходит земное, как следствие, любые возможные биомаркеры в реголите деградируют за $\sim 10^8$ – 10^9 лет. Средняя температура на поверхности ~200 К. Рельеф поверхности схож с земным, имеет следы присутствия воды в прошлом, спектроскопический анализ показал наличие льда под поверхностью в полярных регионах (на глубине от нескольких метров, толщиной до нескольких километров). Присутствие в атмосфере Марса следов метана (~10 ppb) (который непрерывно разрушается вследствие фотодиссоциации), гипотетически, может подразумевать некий источник его генерации (как пример: реакции серпентинизации или метаболизм) (Ксанфомалити, 2009; Павлов, 2017).

В некоторых марсианских метеоритах обнаружены фоссилизированные остатки бактерий и протистов (рис. 72) (McKay et al., 1996; Gibson Jr. et al., 2001).

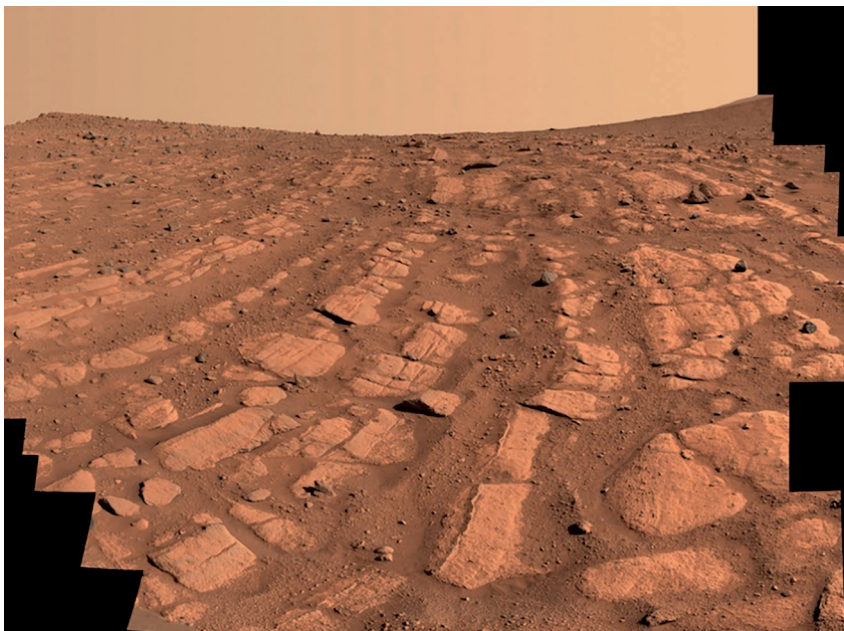


Рис. 73. Породы, интерпретируемые как осадочные, указывающие на существование древних водоемов (URL: <https://earthsky.org/space/river-on-mars-perseverance-rover/>).

Экспедиции марсоходов показали наличие на поверхности осадочных пород (рис. 73), следы глинистых минералов и солей, формирование которых происходит в водной среде, присутствие в этих минералах необходимых для жизни микроэлементов, и залежи подземного льда в полярных регионах.

Существуют две точки зрения относительно климата и атмосферы древнего Марса: согласно первой, на ранних этапах на планете был теплый влажный климат, согласно второй, он всегда был холодным. Первая гипотеза подразумевает наличие парникового эффекта, необходимого вследствие удаленности Марса от молодого Солнца, однако наиболее вероятно, что после улетучивания водорода ранняя атмосфера была окислительной и состояла из углекислого газа и азота. Однако подобная атмосфера отражает солнечные лучи, что влечет за собой снижение температуры и обуславливает невозможность возникновения парникового эффекта. Согласно второй гипотезе, водный пар мог образоваться в результате импактных событий или временного повышения температуры в результате колебания наклона оси вращения Марса под действием гравитации других планет и в отсутствие компенсирующего воздействия собственного массивного спутника (Фобос и Деймос не обладают достаточной массой). Однако, независимо от конкретных условий, малый размер планеты, ее удаленность от Солнца, низкая вулканическая активность и неспособность эффективно удерживать атмосферу привели к невозможности существования жизни на поверхности планеты (Nakamura, Tajika, 2001).

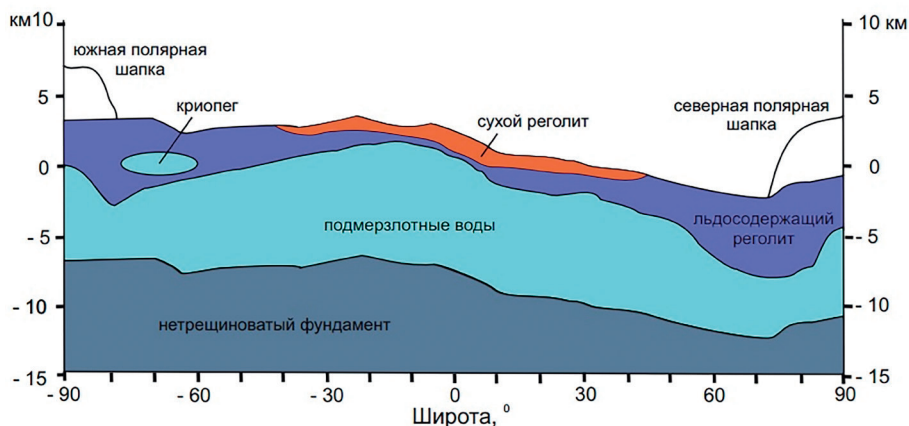


Рис. 74. Экологические ниши современного Марса на геологическом разрезе (Демидов, 2017).

Геологическая история Марса подразделяется на три периода: нойский (4,6–3,7 млрд лет назад – интенсивная метеоритная бомбардировка ледяными телами, рельефообразование и вероятное существование океана); гесперийский (3,7–2,9 млрд лет назад – потеря атмосферы (и, вероятно, магнитного поля), жидкой воды на поверхности, низкая частота кратерообразования); и амазонский (2,9 млрд лет назад – поныне – формирование современного климата) (Head, 1999; Ксанфомалити, 2009; Демидов, 2017).

Достоверно не известно, но предполагается, что в настоящее время вода на Марсе может быть представлена следующим образом (рис. 74): постоянные полярные шапки, подмерзлотные водоносные горизонты (достоверно не обнаружены), криопэги, льдосодержащий реголит. Подземные воды и криопэги представляются наиболее благоприятными для существования жизни эконизмами, имеющими земные аналоги, однако, на данном уровне технологического развития, их изучение не представляется возможным. Льдосодержащие реголиты имеют земные аналоги в виде многолетнемерзлых отложений Арктики, Антарктиды и высокогорных районов, однако их возраст на порядки превышает возраст земных аналогов. Полярные шапки, как предполагается, были сформированы атмосферным конденсатом, нынешняя их генерация обусловлена деятельностью полярных вулканов, характеризуется наличием прослоев пепельных отложений. В области Южного полюса обнаружен резервуар (вероятно, соленой) жидкой воды (Orosei et al., 2018). Полярная шапка Северного полушария характеризуется практически полным отсутствием примесей CO_2 (Ксанфомалити, 2009). Сухой реголит характеризуется подверженностью верхних 1,5 м грунта космическому излучению, практически полным отсутствием воды, содержанием хлоратов в поверхностных слоях, отсутствием следов жизни (по результатам миссии “Viking”). Также некоторое количество водного пара рассеяно в атмосфере (Демидов, 2017).

Венера – планета земного типа, с очень плотной атмосферой, состоящей, в основном, также из углекислого газа. Магнитного поля не имеет.

В прошлом предполагалось, что Венера обладает климатом, схожим с земным каменноугольного периода, однако проведенные исследования показали наличие парникового эффекта, обуславливающего невозможность существования жидкой воды на планете.

Предполагается, что содержание углекислого газа на Венере близко к земному, однако на Земле значительная его часть растворена в океане (в форме карбонатных соединений), в то время как на Венере океанов нет, причина чего, возможно, обусловлена большей близостью к Солнцу, а значит, более высокой температурой на ранних стадиях планетарной эволюции. Под действием ультрафиолета молекулы водяного пара разложились на кислород и водород, водород испарился, кислород связался с углеродом. На Земле подобный сценарий не произошел вследствие существования водных океанов. Тем не менее, существует гипотеза, согласно которой на Венере, в течение нескольких сотен миллионов лет до наступления парникового эффекта, были благоприятные условия для развития жизни. Картографирование поверхности Венеры показало ее примерно однородный возраст (600–800 млн лет), что указывает на событие, в результате которого поверхность планеты покрылась лавой, что, предполагается, было вызвано накоплением критической внутренней температуры планеты. Данное событие уничтожило геологические свидетельства предшествовавших эпох, однако в породах могли остаться следы химической активности (Kasting, 1988).

Существует гипотеза о возможности существования жизни в некоторых слоях атмосферы, где температура и давление не столь экстремальны. Данная гипотеза является одним из предлагаемых объяснений наличия темных участков в УФ спектре. Температура данных слоев атмосферы варьирует от 30 до 70 °С с давлением, близким к земному. В ходе ранних миссий на Венеру в нижних слоях облаков были обнаружены продолговатые частицы микронной длины, покрытые атомами серы и по своим размерам похожие на небольшие бактерии. Тем не менее, на данный момент проб из этих слоев атмосферы не получено (Schulze-Makuch et al., 2004).

Спутники газовых гигантов

Изучение внешних областей Солнечной системы показало, что существует класс космических объектов, физико-химические условия на которых не исключают возможность существования биосферы:

- 1) наличие на космическом объекте жидкой воды в течение геологически значимого периода времени;
- 2) наличие большого количества разнообразных органических соединений;
- 3) наличие источников энергии, необходимых для поддержания биохимических процессов, в том числе в виде химической энергии.

Потенциально обитаемые ледяные спутники

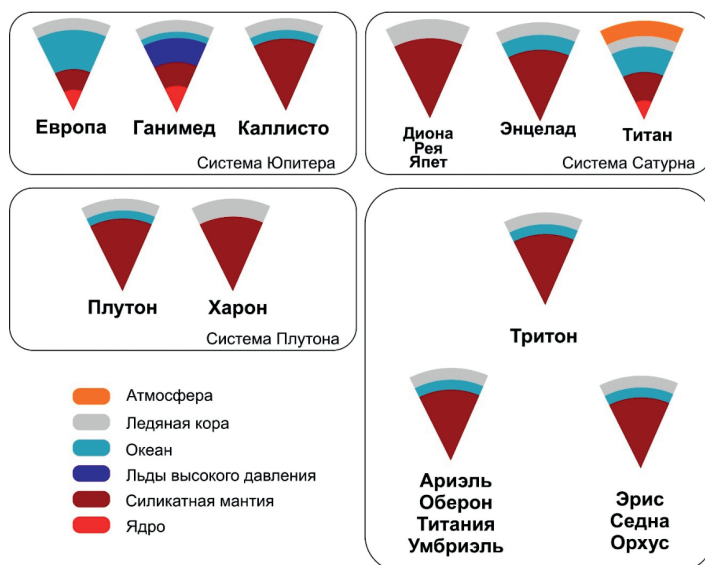


Рис. 75. Моделируемое строение некоторых ледяных спутников Солнечной системы (Симаков, 2017).

Этими объектами являются ледяные спутники планет-гигантов: Юпитера (Европа, Ганимед, Каллисто), Сатурна (Титан, Энцелад), Урана (Ариэль, Оберон, Титания и Умбриэль), Нептуна (Тритон). Некоторые карликовые планеты, такие как Церера, Эрис, Седна и Орхус, также попадают в категорию потенциально обитаемых миров из-за возможности существования на них глубинного океана (рис. 75).

Стоит, впрочем, отметить недостаточность эмпирических данных по спутникам и следующей из этого необходимостью во многом полагаться на моделирование.

Спутники Юпитера

Европа

Спутник Юпитера, поверхность состоит из водяного льда (толщиной от нескольких километров). Под поверхностью предполагается наличие жидкого океана, температура которого поддерживается приливными силами. Океан соленый, вероятно высокая кислотность (в основном обусловленная вулканизмом Ио – другого спутника Юпитера). Имеется сильное магнитное поле (движение соленой воды на спутниках, находящихся в магнитном поле Юпитера, вызывает в толще воды электрические токи, создающие собственное магнитное поле). Предполагается наличие водных гейзеров, подобных тому, что обнаружен на Энцеладе. Также предполагаются процессы рельефообразования (возраст современной поверхности оценивается в ~30 млн лет). Находится в приливном захвате по отношению к Юпитеру (всегда повернута к нему одной стороной) (Ксанфомалити, 2009).



Рис. 76. Области чистого водного льда (светлые области) и смеси водного льда с гидратированными солями (темные области) на поверхности Европы (URL: <https://science.nasa.gov/resource/reddish-bands-on-europa/>).

Температура воды вблизи поверхностного слоя предполагается близкой к нулю, с постепенным повышением по мере увеличения глубины. Расчеты показывают, что, например, объем жидкого океана внутри Европы превосходит объем жидкой воды нашей планеты в несколько раз. Таким образом, внутренние океаны ледяных спутников планет-гигантов могут предоставлять огромное жизненное пространство для внеземных организмов. Компоненты, необходимые для поддержания окислительно-восстановительного баланса возможной биосферы, могут синтезироваться в нескольких районах: гидротермальные системы на дне глобального внутреннего океана, реакции «холодной серпентинизации» на границе силикатная мантия/океан, радиолитические окислители, получающиеся на поверхности спутников под воздействием солнечной радиации и заряженных частиц из магнитосферы планеты-гиганта. Дневная доза излучения на поверхности Европы составляет около 540 бэр (5,4 Зв) – почти в миллион раз больше, чем на Земле, хотя ледяная корка на поверхности может оказывать экранирующее действие. Радиолит поверхностного льда расщепляет воду на ее составляющие – кислород и водород, которые частично адсорбируются поверхностью, а частично покидают ее, образуя атмосферу. Основной компонент атмосферы Европы – молекулярный кислород, поскольку у него длительный период жизни, а легкий водород быстро улетает в космическое пространство. Кроме того, на самой поверхности обнаружено большое количество перекиси водорода и ионов сульфата – окислителей, которые могут быть доставлены внутрь спутника (рис. 76). Оценки параметров такой доставки говорят о том, что до 4×10^9 моль окислителей в год может пополнять состав океанической воды (Симаков, 2017).

Химический состав океана Европы

Важным вопросом является определение возможного химического состава внутреннего океана: 1) нейтральный – система, состоящая из $\text{Na-Mg-SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ компонентов; 2) щелочной ($\text{Na-SO}_4\text{-CO}_2$); 3) кислотный (Na-H-Mg-SO_4). Любой из этих вариантов способен поддерживать существование биологических систем. Химический состав ювенильного океана зависит от процессов выщелачивания силикатных пород, «серпентинизации», и контролируется кинетически и термодинамически. По расчетам, вода может проникать вглубь силикатной мантии до 25 км, в процессе чего выделяется большое количество водорода – одного из ключевых компонентов многих биохимических циклов. Другим основным вопросом является исходное состояние азота и углерода и их содержание в материале, из которого образовался спутник (Симаков, 2017).

Ганимед

Предполагается, что под ледяной поверхностью толщиной 30–120 км может находиться океан глубиной 800–900 км. Обладает магнитным полем, которое, в отличие от других ледяных лун, дипольное (как и у Земли), что указывает на возможное существование расплавленного железного ядра (Vance, 2019). Мантия и ядро покрыты силикатной корой. Полагается, что дно океана покрыто льдами высокого давления, которые препятствуют процессам серпентинизации, что снижает потенциал для возникновения жизни (Симаков, 2017).

Каллисто

Поверхность не имеет следов геологической активности за последние 4 млрд лет. При этом, обладает собственным магнитным полем, что указывает на возможное существование подледного океана. Гипотетически, под верхними ~100 км льда может наблюдаться явление твердотельной конвекции. Предполагается, что высокое давление ледяной поверхности препятствует образованию льдов высокого давления на дне (Vance, 2019).

Спутники Сатурна

Экзобиология Титана

Спутник Сатурна, открытый в марте 1655 г. на расстоянии 9,546 а.е. от Солнца, входит в число наиболее интересных астробиологических объектов Солнечной системы. Это единственный спутник, имеющий атмосферу, сравнимую по плотности и составу с атмосферами планет земной группы, и жидкость на поверхности.

Радиус спутника составляет 2575 км (второй по размеру, уступает только Ганимеду, спутнику Юпитера), масса – $1,35 \times 10^{26}$ г, плотность – 1880 кг/м^3 , что позволяет предположить его состав как смесь силикатов и водяного льда в соотношении 50/50. Давление у поверхности составляет 146,7 кПа, температура 95 К.

Теоретические оценки говорят о том, что аккреционной энергии было вполне достаточно, чтобы повысить температуру поверхности Титана в начальный период его истории до 500 К и более, что привело к образованию

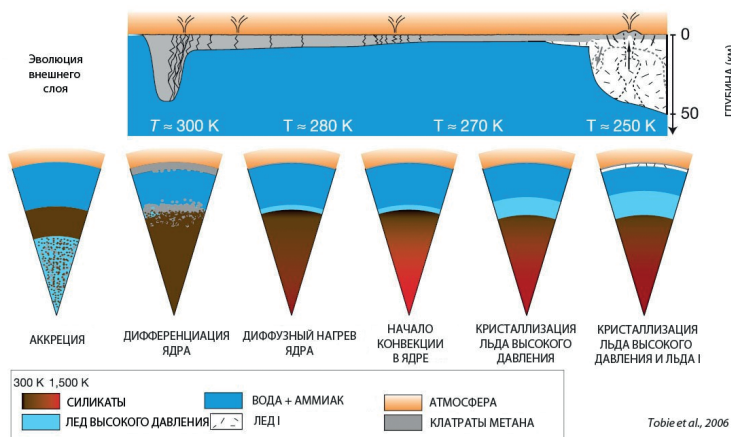


Рис. 77. Моделируемая эволюция Титана (Tobie et al., 2006).

плотной атмосферы, состоящей из воды и аммиака, и глубокого океана. В это же время произошла дифференциация внутренних слоев спутника с образованием силикатного ядра и внешнего водного слоя (рис. 77). Оценочное время существования ювенильного океана – около 100 млн лет. Если жизнь возникла в это время, то вполне могла сохраниться и до наших дней.

Один из основных вопросов — исходное состояние азота и углерода и их содержание в материале, из которого образовался спутник. И если азот был, скорее всего, в составе аммиака, то вопрос об источнике метана остается открытым. Был предложен механизм гидротермальных реакций внутри спутника, которые приводили к синтезу большого количества водорода. Последующая его реакция с углекислым газом и привела к синтезу метана. С другой стороны, возможно, метан был уже в составе материала, из которого образовалась система Сатурна.

Химический состав ювенильного океана зависит от процессов выщелачивания силикатных пород и контролируется кинетически и термодинамически. Растворение и окисление первичных минералов, осаждение вторичных, таких как Mg-Fe-филлосиликаты, магнетит, фосфаты, приводит к крайне восстановительному (обогащенному H_2) и щелочному первичному океану. Химический состав океана мог меняться очень быстро по геологическим меркам. В процессе остывания спутника водный океан покрывался ледяной корой.

Как уже говорилось, Титан – единственный спутник в Солнечной системе, имеющий плотную атмосферу, давление которой у поверхности в полтора раза превышает земное. Атмосфера азотосодержащая, предполагается, что возникла уже после образования спутника (Simakov, 2000).

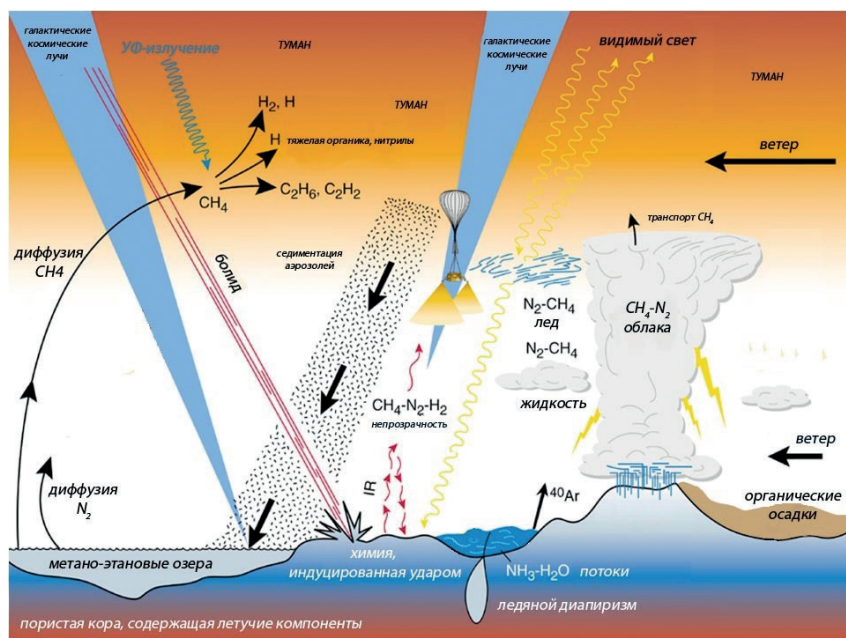


Рис. 78. Моделирование атмосферы и поверхности Титана по данным зонда Гюйгенса (Lunine, 1990).

Основные данные по составу атмосферы Титана были получены при спуске зонда Гюйгенса на поверхность спутника (рис. 78) (Niemann et al., 2005). Основной компонент атмосферы – азот (причем соотношение $^{14}\text{N}_2/^{15}\text{N}_2$ значительно ниже, чем в земной атмосфере), метан (1,4–4,9%, в зависимости от высоты), аргон с неожиданно высоким содержанием отношением $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$. Сюрпризом оказалось отсутствие таких благородных газов, как Хе и Кг ($<10^{-8}$), а также СО и CO_2 . Возможно, углекислый газ присутствует на поверхности или внутри спутника.

Источники энергии в атмосфере – УФ излучение Солнца, даже несмотря на то, что оно составляет лишь 1,1% от земного; космические лучи; солнечный ветер (в те моменты, когда спутник выходит за пределы магнитосферы Сатурна); потоки заряженных частиц магнитосферы Сатурна; электрические разряды.

Вся атмосферная химия Титана (рис. 79) построена на радикальных реакциях под действием ультрафиолета и потоков заряженных частиц. Цепь фотохимических превращений азота и метана могла привести, в итоге, к образованию сложных углеводородов, предельных и непредельных, нитрилов и изонитрилов. В атмосфере были зафиксированы такие азотсодержащие соединения, как синильная кислота (HCN), цианоацетилен (HC_3N) и цианоген (C_2N_2), ацетилен и диацетилен, полиины и некоторые органические нитрилы.

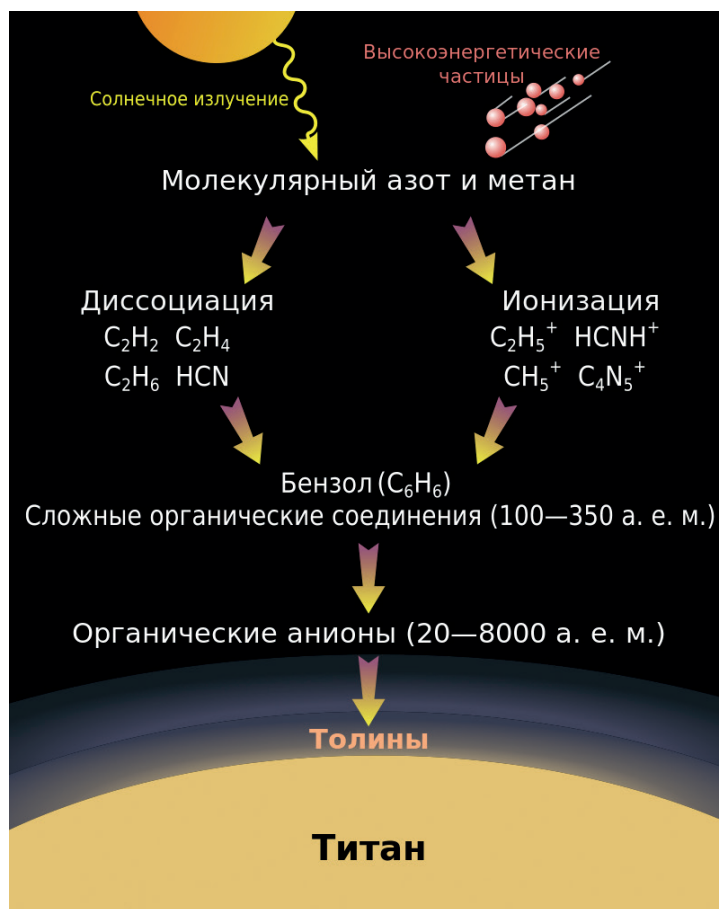


Рис. 79. Атмосферная химия Титана
(URL: <https://science.nasa.gov/missions/cassini/cassini-spacecraft-reveals-evidence-of-tholin-formation-at-high-altitudes-in-titans-atmosphere>).

При попытках воспроизвести в лаборатории химию атмосферы Титана, состоящей из азота и метана, было получено более 150 различных органических молекул. Включение в реакционную смесь небольшого количества CO еще увеличило (>200) разнообразие полученных соединений и привело к включению в состав органики атома кислорода. Основным продуктом подобных реакций становится органическое полимерное вещество очень сложного состава – толины. Подобная высокомолекулярная органика образует в атмосфере Титана облачный слой – углеводородный смог, укрывающий поверхность спутника от солнечного света и придающий ему оранжевый цвет.

В атмосфере существуют три слоя толинов. Точный состав и строение толинов известны плохо. Во время своего спуска Гюйгенс обнаружил органические молекулы весом до 100 дальтон (пределы прибора) на высотах

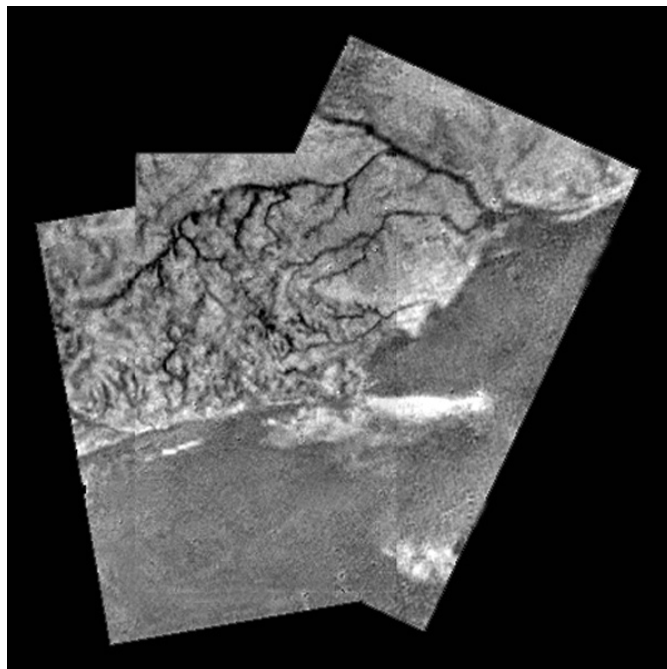


Рис. 80. Сеть временных речных каналов на поверхности Титана. Их наполнение происходит за счет метановых дождей. (URL: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/titan_images.html).

до 1200 км (Israël, 2005). В качестве основных продуктов пиролиза (600 °С) были зафиксированы аммиак (NH_3) и цианистый водород (HCN), что позволило предположить наличие в атмосферной органике таких групп, как нитрилы ($-\text{CN}$), изонитрилы ($-\text{NC}$), имино- ($-\text{C}=\text{N}-$) и аминокруппы ($-\text{NH}_2$, $-\text{NH}-$, $-\text{N}<$). Углеводородный смог играет важную роль в атмосферном температурном режиме. Из-за него возникает парниковый эффект, который не позволяет конденсироваться азоту.

Поверхность Титана очень молода по сравнению с другими спутниками системы Сатурна, такими как Реа, Тетис, Диона, чья поверхность покрыта метеоритными кратерами (Moore, Pappalardo, 2011). На Титане же, на 20% поверхности, исследованной радаром, было обнаружено только около 50 кратеров ударного происхождения. Большинство кратеров испещрено каналами, появившимися, очевидно, под воздействием потоков жидкости (рис. 80). Молодость поверхности указывает на динамические геологические процессы, протекающие на спутнике. Кроме того, поверхность спутника носит явные следы атмосферной эрозии – были обнаружены каньоны, русла рек, углеводородные озера, холмы и дюны. Отличительная черта поверхности – она несет на себе следы процессов, происходящих как в атмосфере, так и внутри спутника.

Дюны, в отличие от земных, состоят из гранул органического вещества, источник которого – сложные процессы, протекающие в атмосфере Титана. Один из основных процессов, требующих внимания – это взаимодействие воды с органическими соединениями, синтезировавшимися в богатой атмосфере Титана. Следует обратить внимание на количественный и качественный состав поверхностной органики. Это полимеры, которые при гидролизе способны давать многие биологически значимые соединения, в частности, аминокислоты и основания нуклеиновых кислот, карбоновые кислоты и другие. Возможные источники жидкой воды на поверхности – криовулканизм и удары метеоритов, которые служат связующим звеном между внутренним теплым (по сравнению с температурой на поверхности) океаном и холодной, но химически очень активной атмосферой.

Экспериментальные работы показали, что гидролиз толинов даже при низких температурах (253 и 293 К) приводит к синтезу таких соединений, как тимин, аспарагин и аспарагиновая кислота, глутамин и глутаминовая кислота, гистидин (Neish et al., 2010). Основания нуклеиновых кислот также могут синтезироваться в подобных условиях (Levy et al., 2000). Более 10% поверхности Титана могут быть покрыты ударными кратерами достаточно больших размеров, чтобы в определенный и достаточно длительный период времени существовали значительные объемы жидкой воды.

Время существования подобных водоемов может составлять 10^4 – 10^6 лет, в зависимости от диаметра кратера и состава водной смеси. Например, время существования объема жидкости 1 км^3 составит 10^5 лет, жидкость в кратере диаметром 15 км будет существовать 100–1 000 лет, 150 км – 1000–10 000 лет. Примерно 70% органики на поверхности Титана могут подвергаться воздействию жидкой воды в течение как минимум 1 000 лет.

Существует несколько механизмов для доставки вновь синтезированных компонентов внутрь спутника – ледяной диапиризм, трещины в ледяном слое, криовулканические и плутонические системы.

На Титане имеются отчетливые признаки вулканической (криовулканической) активности, в которой роль лавы играет водно-аммиачная смесь с различными органическими и неорганическими примесями. «Кассини» зафиксировал несколько образований, которые по своей морфологии очень похожи на остатки извержения подобных криовулканов. Считается, что криовулканизм – один из основных поставщиков метана в атмосферу. И мощный источник метана, зафиксированный на поверхности, рассматривается как первый признак криовулкана.

С экзобиологической точки зрения особенно интересно внутреннее строение Титана. В настоящее время спутник представляет собой несколько сфер: внутреннее силикатное ядро (0–1750 км), покрытое слоем льда высокого давления (1750–2200 км), далее следует внутренний океан жидкой воды (2200–2505 км), покрытый сверху ледяной корой (2505–2575 км).

Океан представляет собой сложную химическую систему, содержащую большое количество разнообразных соединений, как органических, так и неорганических. Большинство неорганических компонентов было в составе исходных компонентов протопланетарной туманности, из которой образовалась система Сатурна. Естественно, точный состав океанической воды в настоящее время не известен. Однако теоретические модели показывают, что экстракция хондритного материала, которая происходила на стадии дифференциации спутника, приводит к выделению таких важных компонентов, как K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Br^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- и многих других. Дополнительное количество разнообразных веществ, в том числе сложной органики, могло быть доставлено на спутник кометами и метеоритами. Фосфор, сера и другие элементы, необходимые для биохимии, также присутствуют в исходном материале. Таким образом, мы имеем хорошее место для зарождения литоавтотрофных биохимических процессов.

Основное свойство любого живого организма – использовать энергию химических реакций для поддержания всех жизненных процессов. В земных условиях организмы используют различные окислительно-восстановительные пары, основной из которых является $O_2 \rightarrow H_2O$ (аэробное дыхание). Вполне можно подобрать такую пару, на которой может быть основана биосфера Титана. Например, $NH_4^+ \rightarrow N_2$; $NO_3^- \rightarrow N_2$; $CH_4 \rightarrow CO_2$ и обратная ей $CO_2 \rightarrow CH_4$; $SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$ и множество других. В качестве источника углерода организмы могут использовать метанол, этанол, карбонаты (HCO_3^- , CO_3^{2-}), формиат ($HCOO^-$). Хемолитотрофные организмы могут быть основой биосферы, снабжая органическими соединениями гетеротрофов.

Таким образом, условия на спутнике удовлетворяют всем необходимым критериям существования биосферы. Предложены несколько возможных ниш для существования биологических сообществ: 1) сам слой жидкой воды, где температура и давление вполне соответствуют необходимым параметрам и который может содержать разнообразные неорганические и органические составляющие; 2) нижняя поверхность льда, имеющая большую площадь; 3) поры, каналы различных размеров и пакеты жидкой воды в нижнем слое ледяной коры; 4) места криовулканической активности на поверхности спутника, где внутренний водный слой может реагировать с продуктами сложной атмосферной фотохимии; 5) разветвленная сеть пещер и других образований, которая может быть связана как с криогенным вулканизмом, так и с воздействием приливных сил; 6) трещины в ледяном слое; 7) кратеры, оставшиеся после падения метеоритов, в которых могут образовываться значительные массивы жидкой воды на достаточно продолжительное время; 8) места гидротермальной активности на дне океана.

Основная проблема существования биосферы внутри Титана – замкнутость системы. В любой живой организации для ее продолжительного существования необходима подпитка энергией и веществом. Если в качестве дви-

жущей силы может выступать окислительно-восстановительный потенциал определенной реакции, то возникает вопрос поставки исходных питательных веществ – реагентов. Это можно рассмотреть на примере такого восстановительного агента, как молекулярный водород.

Большое количество молекулярного водорода представляет собой неисчерпаемый источник энергии для поддержания литотрофных микробиологических сообществ. Возможные источники водорода: 1) гидротермальные системы на дне океана; 2) реакция воды со свежими минеральными поверхностями и ионами железа; 3) радиолиз воды и льда, ^{40}K ; 4) электролиз грязного льда из-за воздействия электрических токов, возникающих в сильном магнитном поле Сатурна.

Возможно несколько биохимических циклов внутри водного океана Титана: азотный цикл (N-цикл); серный (S-цикл); железный (Fe-цикл) и углеродный (метановый, C-цикл), которые, несомненно, могут и должны быть связаны друг с другом.

Огромное преимущество для выживания биологических систем дает легкая приспособляемость живых организмов к изменениям в окружающей среде. При дефиците определенного вещества система может перейти на использование другого. Например, на Земле анаэробно дышащая бактерия *Shewanella oneidensis* может восстанавливать O_2 , V (V), Cr (VI), Fe (III), Mn (IV), Tc (VII), U (VI), SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$, NO_2^- , NO_3^- , фумарат, глицин и триметиламин-N-оксид. Здесь мы видим огромную гибкость живой материи, способность не только менять компоненты базовой реакции, но и менять само течение реакции на обратное.

Относительно недавно был открыт интересный микроорганизм (Jetten et al., 1999), который использует аммоний в качестве неорганического донора электронов процессе денитрификации $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Реакция очень благоприятна энергетически (-350 кДж/моль) и представляет хороший источник энергии для метаболизма. В число интермедиатов этой реакции входят гидроксиламин (NH_2OH) и гидразин (N_2H_2). Это первый пример использования в земной биохимии ракетного топлива – гидразина. Оба компонента широко распространены на Титане.

Таким образом, мы видим, что на Титане выполняются три основных условия, необходимые для существования жизни: 1) наличие жидкой воды в течение длительного (геологического) периода времени; 2) существование широкого набора химических элементов и сложных органических соединений; 3) наличие источников энергии. Поэтому Титан входит в набор наиболее привлекательных, с астробиологической точки зрения, миров.

Энцелад

Энцелад – спутник Сатурна, поверхность которого покрыта льдом (толщина 30–40 км, вероятно, может значительно варьировать), под которым находится океан жидкой воды (более 10 км глубиной), сформированный за счет приливных сил. В Южном полушарии происходит выброс газообразного

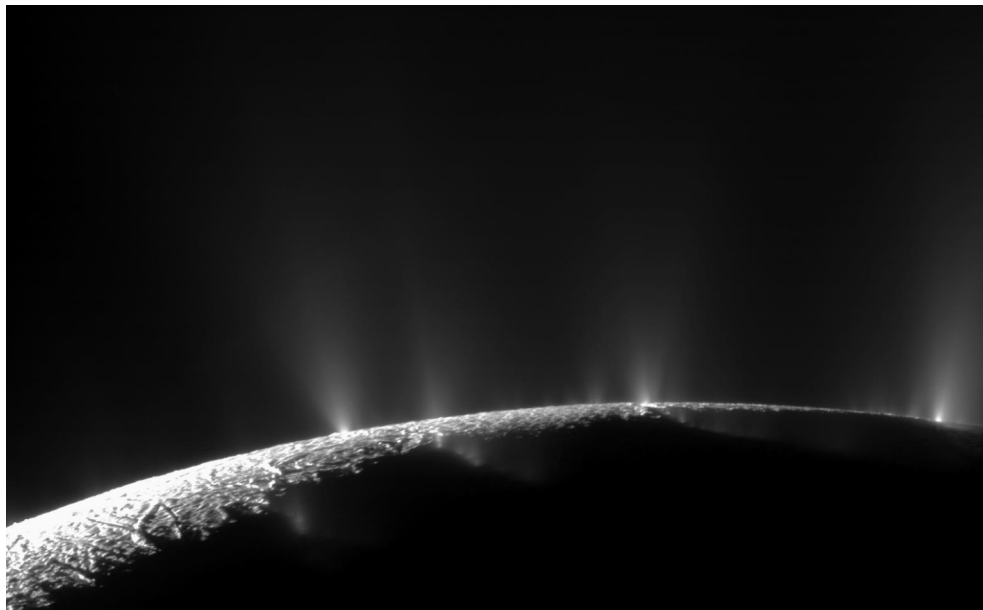


Рис. 81. Выброс вещества (лед, водяной пар, органические соединения) из Южного полушария Энцелада (URL: <https://rps.nasa.gov/resources/50/geysers-of-enceladus/>).

вещества (рис. 81), анализ которого показал, что струя состоит из водяного пара с большим содержанием углеводорода и органических молекул (вода 93%, азот 4%, углекислый газ 3,2%, метан 1,6%, следовые количества аммиака, ацетилен, синильной кислоты, наночастицы кремния, указывающие на возможные гидротермальные (>90 °C) реакции). Обнаружение солей калия и натрия позволяет предположить возможное сходство океанов Земли и Энцелада. Поверхность Южного полушария несет следы недавней геологической активности, в то время как Северное покрыто древними кратерами, свидетельствующими об отсутствии какой-либо значительной термальной активности (Симаков, 2017).

Также предполагается существование внутреннего океана на Дионе, не исключено существование океанов (в настоящем времени или в прошлом) на Рее и Япете.

Другие потенциально обитаемые тела (спутники Урана и Нептуна, пояс астероидов, ТНО)

Полагается, что подледным океаном могут обладать спутники Урана: Ариэль, Оберон, Титания, Умбриэль. Также перспективен спутник Нептуна Тритон, на поверхности которого обнаружена активность гейзеров, а сама она несет признаки геологической и криовулканической активности.

Даже некоторые тела из пояса астероидов могли иметь внутренние океаны. В качестве примера можно рассмотреть Цереру. При диаметре около 950 км Церера является крупнейшим и наиболее массивным телом в поясе астероидов. Сферическая форма карликовой планеты и ее плотность говорят о том, что она имеет в своем составе 17–30% водного льда по массе и ее недра дифференцированы. Лед обнаружен и на поверхности планетоида, наряду с множеством гидратированных, глинистых минералов, карбонатов и органических соединений. Яркие пятна на снимках теневой стороны оказались замерзшими озерами на дне кратеров, образованных в результате падения метеоритов (Симаков, 2017).

Также высказываются предположения о возможности существования океанов на Плутоне, Хароне, Эриде, Седне и Орхусе (ТНО) за счет гравитационных взаимодействий и изотопного распада.

Внутренние океаны ледяных спутников планет-гигантов могут быть широко распространены во внесолнечных планетарных системах, что значительно расширяет зону обитаемости в любой звездной системе.

4.2. Гипотеза кометной панспермии

Кометы представляют собой малые (диаметр ядер в диапазоне от десятков до сотен км) низкоальбедные космические тела. В Солнечной системе сосредоточены в поясе Койпера (короткопериодические) и облаке Оорта (долгопериодические). Из-за гравитационных взаимодействий их орбиты могут становиться эллиптическими, что влечет за собой, как полагается, их миграцию во внутренние области Солнечной системы. По мере приближения к звезде происходит их нагрев, в результате которого вокруг ледяного ядра происходит формирование кометарной атмосферы – комы (диаметром от тысяч до миллионов километров). Во внутренних областях системы, под давлением радиации и солнечного ветра, происходит формирование хвостов кометы – ионного и пылевого, длина которых может достигать 1 а.е. и более.

Документированная история наблюдений за кометами насчитывает порядка пяти тысячелетий, но началом их исследования с научной точки зрения можно считать наблюдение Кометы Кирха 1680 г. Началом современного этапа в изучении физических и химических свойств комет можно считать исследования 1950-х гг. (Whipple, 1950, 1951; Delsemme, Swings, 1952).

Динамика движения комет

Кометы подразделяются на два основных класса: непериодические и периодические, последние, в свою очередь, подразделяются на короткопериодические и долгопериодические. Периодические кометы имеют эллиптические орбиты с большими эксцентриситетами, плоскость орбит большинства

из них несущественно отклонена от плоскости эклиптики (плоскости вращения Земли вокруг Солнца). Ближайшая к Солнцу точка орбиты кометы – перигелий, а самая дальняя (если имеется) – афелий. Короткопериодическими кометами называют те кометы, период обращения которых составляет менее 200 лет, плоскости их орбит, как правило, лежат в плоскости эклиптики или несущественно отклонены от нее. Долгопериодические кометы имеют период обращения более 200 лет, их орбиты не зависят от плоскости эклиптики и обладают значительным эксцентриситетом. Непериодические кометы имеют гиперболические траектории и проходят вблизи Солнца лишь единожды.

Гравитационные силы планет-гигантов (в большинстве случаев Юпитера) могут изменить траектории пролетающих в их близи комет (Язев, 2018). В таком случае, долгопериодические кометы могут стать короткопериодическими и наоборот, т. е. эксцентриситет их орбит может значительно измениться. Более того, в результате таких взаимодействий кометы могут покинуть Солнечную систему. Один из факторов, влияющих на непостоянство положения афелиев, наблюдаемое у большинства комет – гравитационное влияние планет.

Происхождение комет

Считается, что кометы формируются из вещества протопланетного диска на этапе образования планет, или даже ранее (Weissman et al., 2020). В их составе имеются летучие соединения, которые могли сконденсироваться и продолжать существовать только при низкой температуре на далеких орбитах в области пояса Койпера (короткопериодические), либо в облаке Оорта (долгопериодические). Но в составе комет также обнаружены минералы, которые могут образовываться только во внутренних областях с высокой температурой. Поэтому вопрос о происхождении комет имеет дискуссионный характер.

Строение комет

Ядра комет состоят, в основном, из водного льда (~90%). Также в них входят различные летучие газы (двуокись углерода, монооксид углерода, метан и аммиак), сложные органические соединения и керогеноподобное вещество, а также различные минералы, межзвездная и межгалактическая космическая пыль. По мере выброса в окружающее пространство воды, органических и летучих соединений, с ними захватываются значительные количества органических и кремнистых частиц, диапазоном диаметров от 0,1 мкм до 1 мм (большинство из них имеют радиус 0,2–20 мкм). Часть исторгаемых из ядра частиц (нелетучие органические соединения, минеральные, углеродосодержащие и керогеноподобные частицы, зерна пыли) аккумулируются на поверхности, обуславливая экстремально низкие альбедо комет (от 0,02 до 0,06).



Рис. 82. Гипотетическое строение ядра кометы
(URL: <https://explanet.info/Chapter14.htm>).

Существуют две модели, описывающие строение ядра кометы (рис. 82) – модель «грязного снежного кома» (1950) (Whipple, 1950), согласно которой ядра состоят из замороженной воды и газов, с вкраплениями частиц из более твердых материалов; и модель «влажной кометы» (2005), согласно которой кометы представляют собой своего рода сосуды под давлением, содержащие внутри воду (жидкую, лед и газ). Полагается, что модель «грязного снежного кома» больше подходит для непериодических и долгопериодических комет, а модель «влажной кометы» для короткопериодических (так как они неоднократно подвергались нагреву) (Sheldon, 2015).

По мере приближения к Солнцу (на радиусе орбиты Юпитера), вокруг ядра образуется кома – светящееся облако из пыли и газа, формирующееся за счет сублимации вещества ядра и частиц пыли. По размерам кома может быть сравнима с диаметром Земли. Из комы вытягиваются два хвоста – один пылевой, другой ионный (из ионизированных молекул газа). Ионный хвост всегда направлен радиально от звезды, а пылевой хвост вдоль орбиты кометы (рис. 83) (Sekanina, 2007).

Дальнейший рост температуры приводит к формированию активных газовых гейзеров (джетов), плавлению льда, затвердеванию внешней коры, образованию внутренних полостей, заполненных паром.

Рассматривают три типа явлений, связанных с эволюцией комет: струйные выбросы (джеты) в ядрах комет, вспышки и фрагментация (разрушение) ядра (Sekanina, 2007). Газовые джеты состоят из микроскопических частиц пыли и выходят из дискретных точек поверхности кометы, что представляет ее обычную активность. Вспышки – это кратковременная сильная активность, приводящая к выбросам частей большего размера (с валун/булыжник).

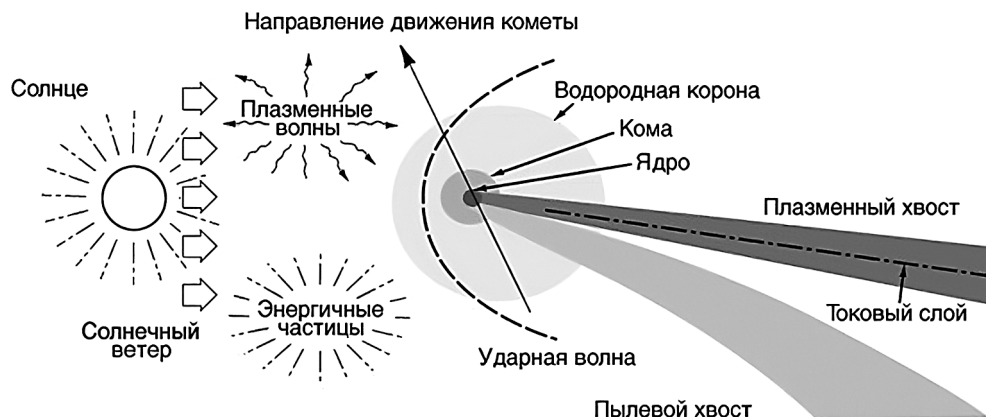


Рис. 83. Прохождение кометы мимо звезды с изображением хвостов, которые отражают излучение Солнца, вызывая свечение (URL: <https://galspace.spb.ru/index382.html>).

Вспышки происходят в кометах довольно часто. Скорость выброса достигает нескольких сотен метров в секунду для микроскопических частиц, но для более крупных зерен она ниже. Серьезную активность кометы представляет фрагментация ядра, которая происходит в результате вспышек. От ядра отделяются крупные объекты, разрушается большая часть кометы, или даже происходит полный ее распад. Это последняя стадия «жизни кометы». В зависимости от действующих факторов можно выделить приливную и неприливную фрагментации ядра. Приливная фрагментация возникает в результате приливного напряжения, создаваемого Солнцем или Юпитером, когда комета пролетает вблизи них, примерно в одном солнечном радиусе от фотосферы Солнца или в одном радиусе Юпитера от его поверхности. Другие планеты недостаточно массивны, чтобы разбить кометы приливным воздействием. В основном же наблюдается неприливная фрагментация, вызванная вращением, тепловым расширением, увеличением давления и выходом летучих веществ из-под поверхности. Для комет из облака Оорта фрагментация может быть вызвана внутренним радиоактивным нагревом. Разрушение комет, в конечном счете, приводит к формированию метеороидных популяций.

Астероиды формируются во внутренних областях Солнечной системы на стадии протопланетного диска. По сравнению с кометами они довольно прочны, в то время как долгопериодические кометы легко распадаются, часто на своем первом обороте вокруг Солнца. Короткопериодические кометы, с другой стороны, совершают множество проходов через перигелий гораздо меньших радиусов, чем долгопериодические кометы, не разрушаясь. Это согласуется с тем, что жидкая вода впервые появляется на долгопериодической комете и проникает вовнутрь, дестабилизируя ее. С другой стороны,

Таблица 9. Телескопические различия между астероидами, долгопериодическими кометами (ДПК) и короткопериодическими кометами (КПК) (с изм.). (Sheldon, 2015)

Параметр сравнения	Астероиды	ДПК	КПК
1. Период собственного вращения	Часы	Часы	Дни
2. Состав хвоста	Хвост отсутствует	Пыль и газ	В основном газ
3. Форма	Сферическая	Сферическая	Вытянутая / Гантелеобразная
4. Плазменный хвост	Отсутствует	Редко	Появляется и исчезает на границах сектора
5. Прецессия	Гироскопическая	Неизвестно	Нулевая
6. Радиальная диффузия	Нет	Небольшая	Огромная
7. Предел прочности	Высокий	Очень низкий	Спорадический

короткопериодические кометы имеют повышенную прочность на растяжение, будучи покрытыми тугоплавким слоем органических веществ. Различия между астероидами, долгопериодическими и короткопериодическими кометами приведены в таблице 9.

Исследования комет

Исследования комет проводились в рамках миссий Vega-1, Vega-2, Giotto (1P/Halley); Deep Space 1 (Borelly); Stardust (81P/Wild 2); Deep Impact (9P/Tempel 1); EPOXI (103P/Hartley 2); Stardust-NEXT (9P/Tempel 1); EKA Rosetta (67P/Churyumov-Gerasimenko).

Исследования короткопериодической кометы 1P/Halley (1986) посредством аппаратов Vega-1, Vega-2 и Giotto показали, что температура ядра составляет порядка 300–400 К, хотя ранее считалось, что она составляет 180–200 К. Спектральный анализ эмитированного вещества показал наличие частиц, схожих с углистыми хондритами типа CI, углерод ^{12}C и ^{13}C , азот и клатратный лед – т. е. кристаллический лед с включениями (в основном H, C, O). Кристаллическая структура льда указывает на возможное формирование кометы во внутренних областях Солнечной системы, так как для внешних характерен аморфный лед без включений. Также был обнаружен атомарный фосфор (Keller, Kührt, 2020; Taylor et al., 2017).

В результате миссии Stardust (2004) было собрано вещество пылевого хвоста кометы 81P/Wild-2. Обнаружены амины и глицин. Анализ льда и минеральной фракции показал, что комета сформирована веществом как из внутренних областей Солнечной системы (температура образования ~2000 К), так и из внешних (температура образования <50 К). Также был обнаружен фосфор в составе фосфатных минералов (вероятно, апатит).

В ходе миссии Rosetta (2014–2016) была исследована комета 67P/Churyumov-Gerasimenko, обнаружены, в числе прочих, фосфор, фтор, сероводород и цианистый водород, весь комплекс биофильных элементов CHNOPS, а также глицин (Guélin, Cernicharo, 2022).

В 2019–2020 гг. наблюдалась первая межзвездная комета 2I/Borisov. Радиотелескопические наблюдения показали наличие в ней воды, моноциана, синильной кислоты и пр., значительное превышение, по сравнению с кометами Солнечной системы, содержания СО. Газопылевой хвост сформирован не льдом, а силикатами железа и магния (что, впрочем, также наблюдалось в случае с 67P/Churyumov-Gerasimenko), также в нем присутствуют толины. Предположительно, во внутренних областях Солнечной системы произошло частичное разрушение ядра кометы (Cordiner et al., 2020; Busarev et al., 2021).

Р. Гувер, Ф. Хойл и др. (1986) показали, что инфракрасный (ИК) спектр полисахаридов и органического аморфного кремния в панцирях диатомовых совпадает со спектрами межзвездной пыли Трапеции Ориона (8–40 мкм) и галактического центра (3–20 мкм) (GC-IRS7). Однако нет совпадений по спектрам неорганических и кристаллических силикатов. Исследования кометы Галлея (Lawler, Brownlee, 1992) показали, что среди эжектируемой органики преобладают CHON, которые, как известно, формируют более 98% земной биоты. Вспышки сверхновых рассеивают эти элементы, наряду с аморфными силикатами, и впоследствии они инкорпорируются в межзвездную пыль, которая, в свою очередь, аккрецируется кометами, углистыми астероидами и метеоритами, и затем привносится (наряду с органическими соединениями и водой) во внутренние области Солнечной системы, и, в частности, на раннюю Землю.

Миссии Cassini и New Horizons показали, что в видимой части спектра некоторые кометы имеют нейтральные цвета, схожие с Фебой (одним из спутников Сатурна). Поверхности других комет имеют насыщенный красный цвет, схожий с астероидами типа D и низкоальбедным полушарием Япета (другого спутника Сатурна). Поверхности других – темные, схожие с поверхностью Титана, передним полушарием Япета и низкоальбедными астероидами типов C и D. Миссии Stardust и Rosetta показали, что кометы содержат сложные органические соединения, ПАУ, белковые аминокислоты и другие важные для жизни молекулы. Анализ ИК спектров показал их схожесть со спектрами таких сложных биомолекул, как хлорофилл, люциферин, люцифераза и зеленый флуоресцентный белок, абиогенный механизм формирования которых на данный момент неизвестен.

Гипотеза кометной панспермии

Согласно гипотезе Ф. Хойла и Ч. Викрамасинга (Hoyle, Wickramasinghe, 1981), кометы могут являться переносчиками бактерий, экранируя их от радиации своим поверхностным слоем. Предполагается, что микробиота подобная земным экстремофилам, большую часть времени находится в замороженном состоянии, и при прохождении кометы мимо звезды в ней образуются карманы жидкой воды, в которых возможны метаболизм и размножение.

Объединив результаты по находкам микрофоссилий в углистых хондритах с моделью влажной кометы (WCM), можно предположить, что для развития жизни не нужны условия земного типа. Также кометы могут обмениваться материалом между собой, что происходит при разрушении кометы, оставляя кольцо спор и бактерий на орбите вокруг звезды. Известно, что такие потоки «камней» существуют (например, Персеиды или Леониды). Эти потоки обломков имеют достаточно большое поперечное сечение, чтобы осесть на другие кометы, продолжительность их существования оценивается в ~100 лет. Предполагается, что фрагменты кометы также могут оказывать экранирующее воздействие от ионизирующего излучения.

Таким образом, кометы способны не только обмениваться биоматериалом между друг другом, но и могли доставлять на раннюю Землю уже содержащую биотические структуры воду (в ходе поздней тяжелой бомбардировки), объем которой по расчетам превышал вдвое объем современного земного океана. Однако авторы гипотезы уточняют, что «все эти косвенные свидетельства указывают на возможность существования кометной биосферы, но не то, что она существует».

Отдельно стоит упомянуть, что ядра комет, приходящих из облака Оорта, взаимодействуют там с межзвездной средой, впоследствии привнося вещество межзвездной среды и/или других звездных систем во внутренние области Солнечной системы (Бочкарев, 2014).

4.3. Методы, цели и перспективы поиска экзопланет

Экзопланеты – планеты, находящиеся за пределами Солнечной системы. Предполагается, что ~30–40% систем с одиночными или двойными звездами являются планетными, при этом вероятность наличия планет находится в прямой корреляции со степенью металличности звезды. Также иногда в случае с двойными звездами планеты могут вращаться вокруг одной из звезд. Поиск планет ведется с различными целями, среди которых расширение знаний о механизмах формирования планетарных систем, обнаружение планет, физико-химические условия которых могут подразумевать возможность существования на них известных нам форм жизни (что в свою очередь может служить основой для моделирования путей ее возникновения

и развития). Тем не менее, следует учитывать, что пригодность для жизни не подразумевает автоматически, что жизнь на планете существует.

На сегодняшний день существуют следующие способы обнаружения экзопланет:

- Динамический (доплеровский, RV, лучевых скоростей) метод – основан на измерении периодических вариаций лучевой (радиальной) скорости звезды по доплеровскому смещению линий в спектре при ее движении вокруг центра масс системы «звезда–планета». Данный метод является наиболее продуктивным, однако не позволяет обнаруживать планеты, плоскость орбиты которых перпендикулярна линии источник–наблюдатель.

- Астрометрический метод – заключается в измерении координат звезд и последующем поиске их периодических возмущений относительно центра масс планетной системы.

- Фотометрический (затменный, транзитный) метод – заключается в измерении периодических вариаций блеска звезды вследствие прохождения планеты по ее диску. По длительности затмения определяется радиус орбиты планеты. Для данного метода характерны те же ограничения, что и для динамического.

- Микролинзирование – использование эффекта гравитационного линзирования света, проходящего вблизи массивных тел (звезд). При условии, что вблизи линии источник–наблюдатель проходит другая звезда (в данном случае, оказывающая эффект линзы), яркость источника плавно возрастает, достигая максимума в момент наибольшего сближения линзы с линией. Метод наиболее эффективен при поиске в областях с наибольшей плотностью звезд, его недостатком является уникальность события.

- Прямое наблюдение – метод обнаружения, основанный на регистрации света, отраженного непосредственно от поверхности планеты, независимо от ее гравитационного взаимодействия со звездой.

Так как более массивные планеты оказывают большее влияние на звезду, то их обнаружить значительно проще, а следовательно, большинство открытых на сегодняшний день экзопланет являются газовыми гигантами с массой, близкой или больше массы Юпитера. Однако наибольший интерес представляют маломассивные твердые каменные планеты, схожие с Землей (Суперземли и Миниземли).

При оценке жизнеспособности небесных тел исходят из возможности осуществления метаболической активности известных нам форм жизни, что позволяет исключить условия, в которых возможно лишь временно сохранить инактивные формы (споры), а также отсеять гипотетические формы жизни, основанные на альтернативной земной биохимии (Cockell et al., 2016). Хотя, конечно, возможны предположения, что известная нам жизнь является именно такой вследствие условий, в которых происходило ее возникновение и развитие.

Считается, что для поддержания земного типа жизни планеты должны обладать следующими свойствами: наличие жидкой воды (как единственно-

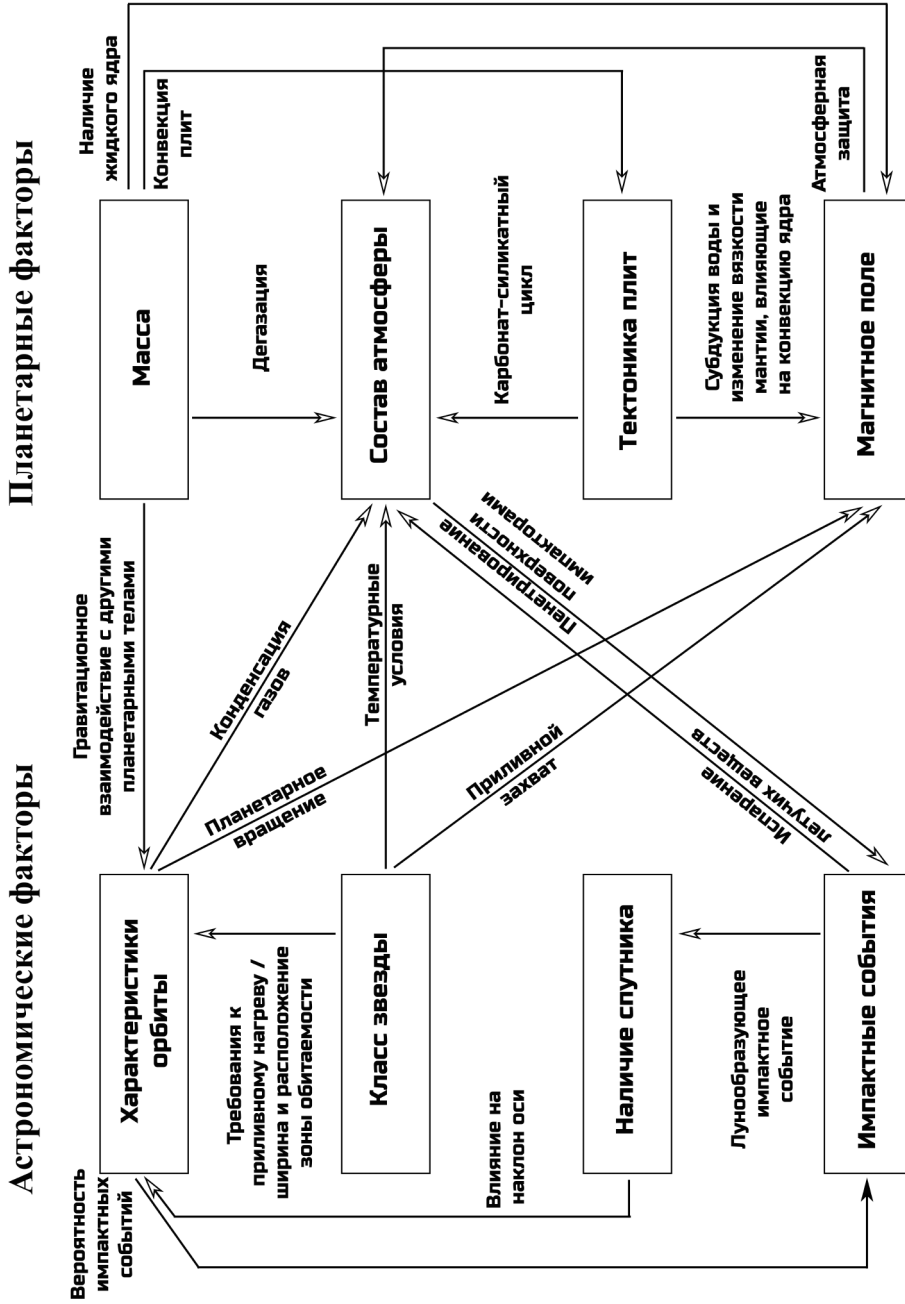


Рис. 84. Факторы, влияющие на пригодность планеты для жизни (Cockell et al., 2016).

го известного растворителя) и материалов для синтеза органических веществ (C, H, N, O, P, S) и метаболических реакций (Si, Fe и др.) (рис. 84). Для возможности существования жидкой воды, в зависимости от давления и примесей солей, температура должна быть в пределах от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (гипотетически до $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$, хотя, вероятно, метаболическая активность при температурах менее $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ невозможна) до $122\text{ }^{\circ}\text{C}$ (верхний предел для известных форм жизни, несмотря на то, что вода в жидкой фазе может существовать при температурах более $300\text{ }^{\circ}\text{C}$). В значительной мере пригодность поверхности планеты для жизни определяется наличием/отсутствием парникового эффекта, ее альбедо, наклоном и эксцентриситетом ее орбиты. Жизнь под поверхностью планеты полагается возможной при оптимальном тепловом балансе между теплом, генерируемым распадом изотопов, и излучением во внешнюю среду. Альтернативным источником тепловой энергии могут быть приливные силы, создаваемые спутниками планеты (Cockell et al., 2016).

Среди факторов, ограничивающих жизнепригодность планеты, можно привести следующие: масса звезды (большие звезды живут меньше, значительно большая часть излучаемого света лежит в УФ и рентгеновской частях спектра; звезды с массой меньше Солнца излучают свет больших длин волн, в результате чего биосинтез может быть невозможен), динамика движения планеты (вероятность частых пересечений орбиты планеты астероидами и кометами; при большом эксцентриситете орбиты будут значительные перепады температуры), выраженность тектонической активности и наличие/отсутствие спутников, которые могли бы стабилизировать угол наклона вращения и внести значительный вклад в формирование климата (за счет приливных сил).

Вероятно, решающим фактором, определяющим возможность зарождения и существования жизни в звездной системе, является спектральный класс звезды. Именно он определяет количество и тип возможных малых тел, характер и интенсивность излучения, продолжительность жизни звезды. Как следствие, некоторые спектральные классы считаются более перспективными для возникновения и развития жизни.

Для звезд существует так называемая зона обитаемости (рис. 85), т. е. та область вокруг звезды, в пределах которой количество поглощаемой энергии ее излучения планетами позволяет существование на них воды в жидкой форме. За счет того, что в ходе эволюции звезды становятся больше и горячее, пределы зоны со временем смещаются. Тем не менее, даже за пределами зоны обитаемости возможно существование жидкой воды на планетах (или спутниках), что может быть обусловлено, к примеру, приливными силами или радиоактивным распадом. Вполне очевидно, что размер, местоположение и динамика зоны определяются типом звезды, теоретически он может достигать ~ 10 а.е., что, в свою очередь, позволяет допустить возможность обитаемости межзвездных планет (гравитационно не связанных со звездной системой) (Cockell et al., 2016).

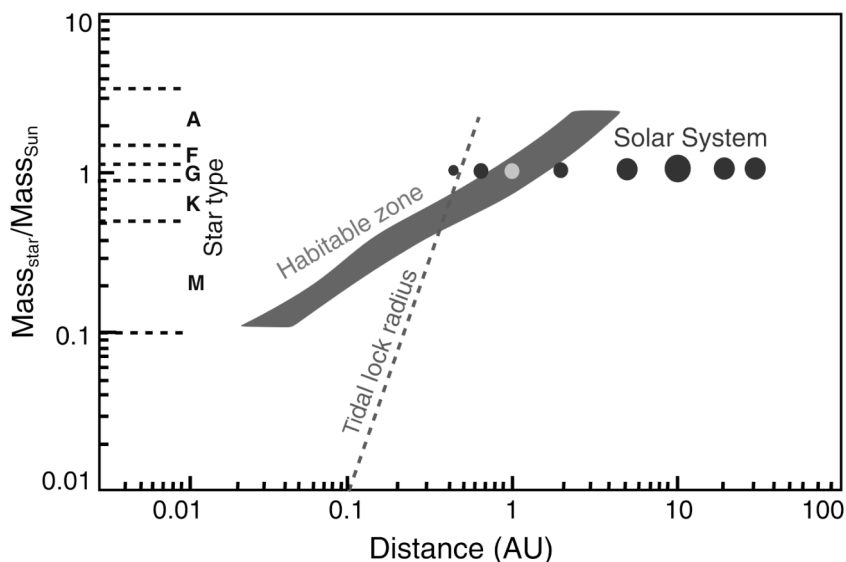


Рис. 85. Зависимость радиуса зоны обитаемости от спектрального класса и массы звезды (Cockell et al., 2016).

На 2024 г. было обнаружено 5632 экзопланет в 4151 звездных системах, порядка 895 из этих систем обладают более чем одной планетой. По оценкам, во Вселенной должно существовать не менее 100 млрд планет, и $\sim 5\text{--}2$ млрд из них должны быть землеподобными. Также предполагается, что около трети из них должны находиться в пределах зон обитаемости. По оценкам на 2024 г., 70 экзопланет являются потенциально обитаемыми, предполагается, что 29 из них являются каменными планетами с жидкой водой на поверхности, остальные 41 являются планетами-океанами, или мини-Нептунами (URL: <https://exoplanet.eu/catalog/>) (URL: <https://phl.upr.edu/hwc>).

4.4. Поиск внеземных цивилизаций

Вопросы поиска и коммуникации с внеземными цивилизациями (далее ВЦ) всегда были неразрывно связаны с самой идеей их существования. Тем не менее, на протяжении большей части времени своего существования человечество не имело никаких средств для поиска других форм жизни, и лишь к XX в. технический прогресс позволил изменить устоявшееся положение вещей. Комплекс проектов по поиску внеземных цивилизаций и вступлению в контакт с ними получил собирательное название SETI – *Search for Extraterrestrial Intelligence*. В их рамках рассматриваются не только технические вопросы поиска и передачи сигналов, но и широкий круг

проблем, включая возможные формы жизни, происхождение жизни на Земле и других «небесных» телах, возможные пути эволюции внеземных цивилизаций и др.

Для обсуждения этого круга вопросов и координации исследований создан ряд международных и национальных организаций. Одной из наиболее авторитетных является комиссия № 51 «Bioastronomy» Международного астрономического союза (МАС), объединяющего более десяти тысяч профессиональных астрономов. При Международной астронавтической академии (МАА) действует Комитет SETI, который проводит ежегодные симпозиумы в рамках Международных астронавтических конгрессов. В США имеется Институт SETI, выполняющий ряд крупных проектов по поиску внеземных цивилизаций и участвующий в исследованиях по поиску экзопланет. В России, в рамках Научного совета по астрономии (НСА РАН), действует секция «Поиски внеземных цивилизаций», которая является преемницей секции «Поиски космических сигналов искусственного происхождения» Научного совета по комплексной проблеме «Радиоастрономия» АН СССР. Секция была создана в 1964 г. и была первой организацией такого типа в мире. Существует также Научно-культурный центр SETI – общественная организация, учредителями которой являются Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, Астрокосмический центр ФИАН и Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (МГУ).

Поиск радиосигналов

К середине XX в. ученые пришли к выводу, что в Солнечной системе разумная жизнь (во всяком случае, в известной нам форме) существует только на Земле, а значит, надежда встретить другие разумные формы жизни теперь связывалась с исследованием других планетных систем, у других звезд. В 1959 г. Дж. Коккони и Ф. Моррисон (США) высказали предположение о возможности радиокommunikации гипотетических цивилизаций между собой на частоте радиолинии водорода 1420 МГц (соответствующая длине волны 21 см) как самом универсальном эталоне, выбор которого, по их мнению, был бы наиболее предпочтителен любой цивилизацией. Водород – это самый распространенный элемент во Вселенной, исследования на волне 21 см дают очень ценные сведения о строении Галактики. Отсюда следует предположение, что любая цивилизация, занимающаяся изучением Космоса, даже если она и не помышляет о межзвездной связи, рано или поздно, обнаружив радиолинию водорода, несомненно, начнет вести наблюдения на частоте этой линии. Значит, если в этом диапазоне передавать сигналы межзвездной связи, они могут быть обнаружены в процессе обычных радиоастрономических наблюдений.

В 1960 г. в Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO) США, под руководством Ф. Дрейка, был проведен трехмесячный эксперимент (проект «Озма») по приему и передаче радиосигналов ВЦ, который, однако,

не дал никаких результатов. Дрейк пришел к выводу, что для успеха поисков необходимо исследовать большое число звезд в широком интервале частот, для чего требуется создание многоканальных приемников и широкое применение компьютерной техники для обработки сигналов.

В последующие годы были проведены десятки экспериментов. Вначале они проводились только в США и СССР, потом к ним присоединились другие страны. Использовались крупнейшие радиотелескопы и специально созданные многоканальные приемники, насчитывающие до 10^9 спектральных каналов (Гиндилис, 2004). В последние годы XX в., наряду с поисками в радиодиапазоне, стали проводить поиски лазерных сигналов в оптическом диапазоне спектра, однако никаких сигналов обнаружено не было.

Проблема обнаружения радиосигналов от ВЦ заключается в том, что для успешного приема должно совпасть множество факторов. Частота «их» передатчика должна совпадать с частотой «нашего» приемника. Диапазон частоты достаточно широк, а предполагаемая линия излучения очень узка. Но даже обнаружив такой сигнал, нужно еще его отличить от множества естественных радиоисточников.

Задача обнаружения сигналов значительно облегчается, если ВЦ непрерывно ведут передачу во все стороны (изотропное излучение) и в широкой полосе частот. Но для этого их излучатели должны располагать гигантской мощностью, сравнимой с мощностью излучения Солнца, или даже всех звезд Галактики. Академик Н.С. Кардашев (1964) назвал такие суперцивилизации цивилизациями второго и третьего типов (чи доступные энергетические ресурсы сравнимы с энергией звезды и галактики соответственно) в отличие от цивилизаций первого типа, чи энергетические ресурсы примерно сопоставимы с нашими. Чтобы обнаружить такой непрерывно излучающий изотропный источник, нужно либо последовательно обследовать все участки неба (провести полный обзор неба), либо обладать системой обнаружения, способной непрерывно, в течение неопределенно долгого времени сканировать полный телесный угол, во всем диапазоне спектра. Теоретические расчеты подобной системы были проведены еще в 60-х гг. XX в. (Котельников, 1965). Первым шагом в практической реализации можно считать радиотелескоп Алена (Хат Крик, Калифорния, США), первый радиотелескоп, спроектированный с нуля специально для программы SETI.

За все время существования программы SETI наибольшим успехом стала регистрация в 1977 г. сигнала (1420 VUw), обладавшего 30-кратной амплитудой относительно фонового шума (сигнал “Wow!”) радиотелескопом «Большое ухо». Ни объяснить его природу, ни повторно зарегистрировать подобный сигнал так и не удалось, хотя среди возможных вариантов называются сигнал из источника, находящегося за звездой, или помеха, вызванная одним из искусственных спутников Земли, или даже что источник помех может быть непосредственно в локации телескопа. В 2020 г. удалось зарегистрировать возможный сигнал с направления звезды Proxima Centauri,

находящейся всего в 4,2 световых годах от Солнечной системы и имеющей три планеты (существование двух из которых все еще ожидает подтверждения).

Большие надежды в поиске SETI возлагаются на будущую радиоастрономическую систему *Square Kilometer Array* (SKA). Система будет состоять из нескольких тысяч относительно небольших антенн размером в несколько метров и общей площадью 1 км². Начало исследовательских работ ожидается в 2028–2029 гг.

Передача сигналов внеземным цивилизациям: METI

Помимо SETI, параллельно с ней существует программа передачи сигналов с Земли в адрес возможных ВЦ. Эта программа получила название METI – *Messaging to Extra Terrestrial Intelligence*. В рамках программы происходит как эмитирование сигналов, так и отправка материальных сообщений в составе исследовательских зондов. Основанием для передачи посланий послужили следующие соображения. Во-первых, если все цивилизации будут ограничиваться только поиском сигналов, не ведя собственных передач, то и искать будет нечего. Но более важно другое соображение, на которое указывал академик А.Д. Сахаров: «Только, ведя собственные передачи, можно понять тонкие аспекты проблемы контакта». Развитая С.Э. Хайкиным стратегия установления связи с внеземными цивилизациями предусматривает перед установлением связи (и для ее установления) передачу сигнала готовности (Хайкин, 1965).

Первый радиосигнал был отправлен азбукой Морзе в 1962 г. («Мир. Ленин. СССР») из Евпатории. Затем в 1974 г. из обсерватории Аресибо было отправлено сообщение, составленное Ф. Дрейком и К. Саганом и содержащее, помимо прочего, информацию о человеке и его геноме, Солнечной системе, устройстве используемого радиотелескопа. Впоследствии были реализованы и продолжают реализовываться и другие эксперименты.

Материальные послания были отправлены в рамках миссий “Pioneer 10” (1972), “Pioneer 11” (1973), “Voyager 1” (1977) и “Voyager 2” (1977).

Уравнение Дрейка. Парадокс Ферми

Рассмотрим область исследований, связанных с внеземными цивилизациями. Пусть нас интересует такой важный технический параметр, как дальность связи или дальность обнаружения. Она зависит от числа цивилизаций в Галактике. Чем больше цивилизаций, тем меньше расстояние между ними и, следовательно, тем меньше дальность связи, которую мы должны обеспечить. Чем меньше цивилизаций, тем больше расстояние между ними и, значит, больше требуемая дальность связи. Обычно для оценки числа цивилизаций используют формулу Дрейка:

$$N_c = R^* f_p n_e f_i f_c L ,$$

где N_c – число цивилизаций в Галактике;

R^* – средняя скорость звездообразования, число звезд, возникающих в Галактике в единицу времени, например, в год;

f_p – доля звезд, имеющих планетные системы;

n_e – среднее число планет в планетной системе, имеющих благоприятные для жизни условия;

f_L – доля планет с благоприятными для жизни условиями, на которых жизнь действительно возникает, иными словами, – вероятность происхождения жизни на планете с подходящими условиями;

f_i – вероятность происхождения разумной жизни на планете, где жизнь уже существует;

f_c – вероятность возникновения технически развитой цивилизации, владеющей, например, средствами межзвездной связи;

L – время жизни технически развитой цивилизации, или более точно – длительность коммуникативной фазы, то есть фазы, в течение которой цивилизация способна к контакту.

Из решений уравнения Дрейка, подразумевающих существование других цивилизаций, возникает астросоциологический парадокс (также известный как парадокс молчания или парадокс Ферми). Заключается парадокс в том, что мы не наблюдаем никаких сигналов от ВЦ, не обнаруживаем никаких следов их существования. Для данного парадокса предлагается множество решений, из них отдельно стоит отметить: наша цивилизация является самой передовой; достижение определенного уровня технологического развития обуславливает последующий коллапс цивилизации; ВЦ целенаправленно не ищут способов установления контакта; несовпадение по временам существования – ведь даже условные несколько десятков миллионов лет, которые могут разделять время существования цивилизаций, малозначимы относительно временных рамок процессов происходящих во Вселенной, но с точки зрения процессов, происходящих на Земле – это колоссальный срок, сравнимый с продолжительностью геологического периода (Гиндилис, 1999).

Стратегия поиска

Проблема поиска ВЦ не сводится к чисто технической задаче, она приводит к постановке самого широкого круга естественнонаучных и философских проблем. Можно выделить следующие аспекты общенаучной проблемы SETI:

- изучение космологических и космогонических вопросов: как образовалась наша Вселенная, как в ней возникли галактики, звезды, планеты, на которых при определенных благоприятных условиях может зародиться жизнь и разум;

-
- исследование феномена жизни, ее происхождение, возможные формы жизни на других небесных телах, закономерности ее эволюции;
 - исследование проблемы контакта – возможен ли контакт с другими цивилизациями, каков может быть язык общения с внеземным разумом, не приведет ли контакт с каким-либо непредвиденным и неконтролируемым последствиям, возможен ли скрытый контакт и т.д.;
 - разработка стратегии поиска внеземных цивилизаций.

В более далекой перспективе могут быть осуществлены следующие проекты:

- поиск ВЦ в рентгеновском и гамма-диапазоне;
- связь с ВЦ при помощи гравитационных волн;
- связь с ВЦ при помощи нейтрино.

ПРИЛОЖЕНИЕ

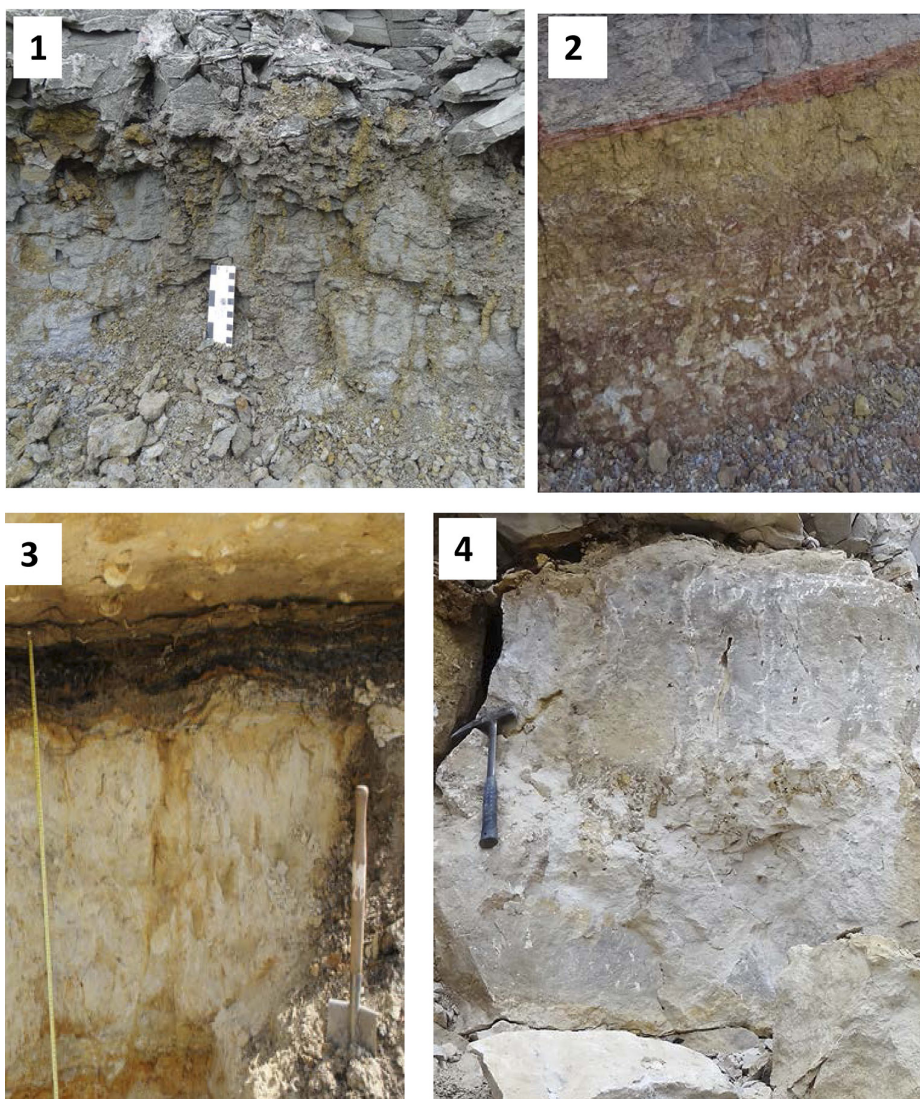


Рис. I. Фото палеопочв палеозоя: 1 – девон, полугидроморфная палеопочва с многочисленными петрифицированными ризолитами (франкский ярус D3, Павловский карьер, Воронежская обл.); 2 – девон, оксисоль (живетский ярус D2, Михайловский карьер, Курская обл.); 3 – торфяно-болотная палеопочва – гистосоль (визейский ярус, С1, Калужская область); 4 – нижний карбон, кальцисоль (визейский ярус, С1, Бронцы, Калужская обл.).

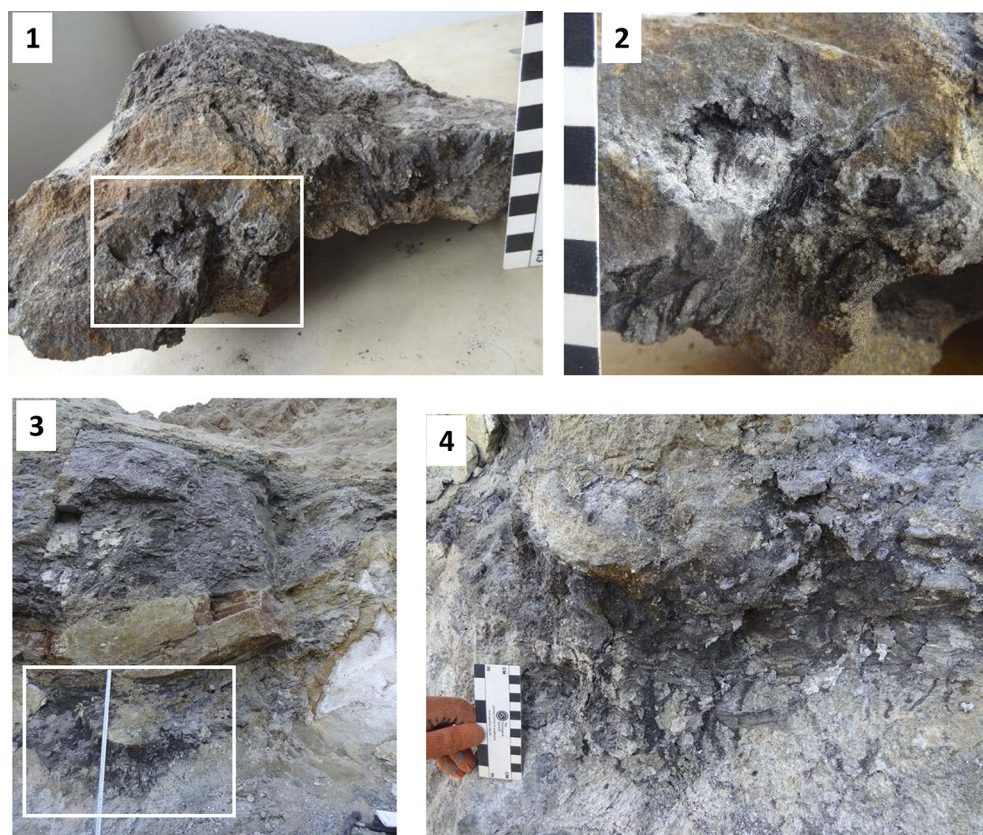


Рис. II. Фото кислых сульфатных палеопочв палеозоя: 1 – палеопочва на коре выветривания железистых кварцитов (D2, Старый Оскол, Белгородская обл.); 2 – деталь строения палеопочвы (выделенная область 1); 3 – палеопочва на риолитовом туфе (эйфельский ярус D2, Павловский карьер, Воронежская обл.); 4 – деталь строения палеопочвы (выделенная область 2).

Литература

- Абызов С.С., Вели М., Вестал Ф., Воробьева Е.А., Гептнер А.Р., Герасименко Л.М., Гиличинский Д.А., Жегалло Е.А., Заварзин Г.А., Звягинцев Д.Г., Орлеанский В.К., Раабен М.Е., Розанов А.Ю., Сергеев В.Н., Соина В.С., Ушатинская Г.Т., Хувер Р., Школьник Э.Л.* Бактериальная палеонтология / ред. акад. А.Ю. Розанов. М.: ПИН РАН. 2002. 188 с. ISBN: 978-5-907366-01-5
- Агол В.И.* Вирус – до или после клетки? // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН. 2009. С. 31–42. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Алексеев А.О., Калинин П.И., Алексеева Т.В.* Почвенные индикаторы параметров палеоэкологических условий на юге восточно-европейской равнины в четвертичное время // Почвоведение. 2019. № 4. С. 389–399. DOI: 10.1134/S0032180X19040026
- Алексеева Т.В.* Почвообразование и почвы в девоне и карбоне на территории Северной Евразии: строение, типы, биота, палеоклиматические архивы и стратиграфическая значимость. Дис. ... д. г.-м. н. М., 2020а.
- Алексеева Т.В.* Ризолиты в палеопочвах девона и нижнего карбона и их палеоэкологическая интерпретация // Почвоведение. 2020б. № 4. С. 398–413. DOI: 10.31857/S0032180X20040024
- Алексеева Т.В.* Почвы девона и карбона. Современное состояние исследований в России // Почвоведение. 2020в. № 10. С. 1157–1169. DOI: 10.31857/S0032180X20100020
- Астафьева М.М., Гептнер А.Р., Герасименко Л.М., Жегалло Е.А., Жмур С.И., Карнов Г.А., Орлеанский В.К., Пономаренко А.Г., Розанов А.Ю., Сумина Е.Л., Ушатинская Г.Т., Хувер Р., Школьник Э.Л.* Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / ред. акад. А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. М.: ПИН РАН. 2011. С. 1–172. ISBN: 978-5-903825-16-5
- Астафьева М.М., Жегалло Е.А., Ривкина Е.М., Самылина О.С., Розанов А.Ю., Зайцева Л.В., Авдонин В.В., Карнов В.А., Сергеева Н.Е.* Бактериальная палеонтология / ред. акад. А.Ю. Розанов. М.: ПИН РАН. 2021. 124 с. ISBN: 978-5-907366-01-5
- Багров А.В.* Первичная метеоритная бомбардировка // Жизнь и Вселенная / ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская. М.: Астрономическое общество. 2017. С. 128–138. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Банзаракаева Т.Г., Абидуева Е.Ю., Намсараев Б.Б.* Гидрохимические и микробиологические характеристики содовых и содово-соленых озер Юго-Восточного Забайкалья // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 101–105. DOI: 10.18101/2542-0623-2023-3-75-84
- Белова М.Ю., Ахмедов А.М.* *Petsatomysces* – новый род органостенных микрофосилий в углеродсодержащих отложениях раннего протерозоя Кольского полуострова // Палеонтол. журн. 2006. № 5. С. 3–12. DOI: 10.1134/S0031030106050017
- Берг Л.С.* Номогенез, или эволюция на основе закономерностей. Петербург. Госиздат. 1922. С. 1–321.
- Бонч-Осмоловская Е.А.* Высокотемпературные глубинные микробные сообщества – возможный аналог древнейших экосистем? // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН. 2009. С. 202–214. ISBN: 978-5-903825-09-7

- Борзенко С.В., Замана Л.В.* Сульфатредукция как фактор формирования содовых вод озера Доронинское (Восточное Забайкалье // *Вестн. Томского гос. ун-та.* 2008. № 312. С. 188–193.
- Бочкарев Н.Г.* Молекулы и их миграция во Вселенной // *Проблемы происхождения жизни.* М.: ПИН РАН. 2009. С. 102–119. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Бочкарев Н.Г.* Миграция молекул и пыли во Вселенной. Пределы панспермии // *Космические факторы эволюции биосферы и геосферы.* Сб. статей / ред. В.Н. Обридко. СПб.: *Астрономическое общество.* 2014. С. 39–50. ISBN: 978-5-9651-0861-9
- Бочкарев Н.Г.* Влияние межзвездной среды на биосферу Земли // *Жизнь и Вселенная / ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская.* М.: *Астрономическое общество.* 2017. С. 21–32. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Браунли Д.Е.* Межпланетная пыль – ее физическая природа и вход в атмосферы планет земной группы // *Кометы и происхождение жизни.* М.: Мир. 1984. С. 69–77.
- Булат С.А., Доронин М.В., Сумбатян Д.А.* Доминантные микробные сообщества в подледниковом антарктическом озере Восток. 3-я Всероссийская конференция по астробиологии. Программа и тез. докл. Пушино. 2020. С. 68–69. ISBN: 978-5-6045305-0-4
- Булат С.А., Доронин М.В., Сумботян Д.А., Швецов А.В.* Отсутствие микробной ДНК в верхней части подледникового озера Восток (Антарктида) по результатам Oxford Nanopore секвенирования. 4-я Всероссийская конференция по астробиологии. Программа и тез. докл. Пушино. 2023. С. 24–25.
- Вавилов Н.И.* Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости // *Сельское и лесное хозяйство.* 1921. № 1. С. 84–89.
- Валяшко М.Г.* Закономерности формирования месторождений солей. М.: Изд-во МГУ. 1962. 398 с.
- Вернадский В.И.* Об изучении космической пыли // *Мироведение.* 1932. № 5. С. 32–41.
- Вернадский В.И.* О необходимости организованной научной работы по космической пыли // *Проблемы Арктики.* 1941. № 5. С. 55–64.
- Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера / ред. М.С. Бастракова, Э.М. Галимов, И.И. Мочалов, Г.Б. Наумов, акад. Б.С. Соколов, А.А. Ярошевский. *Мироведение.* М.: Наука. 1989. 261 с. ISBN: 5-02-004618-3
- Вибе Д.З.* Добиологическая эволюция органического вещества во Вселенной // *Жизнь и Вселенная / ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская.* М.: *Астрономическое общество.* 2017. С. 139–148. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Виленский В.Д.* Сферические микрочастицы в ледниковом покрове Антарктиды // *Метеоритика.* М.: Наука. 1972. Вып. 31. С. 57–61.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука: Физматлит. 1990. 296 с. ISBN: 5020140708
- Витязев А.В., Печерникова Г.В.* Ранняя Земля в тесном окружении молодых звезд // *Проблемы происхождения жизни.* М.: ПИН РАН. 2009. С. 131–157. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Вишняков И.Е., Шмакова Л.А., Ривкина Е.М., Борхсениус С.Н.* «Минимальная» клетка в космосе: 3-я Всерос. конф. по астробиологии. Программа и тез. докл. Пушино. 2020. С. 96–98. ISBN: 978-5-6045305-0-4
- Воцинников Н.В.* Межзвездная пыль // *Физика космоса: маленькая энциклопедия / ред. Р.А. Сюняев.* Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Советская энциклопедия. 1986. С. 384–386.
- Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И.* Динамическая модель образования системы «Земля–Луна» // *Геохимия.* 2005. № 11. С. 1139–1150.
- Гальченко В.Ф.* (ред.) *Алкалофильные микробные сообщества.* М.: Наука. 2007. 398 с. (Тр. Ин-та микробиологии им. С.Н. Виноградского, вып. 14). ISBN: 978-5-02-034199-9
- Герасименко Л.М., Жегалло Е.А., Жмур С.И., Розанов А.Ю., Хувер Р.* Бактериальная палеонтология и исследования углистых хондритов // *Палеонтол. журн.* 1999. № 4. С. 103–125.

- Гильров М.С. Биологический энциклопедический словарь. М.: Рипол Классик. 1989. 864 с. ISBN: 9785458255967
- Гиндилис Л.М. Молчание Вселенной? // Дельфис. 1999. N 3 (19). С. 70–77.
- Гиндилис Л.М. SETI: Поиск Внеземного Разума (ред. В.Г. Сурдин). М.: Физматлит. 2004. 647 с.
- Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О. Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. №1. С. 5–19. DOI: 10.1134/S0032180X19010040
- Грачев А.Ф., Корчагин О.А., Цельмович В.А., Коллманн Х.А. Космическая пыль и микрометеориты в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и химический состав // Физика Земли. 2008. № 7. С. 42–57.
- Гринберг Д. Химическая эволюция межзвездной пыли как возможный источник предбиологического материала // Кометы и происхождение жизни / ред. С. Поннамперума. М.: Мир. 1984. С. 109–127.
- Демидов Н.Э. Марсианские экониши и перспективы поиска в них жизни. Жизнь и Вселенная (ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская). М.: Астрономическое общество. 2017. С. 253–263. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Дешева Е.А., Фиалкина С.В., Гуридов А.А., Щербакова В.А., Цыганков О.С., Шубралова Е.В., Ильин В.К. Выживаемость микроорганизмов на внешней стороне МКС. 3-я Всерос. конф. по астробиологии. Программа и тез. докл. Пущино. 2020. С. 99–103. ISBN: 978-5-6045305-0-4
- Джейкобс Д.А., Теста С.М. Кислотный дренаж и окисление сульфидов: Введение // Дренаж кислотных рудников, дренаж горных пород и кислотно-сульфатных почв / ред. Д.А. Джейкобс, Д.Х. Лер, С.Л. Теста. John Wiley, Sons, Inc. Hoboken. (NJ). 2014. С. 3–10. ISBN: 978-0-470-48786-0
- Дивари Н.Б. О сборе космической пыли на леднике Туяк-Су // Метеоритика. М.: Изд. АН СССР. 1948. Вып. 4. С. 120–122.
- Додд Р.Т. Метеориты. Петрология и геохимия (ред. Н.А. Никишина). М.: Мир. 1986. 384 с.
- Жарков М.А. Эволюция эвапоритов в докембрии в связи с преобразованиями биосферы и химического состава Мирового океана. Ст. 1. Эвапориты архея и раннего протерозоя // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2005. Т. 13. № 2. С. 19–29.
- Жилина Т.Н., Герасименко Л.М., Заварзин Г.А. Алкалофильные микробные сообщества // Тр. Ин-та микробиологии им. С.Н. Виноградского. Вып. 14 / ред. В.Ф. Гальченко. М.: Наука. 2007. 398 с. ISBN: 978-5-02-034199-9
- Жмур С.И., Розанов А.Ю., Горленко В.М. Следы древнейшей жизни в космических телах Солнечной системы // Природа. 1997. Т. 8. С. 3–10.
- Заварзин Г.А. Эпиконтинентальные содовые водоемы как предполагаемые реликтовые биотопы формирования наземной биоты // Микробиология. 1993. Т. 62. С. 789–800.
- Заварзин Г.А. Становление системы биогеохимических циклов // Палеонтол. журн.. 2003. Т. 6. С. 16–24.
- Заварзин Г.А. Первые экосистемы на Земле / Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН. 2009. С. 230–244. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Заварзин Г.А., Рожнов С.В. Выветривание и палеопочвы. Палеопочвы и индикаторы континентального выветривания в истории биосферы / ред. акад. С.В. Рожнов, В.А. Демкин. Сер. «Гео-биологические процессы в прошлом». М.: ПИН РАН. 2010. 170 с.
- Заварзин Г.А. Эволюция прокариотной биосферы: микробы в круговороте жизни: 120 лет спустя: Чтения им. С.Н. Виноградского / ред. Н.Н. Колотилова М.: МАКС Пресс. 2011. 144 с. ISBN: 978-5-317-03709-3
- Зарубин М., Кулдошина О., Кравченко Е.В. Уникальный радиопротекторный белок DSUP (Damage suppressor) сравнительный анализ последовательности // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». ОИЯИ. 2022. Т. 19. № 3 (242). 212 с.
- Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. Фрязино: Век 2. 2006. 496 с. ISBN: 5-9900318-2-3

- Захарова Н.Г., Вершинина В.И., Ильинская О.Н. Краткий курс по микробиологии, вирусологии и иммунологии // Казань: Бриг. 2015. С. 562–640.
- Иванова Г.М., Львов В.Ю., Васильев Н.В., Антонов И.В. Выпадение космического вещества на поверхность Земли. Томск: изд-во Томск. ун-та. 1975. С. 120.
- Иванцов А.Ю., Разумовский А.А., Закревская М.А. Макрофоссилии верхнего венда Восточной Европы. Средний и Южный Урал. М.: ПИН РАН. 2018. С. 6–189. ISBN: 978-5-9500685-1-5
- Ильин Е.А., Гиндилис Л.М., Булат С.А., Снытников В.Н. Возможность сбора КП на КА «Бийон» и «Фотон» // Проблемы изучения космической пыли на Земле (к программе исследования). Дубна: ОИЯИ. 2014. С. 34–35.
- Кардашев Н.С. Передача информации внеземными цивилизациям // *Астрономический журн.* 1964. Т. 41. № 2. С. 282–287.
- Котельников В.А. Связь с внеземными цивилизациями в радиодиапазоне. Внеземные цивилизации. Тр. совещ. Бюракан. Ереван. 1965. С. 113–120.
- Красильников П.В., Сафонова В.М., Седов С.Н. Сульфатнокислородное выветривание в почвах Северной Карелии // *Почвоведение.* 1995. № 6. С. 740–746.
- Крик Ф., Оргел Л. Направленная панспермия // *Химия и жизнь.* 1974. № 9. С. 75–79.
- Кринов Е.Л. Основы метеоритики (ред. акад. В.Г. Фесенков). М. 1955. С. 125–126.
- Ксанфомалити Л.В. От Марса к Европе: поиск биосферы на спутниках планет гигантов // *Проблемы происхождения жизни.* М.: ПИН РАН. 2009. С. 60–76. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Левин Б.Ю. Происхождение Земли и планет. М.: Наука. 1964. 116 с.
- Маров М.Я. Космос: от Солнечной системы вглубь Вселенной. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2016. 536 с. ISBN: 978-5-9221-1711-1
- Михайлова И.А., Бондаренко О.Б. Палеонтология. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ. 1997. 448 с. ISBN: 5-211-03868-1
- Мухин Л.М. Условия на поверхности земли 4–4.6 млрд. лет назад. Первичные синтезы // *Проблемы происхождения жизни.* М.: ПИН РАН. 2009. С. 120–130. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Мямин В.Е. Биология экстремофильных микроорганизмов: электронный учебно-методический комплекс для специальностей: 1–31 80 01 «Биология», 1–31 80 12 «Микробиология». БГУ, Биол. ф-т, каф. микробиологии. Минск: БГУ. 2022. С. 7, 50–51.
- Намсараев З.Б., Горленко В.М., Бурюхаев С.П., Бархутова Д.Д., Дамбаев В.Б., Дулов Л.Е., Сорокин Д.Ю., Намсараев Б.Б. Водный режим и изменения гидрохимических показателей щелочного соленого озера Хилганта (Юго-Восточное Забайкалье) // *Водные ресурсы.* 2010. Т. 37. № 4. С. 477–483.
- Наточин Ю.В. Физиологическая эволюция животных: натрий ключ к разрешению противоречий // *Вестн. РАН.* 2007. Т. 77. № 11. С. 999–1010.
- Наточин Ю.В. Возникновение мембран / *Проблемы происхождения жизни.* М.: ПИН РАН. 2009. С. 215–229. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Нетрусов А.И., Котова И.Б. Микробиология: теория и практика в 2 ч. Ч. 1: учебник для вузов. М.: Изд-во Юрайт. 2023. 315 с. ISBN: 978-5-534-03805-7
- Никитин М.А. Происхождение жизни. От туманности до клетки. Альпина Паблишер. 2016. 686 с. ISBN: 978-5-9614-4350-9
- Обридко В.Н. Жизнь и Вселенная (ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская). М.: Астрономическое общество. 2017. С. 9–18. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Опарин А.И. Происхождение жизни. М.: Моск. рабочий. 1924. 71 с.
- Павлов А.К. Возможная «обитаемость» марсианского реголита и обнаружение «биомаркеров» древней жизни // *Жизнь и Вселенная / ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская.* М.: Астрономическое общество. 2017. С. 264–272. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Павлов В.А., Клабуновский Е.И. Возможная версия возникновения гомохиральности в природе // *Успехи химии.* 2015. V. 84. № 2. Р. 121–133. DOI: 10.1070/RCR4444

- Печерникова Г.В., Сергеев В.Н.* Ранняя стадия возникновения Земли (интервал после возникновения Солнца, формирование жидкого ядра, формирование твердого ядра) // Жизнь и Вселенная / ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская. М.: Астрономическое общество. 2017. С. 91–98. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Печерникова Г.В., Рускол Е.Л.* Модели происхождения Луны: ранняя история Земли и Венеры (роль приливного трения в образовании структуры планет) // Жизнь и Вселенная / ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская. М.: Астрономическое общество. 2017. С. 117–127. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Пиневиц А.В.* Микробиология. Биология прокариотов: Учебник. В 3 т. СПб.: Изд. СПбГУ. 2006. Т. 1. 352 с. ISBN: 5-288-04057-5
- Пиневиц А.В.* Микробиология. Биология прокариотов: Учебник. В 3 т. СПб.: Изд. СПбГУ. 2009. Т. 3. 457 с. ISBN: 978-5-288-04894-4
- Рагульская М.В.* Раннее Солнце, физические условия на Земле и биосфера // Жизнь и Вселенная / ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская. М.: Астрономическое общество. 2017. С. 195–212. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Розанов А.Ю., Жегалло Е.А.* К проблеме генезиса древних фосфоритов Азии // Литол. и полезн. ископ. 1989. № 3. С. 67–82.
- Розанов А.Ю.* Цианобактерии и, возможно, низшие грибы в метеорита // Соросовский образовательный журнал. 1996. Т. 11. С. 61–65.
- Розанов А.Ю., Заварзин Г.А.* Бактериальная палеонтология // Вестн. РАН. 1997. Т. 67. № 2. С. 109–113.
- Розанов А.Ю., Заварзин Г.А.* Бактериальная палеонтология // Вестн. РАН. 1997. Т. 67. № 3. С. 241–245.
- Розанов А.Ю.* Ископаемые бактерии и новый взгляд на процессы осадкообразования // Соросовский образовательный журнал. 1999. Т. 10. № 47. С. 63–67.
- Розанов А.Ю., Астафьева М.М.* Празинофиты (зеленые водоросли) из нижнего протерозоя Кольского полуострова // Палеонтол. журн. 2008. № 4. С. 90–93.
- Розанов А.Ю.* Условия жизни на ранней Земле после 4.0 млрд. лет назад // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН. 2009. С. 185–201. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Розанов А.Ю., Хувер Р.Б., Красавин Е.А., Самылина О.С., Рюмин А.К., Капралов М.И., Сапрыкин Е.А., Афанасьева А.Н.* Метеорит Оргей. Атлас микрофоссилий. М.: ОИЯИ. 2020. 130 с. ISBN: 978-5-903825-42-4
- Розанов А.Ю.* Уроки бактериальной палеонтологии / Бактериальная палеонтология (ред. акад. А.Ю. Розанов). М.: РАН. 2021. С. 115–122. ISBN: 978-5-907366-01-5
- Розанов А.Ю.* Закон гомологических рядов Н.И. Вавилова и возможная его судьба // Генетика. 2023. Т. 59. № 9. С. 1002–1012. DOI: 10.31857/S0016675823090102
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука. 1975. С. 1–188.
- Саютина Т.А., Вильмова Е.С.* Проблематичные ископаемые *Udokania leites* из протерозойских отложений Забайкалья // Палеонтол. журн. 1990. № 4. С. 100–103.
- Сергеев В.Н.* Окремненные микрофоссилии докембрия и кембрия Урала и Средней Азии. М.: Наука. 1992. 139 с. ISBN: 5-02-002257-8
- Сергеев В.Н., Семихатов М.А., Федонкин М.А., Вейс А.Ф., Воробьева Н.Г.* Основные этапы развития докембрийского органического мира: сообщение 1. Архей и ранний протерозой // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2007. Т. 15. № 2. С. 25–46.
- Сергеев В.Н., Семихатов М.А., Федонкин М.А., Воробьева Н.Г.* Основные этапы развития докембрийского органического мира: сообщение 2. Поздний протерозой // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2010. Т. 18. № 6. С. 3–34.
- Сергеев В.Н.* Палеонтологическая история морфологических преобразований у цианобактерий в позднем докембрии и их возможная современная интерпретация / Микробные сообщества в эволюции биосферы. М.: ПИН РАН. 2017. С. 100–123.

- Симаков М.Б.* Роль вакуумного ультрафиолетового излучения и других видов энергии открытого космоса в абиогенном синтезе нуклеотидов и дипептидов: дис. С.-Петербург. гос. технол. ин-т. 2005.
- Симаков М.Б.* Физические условия и экзобиологический потенциал ледяных спутников планет-гигантов / Жизнь и Вселенная (ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская). М.: Астрономическое общество. 2017. С. 283–296. ISBN: 978-5-9651-1061-2
- Слободкин А.И., Слободкина Г.Б.* Термофильные прокариоты из глубинных подземных местобитаний // Микробиология. 2014. Т. 83. № 3. С. 255–270.
- Снытников В.Н.* Астрокатализ как стартовый этап геобиологических процессов. Жизнь создает планеты? / Эволюция биосферы и биоразнообразия. К. 2006. С. 49–59.
- Снытников В.Н.* Астрокатализ – абиогенный синтез и химическая эволюция на догеологических этапах формирования Земли / Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН. 2009. С. 79–101. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Спирин А.С.* Рибонуклеиновые кислоты как центральное звено живой материи // Вестн. РАН. 2003. Т. 73. № 2. С. 117–127.
- Спирин А.С.* Мир РНК и его эволюция // Мол. Биология. 2005. Т. 39. С. 550–556.
- Спирин А.С.* Когда, где и в каких условиях мог возникнуть и эволюционировать мир РНК? // Палеонтол. журн. 2007. № 5. С. 11–19.
- Спирин А.С.* Древний мир РНК / Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН. 2009. С. 43–59. ISBN: 978-5-903825-09-7
- Сухова Е.И., Воробьева Е.А., Чепцов В.С., Белов А.А., Складнев Д.А., Павлов А.К.* Устойчивость бактериофага DT57C к облучению ускоренными электронами в условиях низкого давления и низких температур / Экзобиология: от прошлого к будущему: 3-я Всерос. конф. по астробиологии. Программа и сб. тез. Пушино. 2020. С. 85–88. ISBN: 978-5-6045305-0-4
- Таргульян В.О., Мергелов Н.С., Горячкин С.В.* Почвоподобные тела на Марсе // Почвоведение. 2017. № 2. С. 205–218. DOI: 10.7868/S0032180X17020125
- Тимофеев Б.В.* Микрофитофоссилии раннего докембрия. Л.: Наука. 1982. 128 с.
- Тимошенко Г.Н.* Радиационные проблемы при освоении космоса: учебное пособие. Дубна: Гос. ун-т «Дубна». 2021. С. 14–37.
- Тихов Г.А.* Астробиология. М.: Молодая гвардия. 1953. 79 с.
- Федонкин М.А.* Беломорская биота венда (докембрийская бесскелетная фауна севера Русской платформы) // Тр. Геол. ин-та АН СССР. 1981. № 342. С. 3–100.
- Федонкин М.А., Соколов Б.С.* Бесскелетная фауна венда и ее место в эволюции метазоа // Тр. ПИН РАН. 1987. 192 с.
- Фесенков В.Г.* К вопросу о микрометеоритах // Метеоритика. М.: изд-во АН СССР. 1955. Вып. 12. С. 3–13.
- Флоренский К.П.* Предварительные результаты тунгусской метеоритной комплексной экспедиции 1961 г. // Метеоритика. М.: изд-во АН СССР. 1963. Вып. 23. С. 3–29.
- Хайкин С.Э.* О проблеме связи с внеземными цивилизациями. Внеземные цивилизации / Тр. совещ. Бюракан. Ереван. 1965. С. 83–94.
- Хмелина В.Н.* Аэробные метанотрофные бактерии экстремальных: дис. д.б.н.: 03.00.07. Пушино. 2006. С. 39.
- Чальшев В.И.* Методика изучения ископаемых почв. М.: Недра. 1978. 72 с.
- Чепцов В.С., Воробьева Е.А., Осипов Г.А., Булат С.А., Горленко М.В., Манучарова Н.А., Павлов А.К., Вдовина М.А., Ломасов В.Н.* Пределы устойчивости микробных сообществ в экстремальных местообитаниях к воздействию ионизирующих излучений / Актуальные проблемы радиобиологии и астробиологии. Генетические и эпигенетические эффекты ионизирующих излучений. Мат-лы конф. Дубна: ОИЯИ. 2016. С. 133–134.
- Четверин А.Б.* Можно ли собрать клетку из ее компонентов? // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН. 2009. С. 9–30. ISBN: 978-5-903825-09-7

- Четверин А.Б., А.С. Спирин о молекулярных машинах и происхождении жизни // Биохимия. 2021. Т. 86. № 8. С. 1105–1119. DOI: 10.31857/S0320972521080042
- Шатилович А.В., Шмакова Л.А., Губин С.В., Гиличинский Д.А. Жизнеспособные простейшие в вечной мерзлоте Арктики // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 2. С. 69–78.
- Шатилович А.В., Ривкина Е.М. Адаптивные реакции современных и древних инфузорий *Colpoda steinii* в условиях орбитального полета / Экзобиология: от прошлого к будущему: 3-я Всерос. конф. по астробиологии. Программа и сб. тез. Пущино. 2020. С. 92–96. ISBN: 978-5-6045305-0-4
- Шумилов И.Х., Мингалев А.Н. Первая находка палеопочв в красноцветных отложениях Среднего Тимана // Докл. АН. 2009. Т. 428. № 2. С. 225–227.
- ЩербакOVA В.А., Чувильская Н.А., Ривкина Е.М., Печерицына С.А., Суетин С.В., Лауринавичюс К.С., Лысенко А.М., Гиличинский Д.А. Новая галотолерантная бактерия из криопэга в вечной мерзлоте: описание *Psychrobacter muriicola* sp. nov. // Микробиология. 2009. Т. 78. № 1. С. 98–105.
- Язев С.А. Астрономия. Солнечная система (ред. В.Г. Сурдин). Учеб. пособие для СПО. 3-е изд., перераб. и доп. М.: изд-во Юрайт. 2018. 341 с. ISBN: 978-5-534-08245-6
- Aerts J.W., Elsaesser A., Röling W.F.M., Ehrenfreund P. A contamination assessment of the CI carbonaceous meteorite Orgueil using a DNA-directed approach // Meteoritics & Planetary Science. 2016. V. 51. № 5. P. 920–931. DOI: 10.1111/maps.12629
- Alekseev A.O., Alekseeva T.V., Kabanov P.B., Kalinin P.I. Paleosols and weathering crusts of the Middle-Late Devonian in the Mikhailovskii quarry (Kursk Magnetic Anomaly) // Paleontol. j. 2018. V. 52. № 10. P. 2–11. DOI: 10.1134/S0031030118100039
- Alekseev A.O., Shary P.A., Malyshev V.V. Magnetic susceptibility of soils as an ambiguous climate proxy for paleoclimate reconstructions // Quaternary international. 2023. V. 661. P. 10–21. DOI: 10.1016/j.quaint.2023.04.002
- Alekseeva T., Alekseeva A., Maher B.A., Demkin V. Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried palaeosols // Palaeogeogr., palaeoclimatol., palaeoecol. 2007. V. 249. P. 103–127. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.01.006
- Alekseeva T.V., Alekseev A.O., Gubin S.V., Kabanov P.B., Alekseeva V.A. Palaeoenvironments of the Middle–Late Mississippian Moscow Basin (Russia) from multiproxy study of palaeosols and palaeokarsts // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2016a. V. 450. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.palaeo.2016.02.030
- Alekseeva T., Kabanov P., Alekseev A., Kalinin P., Alekseeva V. Characteristics of early Earth's critical zone based on Middle-Late Devonian palaeosols properties (Voronezh High, Russia) // Clays and clay minerals. 2016b. V. 64. № 5. P. 677–694. DOI: 10.1346/CCMN.2016.064044
- Alekseeva T.V., Alekseev A.O., Mitenko G.V. A paleosol on a Pre-Cambrian ferruginous quartzite weathering crust (Stary Oskol, Belgorod Region, Russia) // Paleontol. j. 2021a. V. 55. P. 1476–1490. DOI: 10.1134/S0031030121120054
- Alekseeva T.V., Mitenko G.V., Alekseev A.O. The ecology of a late Visean forest at Catcraig (East Lothian, Scotland) based on multiproxy study of paleosol and root-casts // Palaeoworld. 2021b. V. 3. P. 62–71. DOI: 10.1016/j.palwor.2020.05.001
- Alekseeva T., Kalinin P., Malishev V., Alekseev A.O. Sulfide oxidation as a trigger for rhyolite weathering and paleosol formation in Devonian (Voronezh High, South Russia) // Catena. 2023. V. 220. P. 106–112. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106712
- Anders E., Fitch F.W. Search for organized elements in carbonaceous chondrites // Science. 1962. V. 138. № 3548. P. 1392–1399. DOI: 10.1126/science.138.3548.1392
- Anders E. Pre-biotic organic matter from comets and asteroids // Nature. 1989. V. 342. P. 255–257. DOI: 10.1038/342255a0
- Anderson D.M. Ice nucleation and substrate-ice interface // Nature. 1967. V. 216. P. 563–566.
- Arrhenius S., Borns H. Worlds in the Making. The Evolution of the Universe // Bul. amer. geogr. soc. 1909. V. 41. № 2. P. 123–124. DOI: 10.2307/200804

- Backermans C., Ayala-del-Rio H.L., Ponder M.A., Vishnevetskaya T., Gilichinsky D., Thomashow M.F., Tiedje J.M.* *Psychrobacter cryohalolentis* sp. nov. and *Psychrobacter arcticus* sp. nov., isolated from Siberian permafrost // *Int. j. syst. evol. microbiol.* 2006. V. 56. № 6. P. 1285–1291. DOI: 10.1099/ijs.0.64043-0
- Bada J.L.* Origins of homochirality // *Nature.* 1995. V. 374. № 6523. P. 594–595. DOI: 10.1038/374594a0
- Barghoorn E.S., Schopf J.W.* Microorganisms from the late Precambrian of central Australia // *Science.* 1965. V. 150. № 3694. P. 337–339. DOI: 10.1126/science.150.3694.337.
- Barghoorn E.S., Tyler S.A.* Microorganisms from the Gunflint Chert: These structurally preserved Precambrian fossils from Ontario are the most ancient organisms known // *Science.* 1965. V. 147. № 3658. P. 563–575. DOI: 10.1126/science.147.3658.563
- Batygin K., Brown M.E.* Evidence for a distant giant planet in the solar system // *Astronom. j.* 2016. V. 151. № 2. P. 22. DOI: 10.3847/0004-6256/151/2/22
- Behr H.-J., Röhrlich C.* Record of seismotectonic events in siliceous cyanobacterial sediments (Magadi cherts) // *Lake Magadi. Kenya. Int. j. earth sci.* 2000. V. 89. P. 268–283. DOI: 10.1007/s005319900070
- Beraldi-Campesi H.* Early life on land and the first terrestrial ecosystems // *Ecol. processes.* 2013. V. 2. № 1. P. 1–17. DOI: 10.1186/2192-1709-2-1
- Bernatowicz T., Fraundor G., Ming T., Anders E., Wopenka B., Zinner E., Fraundor P.* Evidence for interstellar SiC in the Murray carbonaceous meteorite // *Nature.* 1987. V. 330. № 6150. P. 728–730. DOI: 10.1038/330728a0
- Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K., Goodrich C.A.* Nature and origins of meteoritic breccias // *Meteorites and the early solar system II* / D.S. Lauretta, Jr.H.Y. McSween (eds). 2006. P. 679–712.
- Bizzarri B.M., Šponer J.E., Šponer J., Cassone G., Kapralov M.I., Timoshenko G.N., Krasavin E.A., Fanelli G., Timperio A.M., Di Mauro E., Saladino R.* Meteorite-Assisted Phosphorylation of Adenosine Under Proton Irradiation Conditions // *Chem. systems.* 2020. V. 2. № 3. P. e1900039. DOI: 10.1002/syst.201900039
- Bizzarri B. M., Fanellia A., Kapralov M.I., Krasavin E.A., Saladino R.* Meteorite-catalyzed intermolecular trans-glycosylation produces nucleosides under proton beam irradiation // *RSC advances.* 2021. V. 11. № 31. P. 19258–19264. DOI: 10.1039/D1RA02379A
- Blackmond D.G.* The origin of biological homochirality // *Cold spring harbor perspectives in biology.* 2019. V. 11. № 3. P. a032540. DOI: 10.1101/cshperspect.a032540
- Bland P.A., Zolensky M., Benedix G.K., Sephton M.A.* Weathering of Chondritic Meteorites // *Meteorites and the early solar system II.* 2006. V. 1. P. 853–867. DOI: 10.2307/j.ctv1v7zdm.45
- Bonner W.A., van Dort M.A., Yearian M.R.* Molecular chirality of life and intrinsic chirality of matter (reply) // *Nature.* 1978. V. 271. № 5641. P. 186–186. DOI: 10.1038/271186b0
- Bonner W.A.* The origin and amplification of biomolecular chirality // *Origins of Life and Evolution of the Biosphere.* 1991. V. 21. № 2. P. 59–111. DOI: 10.1007/BF01809580
- Boros E., Kolpakova M.* A review of the defining chemical properties of soda lakes and pans: An assessment on a large geographic scale of Eurasian inland saline surface waters // *PLoS ONE.* 2018. V. 13. № 8. P. e0202205. DOI: 10.1371/journal.pone.0202205
- Borzenko S.V., Kolpakova M.N., Shvartsev S.L., Isupov V.P.* Biogeochemical conversion of sulfur species in saline lakes of Steppe Altai // *J. oceanol. and limnol.* 2018. V. 36. P. 676–686. DOI: 10.1007/s00343-018-6293-8
- Bouvier A., Wadhwa M.* The age of the Solar System redefined by the oldest Pb–Pb age of a meteoritic inclusion // *Nature geoscience.* 2010. V. 3. № 9. P. 637–641. DOI: 10.1038/ngeo941
- Bucker H.* The Biostack Experiments I and II aboard Apollo 16 and 17 // *Life sci. space res.* 1974. V. 12. P. 43–50. DOI: 10.1016/B978-0-08-021783-3.50009-X
- Bucker H., Horneck G., Allkofer O.C., Bartholoma K.P., Beaujean R., Cuer P., Enge W., Facius R., Francois H., Graul E.H., Henig G., Heinrich W., Kaiser R., Kuhn H., Massue J.P., Planel H., Portal G., Reinholz E., Ruther W., Scheuermann W., Schmitt R., Schopper E., Schott J.U., Soleilhavoup J.P., Wollenhaupt H.* The Biostack experiment on Apollo 16 // *Life sci. space res.* 1973. V. 11. P. 295–305.

- Bucker H., Facius R., Hildebrand D., Horneck G.* Results of the *Bacillus subtilis* unit of the Biostack II experiment: physical characteristics and biological effects of individual cosmic HZE particles // *Life sci. space res.* 1975. V. 13. P. 161–166.
- Bucker H., Horneck G.* The biological effectiveness of HZE-particles of cosmic radiation studied in the Apollo 16 and 17 Biostack experiments // *Acta astronaut.* 1975. V. 2. № 3–4. P. 247–264. DOI: 10.1016/0094-5765(75)90095-8
- Burganskaya E.I., Bryantseva I.A., Gaisin V.A., Grouzdev D.S., Rysina M.S., Barkhutova D.D., Baslerov R.V., Gorlenko V.M., Kuznetsov B.B.* Benthic phototrophic community from Kiran soda lake, south-eastern Siberia // *Extremophiles.* 2018. V. 22. P. 211–220. DOI: 10.1007/s00792-017-0989-0
- Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Ikonnikova N.P., Burlak M.A., Belinski A.A.* Interstellar comet 21/Borisov: dust composition from multiband photometry and modelling // *Monthly not. roy. astronom. soc.* 2021. V. 502. № 2. P. 1882–1894. DOI: 10.1093/mnras/staa4022
- Cassidy W.* Cosmic dust // *Science.* 1964. V. 144. P. 1475–1477. DOI: 10.1126/science.144.3625.1475
- Castello J.D., Rogers S.O.* Life in ancient ice // Princeton univ. press. 2005. V. 5653. P. 328. ISBN: 9780691074757
- Catling D.C.* Astrobiology: a very short introduction. Oxford univ. press. USA. 2013. V. 370. 160 p. ISBN: 9780199586455
- Cavalazzi B., Westall F.* (eds) Biosignatures for astrobiology. Berlin/Heidelberg. Springer. 2019. P. 1–347. DOI: 10.1007/978-3-319-96175-0
- Claus G., Nagy B.* A microbiological examination of some carbonaceous meteorites // *Nature.* 1961. V. 192. P. 594–596.
- Cockell C.S., Bush T., Bryce C., Direito S., M. Fox-Powell M., Harrison J.P., Lammer H., Landenmark H., Martin-Torres J., Nicholson N., Noack L., O'Malley-James J., Payler S.J., Rushby A., Samuels T., Schwendner P., Wadsworth J., Zorzano M.P.* Habitability: a review // *Astrobiology.* 2016. V. 16. № 1. P. 89–117. DOI: 10.1089/ast.2015.1295
- Cook J., Edwards A., Takeuchi N., Irvine-Fynn T.* Cryoconite: the dark biological secret of the cryosphere // *Progress in physical geography.* 2016. V. 40. № 1. P. 66–111. DOI: 10.1177/0309133315616574
- Cordiner M.A., Milam S.N., Biver N., Bockelée-Morvan D., Roth N.X., Bergin E.A., Jehin E., Remijan A.J., Charnley S.B., Mumma M.J., Boissier J., Crovisier J., Paganini L., Kuan Y.-J., Lis D.C.* Unusually high CO abundance of the first active interstellar comet // *Nature astronomy.* 2020. V. 4. № 9. P. 861–866. DOI: 10.1038/s41550-020-1087-2
- Costanzo G., Giorgi A., Scipioni A., Timperio A.M., Mancone C., Tripodi M., Kapralov M.I., Krasavin E.A., Kruse H., Šponer J., Šponer J.E., Ranc V., Otyepka M., Pino S., Di Mauro E.* Nonenzymatic Oligomerization of 3', 5'-Cyclic CMP Induced by Proton and UV Irradiation Hints at a Nonfastidious Origin of RNA // *Chem. bio. chem.* 2017. T. 18. № 15. P. 1535–1543. DOI: 10.1002/cbic.201700122
- Cronin J.R., Pizzarello S.* Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids // *Science.* 1997. V. 275. № 5302. P. 951–955. DOI: 10.1126/science.275.5302.951
- Curtis-Lake E.* et al. Spectroscopic confirmation of four metal-poor galaxies at $z=10.3-13.2$ // *Nature astronom.* 2023. V. 7. № 5. P. 622–632. DOI: 10.48550/arXiv.2212.04568
- Dalrymple G.B.* The Age of the Earth. Stanford univ. press. USA. 1991. P. 271. ISBN: 9780804715690
- Dasgupta P., Stiglitz J.* Uncertainty, industrial structure, and the speed of R&D // *The bell j. econom.* 1980. P. 1–28. DOI: 10.2307/3003398
- Delsemme A.H., Swings P.* Gas hydrates in cometary nuclei and interstellar grains // *Ann. astrophys.* 1952. V. 15. P. 1–6.
- Diederichsen U.* Pairing properties of alanyl peptide nucleic acids containing an amino acid backbone with alternating configuration // *Angewandte chemie intern ed. in English.* 1996. V. 35. № 4. P. 445–448. DOI: 10.1002/anie.199604451
- Duncan M., Quinn T., Tremaine S.* The origin of short-period comets // *Astrophys. j. Pt 2 - Letters (ISSN 0004-637X).* 1988. V. 328. P. L69–L73. DOI: 10.1086/185162

- Droser M.L., Tarhan L.G., Gehling J.G.* The rise of animals in a changing environment: global ecological innovation in the late Ediacaran // *Ann. rev. of earth and planetary sci.* 2017. V. 45. P. 593–617. DOI: 10.1146/annurev-earth-063016-015645
- Dzombak R.M., Sheldon N.D.* Terrestrial records of weathering indicate three billion years of dynamic equilibrium // *Gondwana res.* 2022. V. 109. P. 376–393. DOI: 10.1016/j.gr.2022.05.009
- Eckhardt A.K., Linden M.M., Wende R.C., Bernhardt B., Schreiner P.R.* Gas-phase sugar formation using hydroxymethylene as the reactive formaldehyde isomer // *Nature chemistry.* 2018. V. 10. № 11. P. 1141–1147. DOI: 10.1038/s41557-018-0128-2
- Egholm M., Buchardt O., Nielsen P.E., Berg R.H.* Peptide nucleic acids (PNA). Oligonucleotide analogs with an achiral peptide backbone // *J. amer. chem. soc.* 1992. V. 114. № 5. P. 1895–1897. DOI: 10.1021/ja00031a062
- Ehrenfreund P., Spaans M., Holm N.G.* The evolution of organic matter in space // *Philosoph. trans. roy. soc. A: Mathem., phys. engineer. sci.* 2011. V. 369. № 1936. P. 538–554. DOI: 10.1098/rsta.2010.0231
- Ellington A., Szostak J.* *In vitro* selection of RNA molecules that bind specific ligands // *Nature.* 1990. V. 346. P. 818–822. DOI: 10.1038/346818a0
- Elms A.K., Tremblay P.-E., Gänsicke B.T., Koester D., Hollands M.A., Fusillo N.P.G., Cunningham T., Apps K.* Spectral analysis of ultra-cool white dwarfs polluted by planetary debris // *Monthly notices roy. astronomy soc.* 2022. V. 517. № 3. P. 4557–4574. DOI: 10.1093/mnras/stac2908
- Facius R., Bucker H., Hildebrand D., Horneck G., Holtz G., Reitz G., Schafer M., Toth B.* Radiobiological results from the *Bacillus subtilis* Biostack experiments within the Apollo and the ASTP space flights // *Life sci. space res.* 1978. V. 16. P. 151–156. DOI: 10.1016/B978-0-08-022022-2.50028-9
- Facius R., Bucker H., Horneck G., Reitz G., Schafer M.* Dosimetric and biological results from the *Bacillus subtilis* Biostack experiment with the Apollo-Soyuz Test Project // *Life sci. space res.* 1979. V. 17. P. 123–128. DOI: 10.1016/B978-0-08-023416-8.50020-9
- Feringa B.L., Van Delden R.A.* Absolute asymmetric synthesis: the origin, control, and amplification of chirality // *Angewandte chem. intern. ed.* 1999. V. 38. № 23. P. 3418–3438. DOI: 10.1002/(SICI)1521-3773(19991203)38:23<3418::AID-ANIE3418>3.0.CO;2-V
- Ferrer M., Golyshina O.V., Beloqui A., Golyshin P.N., Timmis K.N.* The cellular machinery of *Ferroplasma acidiphilum* is iron-protein-dominated // *Nature.* 2007. V. 445. № 7123. P. 91–94. DOI: 10.1038/nature05362
- Fitch F., Schwarcz H.P., Anders E.* ‘Organized elements’ in carbonaceous chondrites // *Nature.* 1962. V. 193. P. 1123–1125. DOI: 10.1038/1931123a0
- Forterre P.* Three RNA cells for ribosomal lineages and three DNA viruses to replicate their genomes: a hypothesis for the origin of cellular domain // *PNAS. USA.* 2006a. V. 103. № 10. P. 3669–3674. DOI: 10.1073/pnas.0510333103
- Forterre P.* The origin of viruses and their possible roles in major evolutionary transitions // *Virus res.* 2006b. V. 117. № 1. P. 5–16. DOI: 10.1016/j.virusres.2006.01.010
- Genge M.J., Crady M.M., Hutchinson R.* The texture and composition of fine-grained Antarctic micrometeorites // *Geochim. cosmochim. acta.* 1997. V. 61. P. 5149–5162. DOI: 10.1016/S0016-7037(97)00308-6
- Gibson Jr. E.K., McKay D.S., Thomas-Keptra K.L., Wentworth S.J., Westall F., Steele A., Romanek C.S., Bell M.S., Toropski J.* Life on Mars: evaluation of the evidence within Martian meteorites ALH84001, Nakhla and Shergotty // *Precambrian res.* 2001. V. 106. № 1. P. 15–34. DOI:10.1016/S0301-9268(00)00122-4
- Gilichinsky D.A., Wilson G.S., Friedmann E.I., McKay C.P., Sletten R.S., Rivkina E.M., Vishnivetskaya T.A., Erokhina L., Ivanushkina N.E., Kochkina G.A., Shcherbakova V.A., Soina V.S., Spirina E.V., Vorobyova E.A., Fyodorov-Davydov D.G., Hallet B., Ozerskaya S.M., Sorokovikov V.A., Laurinavichyus K.S., Shatilovich A.V., Chanton J.P., Ostroumov V.E., Tiedje, J.M.* Microbial populations in Antarctic permafrost: biodiversity, state, age, and implication for astrobiology // *Astrobiology.* 2007. V. 7. № 2. P. 275–311. DOI: 10.1089/ast.2006.0012

- Gilichinsky D.A., Rivkina E.M.* Permafrost microbiology // Encyclopedia of earth sci. ser. 2011. № 9781402092114. P. 726–732. DOI: 10.1007/978-1-4020-9212-1_162
- Gilichinsky M., Demidov N., Rivkina E.* Morphometry of volcanic cones on Mars in perspective of Astrobiological Research // Intern. j. astrobiol. 2015. V. 14. № 4. P. 537–545. DOI: 10.1017/S1473550415000166
- Gladman B.* Destination Earth: Martian meteorite delivery // Icarus. 1997. V. 130. P. 228–246. DOI: 10.1006/icar.1997.5828
- Glavin D.P., Burton A.S., Elsila J.E., Aponte J.C., Dworkin J.P.* The search for chiral asymmetry as a potential biosignature in our solar system // Chemical rev. 2019. V. 120. № 11. P. 4660–4689. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00474
- Graul E.H., Ruther W., Heinrich W., Allkofer O.C., Kaiser R., Pfohl R., Schopper E., Henig G., Schott J.U., Buckner H.* Radiobiological results of the Biostack experiment on board Apollo 16 and 17 // Life sci. space res. 1975. V. 13. P. 153.
- Grossman J.N.* The Meteoritical Bulletin, No. 76, 1994 January: The US Antarctic Meteorite Collection // Meteoritics. Meteoritical soc. USA. 1994. V. 29. P. 100–143. DOI: 10.1111/j.1945-5100.1994.tb00661.x
- Guélin M., Cernicharo J.* Organic molecules in interstellar space: Latest advances // Frontiers in astronomy and space sci. 2022. V. 9. P. 1–16. DOI: 10.3389/fspas.2022.787567
- Haldane J.B.S.* The origin of life // Rationalist ann. 1929. V. 148. P. 3–10.
- Hayden M.R., Recio-Blanco A., de Laverny P., Mikolaitis S., Worley C.C.* The AMBRE project: The thick thin disk and thin thick disk of the Milky Way // Astronomy & astrophysics. 2017. V. 608. L. 1. DOI: 10.48550/arXiv.1712.02358
- Head J.W., Hiesinger H., Ivanov M.A., Kreslavsky M.A., Pratt S., Thomson B.J.* Possible ancient oceans on Mars: evidence from Mars Orbiter Laser Altimeter data // Science. 1999. V. 286. № 5447. P. 2134–2137. DOI: 10.1126/science.286.5447.2134
- Heck P.R., Greer J., Kööp L., Trappitsch R., Gyngard F., Busemann H., Maden C., Ávila J.N., Davis A.M., Wieler R.* Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide // Proc. nat. acad. sci. 2020. V. 117. № 4. P. 1884–1889. DOI: 10.1073/pnas.1904573117
- Homann M., Sansjofre P., Van Zuilen M., Heubeck C., Gong J., Killingsworth B., Lalonde S.V.* Microbial life and biogeochemical cycling on land 3,220 million years ago // Nat. geosci. 2018. V. 11. № 9. P. 665–671. DOI: 10.1038/s41561-018-0190-9
- Hoover R.B., Hoover M.J., Hoyle F., Wickramasinghe N.C., Al-Mufti S.* Diatoms on Earth, comets, Europa and in interstellar space // Earth, Moon, and planets. 1986. V. 35. P. 19–45. DOI: 10.1007/978-94-011-4297-7_23
- Hoover R.B.* Meteorites, microfossils, and exobiology // Instruments, methods, and missions for the investigation of extraterrestrial microorganisms. Proc. SPIE. 1997. V. 3111. P. 115–136. DOI: 10.1117/12.278766
- Hoover R.B., Rozanov A.Yu., Zhmur S.I., Gorlenko V.M.* Further evidence of microfossils in carbonaceous meteorites // Instruments, methods, and missions for astrobiology. Proc. SPIE. 1998. V. 3441. P. 203–216. DOI: 10.1117/12.319839
- Hoover R.B., Rozanov A.Yu.* Chemical biomarkers and microfossils in carbonaceous meteorites // Instruments, methods, and missions for astrobiology. Proc. SPIE. 2002. V. 4495. P. 1–18. DOI: 10.1117/12.454756
- Hoover R.B., Jerman G., Rozanov A.Y., Sipiera P.P.* Indigenous Microfossils in Carbonaceous Meteorites // Proc. of SPIE / R.B. Hoover, G.V. Levin, A.Y. Rozanov (eds). 2004. V. 5555. P. 1–17. DOI: 10.1117/12.566491
- Hoover R.B., Rozanov A.Yu., Ryumin A.K., Kapralov M.I.* Diatoms in the Orgueil meteorite // Paleontol. j. 2018. V. 52. P. 1647–1650. DOI: 10.1134/S0031030118130051
- Hoppe P., Leitner J., Kodolányi J., Borrmann S., Jones A.P.* Dust from supernovae and their progenitors in the solar nebula // Nat. astronomy. 2022. V. 6. №. 9. P. 1027–1034. DOI: 10.1038/s41550-022-01737-5

- Horneck G., Facius R., Enge W., Beaujean R., Bartholoma K.P.* Microbial studies in the Biostack experiment of the Apollo 16 mission: germination and outgrowth of single *Bacillus subtilis* spores hit by cosmic HZE particles // *Life sci. space res.* 1974. V. 12. P. 75–83. DOI: 10.1016/B978-0-08-021783-3.50014-3
- Horneck G.* Responses of *Bacillus subtilis* spores to space environment: results from experiments in space // *Orig. life evol. biosph.* 1993. V. 23. № 1. P. 37–52. DOI: 10.1007/BF01581989
- Hoyle F., Wickramasinghe C.* Comets-a vehicle for panspermia // *Comets and the origin of life.* 1981. V. 5. P. 227–239. DOI: 10.1007/978-94-009-8528-5
- Huang W., Ertekin E., Wang T., Cruz L., Dailey M., DiRuggiero G., Kisailus D.* Mechanism of water extraction from gypsum rock by desert colonizing microorganisms // *Proc. nat. acad. sci.* 2020. V. 117. № 20. P. 10681–10687. DOI: 10.1073/pnas.2001613117
- Iglesias-Goth S.* A search for tryptophan in the gas IC 348 star cluster of the Perseus molecular cloud // *Monthly not. roy. astronom. soc.* 2023. V. 523. № 2. P. 2876–2886. DOI: 10.1093/mnras/stad1535
- Israël G., Szopa C., Raulin F., Cabane M., Niemann H. B., Atreya S. K., Bauer S. J., Brun J.-F., Chassefière E., Coll P., Condé E., Coscia D., Hauchecorne A., Millian P., Nguyen M.-J., Owen T., Riedler W., Samuelson R. E., Siguier J.-M., Steller M., Sternberg R., Vidal-Madjar C.* Complex organic matter in Titan's atmospheric aerosols from in situ pyrolysis and analysis // *Nature.* 2005. V. 438. P. 796–799. DOI: 10.1038/nature04349
- Ferus M., Nesvorný D., Šponer J., Kubelik P., Michalčíková R., Shestivská V., Šponer J.E., Civiš S.* High-energy chemistry of formamide: A unified mechanism of nucleobase formation // *Proc. nat. acad. sci.* 2015. V. 112. № 3. P. 657–662. DOI: 10.1073/pnas.1412072111
- Jetten M.S.M., Strous M., van de Pas-Schoonen K.T., Schalk J., van Dongen U.G.J.M., van de Graaf A.A., Logemann S., Muyzer G., van Loosdrecht M.C.M., Kuenen J.G.* The anaerobic oxidation of ammonium // *FEMS Microbiology reviews.* 1998. V. 22. № 5. P. 421–437. DOI: 10.1111/j.1574-6976.1998.tb00379.x
- Joyce G.F., Visser G.M., van Boom J.H., Orgel L.E., van Westrenen J.* Chiral selection in poly (C)-directed synthesis of oligo (G) // *Nature.* 1984. V. 310. № 5978. P. 602–604. DOI: 10.1038/310602a0
- Kadoya S., Krissansen-Totton J., Catling D.* Probable cold and alkaline surface environment of the Hadean Earth caused by impact ejecta weathering // *Geochem. geophys. geosy.* 2020. V. 21. P. 1–18. DOI: 10.1029/2019GC008734
- Kasting J.F.* Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus // *Icarus.* 1988. V. 74. № 3. P. 472–494. DOI: 10.1016/0019-1035(88)90116-9
- Kauffman E.G., Steidtmann J.R.* Are these the oldest metazoan trace fossils? // *J. paleontol.* 1981. P. 923–947.
- Keller H.U., Kührt E.* Cometary nuclei – from Giotto to Rosetta // *Space sci. rev.* 2020. V. 216. № 1. P. 1–26. DOI: 10.1007/s11214-020-0634-6
- Kempe S., Degens E.T.* An early soda ocean? // *Chemical geology.* 1985. V. 53. P. 95–108. DOI: 10.1016/0009-2541(85)90023-3
- King A.J., Daly L., Rowe J.* et al. The Winchcombe meteorite, a unique and pristine witness from the outer solar system // *Sci. advances.* 2022. V. 8. № 46. P. 1–17. DOI: 10.1126/sciadv.abq3925
- Kirschvink J.L., Jones D.S., MacFadden B.J.* (eds). Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms. N.Y.L.: Plenum 2. 1985. P. 243–254. DOI: 10.1007/978-1-4613-0313-8_21
- Kirschvink J.L., Weiss B.P.* Mars, panspermia, and the origin of life: where did it all begin // *Palaeontologia electronica.* 2002. V. 4. № 2. P. 8–15. DOI: 10.5026/jgeography.112.2_187
- Kirschvink J.L., Kopp R.E.* Palaeoproterozoic ice houses and the evolution of oxygen-mediating enzymes: the case for a late origin of photosystem II // *Philosoph. trans. roy. soc. B: Biol. sci.* 2008. V. 363. № 1504. P. 2755–2765. DOI: 10.1098/rstb.2008.0024
- Klessen R.S., Glover S.C.O.* The first stars: formation, properties, and impact // *Ann. rev. astronomy and astrophysics.* 2023. V. 61. P. 65–130. DOI: 10.48550/arXiv.2303.12500
- Kolb V.M.* Defining Life Multiple Perspectives // *Handbook of astrobiology* / V. M. Kolb (ed.). CRC Press. 2019. P. 57, 63. ISBN: 9780367780487

- Koonin E.V., Martin W. On the origin of genomes and cells within inorganic compartments // Trends in genet. 2005. V. 21. № 12. P. 647–654. DOI: 10.1016/j.tig.2005.09.006
- Koonin E.V., Senkevich T.G., Dolja V.V. The ancient Virus World and evolution of cells // Biology direct. 2006. V. 1. № 1. P. 1–27. DOI: 10.1186/1745-6150-1-29
- Kopnin S.I., Popel S.I., Yu M.Y. Phenomena associated with complex (dusty) plasmas in the ionosphere during high-speed meteor showers // Physics of plasmas. 2009. V. 16. № 6. DOI: 10.1063/1.3147931
- Koppitz M., Nielsen P.E., Orgel L.E. Formation of oligonucleotide–PNA–chimeras by template-directed ligation // J. amer. chem. soc. 1998. V. 120. № 19. P. 4563–4569. DOI: 10.1021/ja974190y
- Kozlov I.A., Orgel L.E., Nielsen P.E. Remote enantioselection transmitted by an achiral peptide nucleic acid backbone // Angewandte chemie. 2000. V. 112. № 23. P. 4462–4465. DOI: 10.1002/1521-3757(20001201)112:23<4462::AID-ANGE4462>3.0.CO;2-1
- Krivushin K.V., Shcherbakova V.A., Petrovskaya L.E., Rivkina E.M. *Methanobacterium veterum* sp. nov. from ancient Siberian permafrost // Int. j. syst. evol. microbiol. 2010. V. 60. № 2. P. 455–459. DOI: 10.1099/ijs.0.011205-0
- Krot A.N., Keil K., Scott E.R.D., Goodrich C.A., Weisberg M.K. 1.05 Classification of Meteorites // Treatise on geochem. 2007. V. 1. P. 1–52. DOI: 10.1016%2FB0-08-043751-6%2F01062-8
- Laflleur L.J. Astrobiology // Astronom. soc. Pacific leaflets. 1941. V. 3. № 143. P. 333.
- Latif M.A., Whalen D., Khochfar S. The Birth of Mass Function of Population III Stars // Astrophys. j. 2022. V. 925. № 1. P. 1–8. DOI: 10.3847/1538-4357/ac3916
- Lawler M.E., Brownlee D.E. CHON as a component of dust from comet Halley // Nature. 1992. V. 359. № 6398. P. 810–812. DOI: 10.1038/359810a0
- Legendre M., Bartoli J., Shmakova L., Jeudy S., Labadie K., Adrait A., Lescot M., Poirot O., Bertaux L., Bruley C., Coute Y., Rivkina E., Abergel C., Claverie J.-M. Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology // PNAS. 2014. V. 111. № 11. P. 4274–4279. DOI: 10.1073/pnas.1320670111
- Legendre M., Lartigue A., Bertaux L., Jeudy S., Bartoli J., Lescot M., Alempic J.-M., Ramus C., Bruley C., Labadie K., Shmakova L., Rivkina E., Coute Y., Abergel C., Claverie J.-M. In-depth study of *Mollivirus sibericum*, a new 30,000-y-old giant virus infecting *Acanthamoeba* // PNAS. 2015. V. 112. № 38. P. 5327–5335. DOI: 10.1073/pnas.1510795112
- Lenton T.M., Daines S.J. Matworld – the biogeochemical effects of early life on land // New phytologist. 2017. V. 215. № 2. P. 531–537. DOI: 10.1111/nph.14338
- Levison H.F., Duncan M.J. From the Kuiper belt to Jupiter-family comets: The spatial distribution of ecliptic comets // Icarus. 1997. V. 127. № 1. P. 13–32. DOI: 10.1006/icar.1996.5637
- Levy M., Miller S.L., Brinton K., Bada J.L. Prebiotic synthesis of adenine and amino acids under Europa-like conditions // Icarus. 2000. V. 145. P. 609–613. DOI: 10.1006/icar.2000.6365
- Lewis R.S., Ming T., Wacker J.F., Anders E., Steel E. Interstellar diamonds in meteorites // Nature. 1987. V. 326. № 6109. P. 160–162. DOI: 10.1038/326160a0
- Louca S., Shih P.M., Pennell M.W., Fischer W.W., Parfrey L.W., Doebeli M. Bacterial diversification through geological time // Nat. ecol. evol. 2018. V. 2. P. 1458–1467. DOI: 10.1038/s41559-018-0625-0
- Lowenstam H.A., Weiner S. On biomineralization. Oxford: Oxford univ. press. 1989. P. 324. ISBN: 9780195049770
- Lunine J.I. Evolution of the atmosphere and surface of Titan // ESA spec. publ. 1990. V. 315. P. 159–165. Bibcode: 1990ESASP.315..159L
- Marin J., Battistuzzi F.U., Brown A.C., Hedges S.B. The timetree of prokaryotes: new insights into their evolution and speciation // Mol. biol. evol. 2017. V. 34. № 2. P. 437–446. DOI: 10.1093/molbev/msw245
- Mathur S.C., Gaur S.D., Loyal R.S., Tripathi A., Sisodia M.S. Spherules in the Fatehgarh Formation (Cretaceous) of Barmer Basin, India // Gondwana res. 2005a. V. 8. № 4. P. 579–584. DOI: 10.1016/S1342-937X(05)71157-6

- Mathur S.C., Gour, S.D., Loyal, R.S., Tripathi A., Tripathi R.P., Gupta A.* First report on magnetic spherules recovered from Maastrichtian bone bed sedimentary sequence of Fatehgarh Formation, Barmer basin, India // *Current sci.* 2005b. P. 1259–1268.
- Mathur S.K., Mathur S.C., Loyal R.S.* First microvertebrate assemblage from the Fatehgarh Formation (Cretaceous), Barmer district, western Rajasthan // *Geol. soc. India.* 2006. V. 67. № 6. P. 759–769.
- Meierhenrich U.J.* Amino Acids and the Asymmetry of Life // Springer-Verlag. 2008. P. 145–160. ISBN: 978-3-540-76886-9. DOI: 10.1007/978-3-540-76886-9
- McGeoch M.W., Dikler S., McGeoch J.E.M.* Hemolithin: a meteoritic protein containing iron and lithium // arXiv preprint arXiv:2002.11688. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2002.11688
- McGeoch M.W., Dikler S., McGeoch J.E.M.* Meteoritic proteins with glycine, iron and lithium // arXiv preprint arXiv:2102.10700. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2102.10700
- McGuire B.A., Carroll P.B., Loomis R.A., Finneran I.A., Jewell P.R., Remijan A.J., Blake G.A.* Discovery of the interstellar chiral molecule propylene oxide (CH₃CHCH₂O) // *Science.* 2016. V. 352. № 6292. P. 1449–1452. DOI: 10.1126/science.aae0328
- McKay D.S., Gibson Jr. E.K., Thomas-Keprta K.L., Vali H., Romanek C.S., Clemett S.J., Chillier X.D.F., Maechling C.R., Zare R.N.* Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001 // *Science.* 1996. V. 273. № 5277. P. 924–930. DOI: 10.1126/science.273.5277.924
- Mergelov N., Mueller C.W., Prater I., Shorkunov I., Dolgikh A., Zazovskaya E., Goryachkin S.* Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth // *Scientific rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 1–15. DOI: 10.1038/s41598-018-21682-6
- Mergelov N., Dolgikh A., Shorkunov I., Zazovskaya E., Soina V., Yakushev A., Fedorov-Davydov D., Pryakhin S., Dobryansky A.* Hypolithic communities shape soils and organic matter reservoirs in the ice-free landscapes of East Antarctica // *Scientific rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 10277. DOI: 10.1038/s41598-020-67248-3
- Miller S.L.* A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions // *Science.* 1953. V. 117. P. 528–529. DOI: 10.1126/science.117.3046.528
- Miller S.L., Urey H.C.* Organic compound synthesis on the primitive Earth: Several questions about the origin of life have been answered, but much remains to be studied // *Science.* 1959. V. 130. № 3370. P. 245–251. DOI: 10.1126/science.130.3370.2
- Mitchell R.L., Strullu-Derrien C., Sykes D., Pressel S., Duckett J.G., Kenrick P.* Cryptogamic ground covers as analogues for early terrestrial biospheres: Initiation and evolution of biologically mediated proto-soils // *Geobiology.* 2021. V. 19. № 3. P. 292–306. DOI: 10.1111/gbi.12431
- Mizuuchi R., Ichihashi N.* Primitive Compartmentalization for the Sustainable Replication of Genetic Molecules // *Life.* 2021. V. 11. № 191. P. 1–17. DOI: 10.3390/life11030191
- Moilanen J., Gritsevich M., Lyytinen E.* Determination of strewn fields for meteorite falls // *MNRAS.* 2021. V. 503. № 3. P. 3337–3350. DOI: 10.1093/mnras/stab586
- Moore J.M., Pappalardo R.T.* Titan: An exogenic world? // *Icarus.* 2011. V. 212. P. 790–806. DOI: 10.1016/j.icarus.2011.01.019
- Munegumi T.* Aldolase as a chirality intersection of L-amino acids and D-sugars // *Origins of life and evolution of biospheres.* 2015. V. 45. P. 173–182. DOI: 10.1007/s11084-015-9415-8
- Murray J.* On the distribution of volcanic debris over the floor of ocean // *Proc. roy. soc. 1876.* Edinburg. V. 9. P. 247–261. DOI: 10.1017/S0370164600032181
- Murray J., Renard A.F.* Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of HMS Challenger in the years 1872 to 1876 // Edinburg. HM Stationery office. 1891. 525 p.
- Nagy B., Meinschein W.G., Hennessy D.J.* Mass spectroscopic analysis of the Orgueil meteorite: Evidence for biogenic hydrocarbons // *Ann. N.-Y. acad. sci.* 1961. V. 93. № 2. P. 27–35. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1961.tb30508.x
- Nakamura T., Tajika E.* Stability and evolution of the climate system of Mars // *Earth planets and space.* 2001. V. 53. № 8. P. 851–859. DOI: 10.1186/BF03351682

- Neish C.D., Somogyi A., Smith M.A. Titan's primordial soup: Formation of amino acids via low-temperature hydrolysis of tholins // *Astrobiology*. 2010. V. 10. № 3. P. 337–347. DOI: 10.1089/ast.2009.0402
- Nesvorný D., Vokrouhlický D., Bottke W.F., Levison H.F. Evidence for very early migration of the Solar System planets from the Patroclus–Menoetius binary Jupiter Trojan // *Nature astronomy*. 2018. V. 2. № 11. P. 878–882. DOI: 10.1038/s41550-018-0564-3
- Neubeck A., McMahon S. (eds). *Prebiotic Chemistry and the Origin of Life*. Springer. 2021. P. 1–296. DOI: 10.1007/978-3-030-81039-9
- Nicholson W., Krivushin K., Gilichinsky D., Schuerger A. Growth of *Carnobacterium* spp. from permafrost under low pressure, temperature, and anoxic atmosphere has implications for Earth microbes on Mars // *PNAS*. 2013. V. 110. № 2. P. 666–671. DOI: 10.1073/pnas.1209793110
- Nicholson W.L., Zhalina K., de Oliveira R.R., Triplett E.W. Proposal to rename *Carnobacterium inhibens* as *Carnobacterium inhibens* subsp. *inhibens* subsp. nov. and description of *Carnobacterium inhibens* subsp. *gilichinskyi* subsp. nov., a psychrotolerant bacterium isolated from Siberian permafrost // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2015. V. 65. № 2. P. 556–561. DOI: 10.1099/ijs.0.067983-0
- Niemann H., Lösekann T., Beer D., Elvert M., Nadalig T., Knittel K., Amann R., Sauter E.J., Schlüter M., Klages M., Foucher J.P., Boetius A. Novel microbial communities of the Haakon Mosby mud volcano and their role as a methane sink // *Nature*. 2006. V. 443. № 7113. P. 854–858. DOI: 10.1038/nature05227
- Ohkubo T., Nomoto K., Umeda H., Yoshida N., Tsuruta S. Evolution of very massive population III stars with mass accretion from pre-main sequence to collapse // *Astrophys. J.* 2009. V. 706. P. 1184–1193. DOI: 10.1088/0004-637X/706/2/1184
- Orgel L.E. Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world // *Critical rev. in biochem. and molecular biol.* 2004. V. 39. № 2. P. 99–123. DOI: 10.1080/10409230490460765
- Orosei R., Lauro S.E., Pettinelli E., Cicchetti A., Coradini M., Cosciotti B., Di Paolo F., Flamini E., Mattei E., Pajola M., Soldovieri F., Cartacci M., Cassenti F., Frigeri A., Giuppi S., Martufi R., Masdea A., Mitri G., Nenna C., Noschese R., Restano M., Seu R. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars // *Science*. 2018. V. 361. № 6401. P. 490–493. DOI: 10.1126/science.aar7268
- Palik P. Further life-forms in the Orgueil meteorite // *Nature*. 1962. V. 194. P. 1065. DOI: 10.1038/1941065b0
- del Peloso E.F., da Silva L., Porto de Mello G.F., Arany-Prado L.I. The Age of the Galactic thin disk from Th/Eu nucleocosmochronology III. Extended sample // *Astronomy & astrophysics*. 2005. V. 440. № 3. P. 1153–1159. DOI: 10.48550/arXiv.astro-ph/0506458
- Peretó J., Català J. The renaissance of synthetic biology // *Biol. theory*. 2007. V. 2. P. 128–130. DOI: 10.1162/biot.2007.2.2.128
- Peretó J. Erasing borders: a brief chronicle of early synthetic biology // *J. molecular evol.* 2016. V. 83. № 5–6. P. 176–183. DOI: 10.1007/s00239-016-9774-4
- Pirola V., Berdyugin A., Frisch P.C., Kagitani M., Sakanoi T., Berdyugina S., Cole A.A., Harlinton C., Hill K. High-precision polarimetry of nearby stars ($d < 50$ pc) – Mapping the interstellar dust and magnetic field inside the Local Bubble // *Astronomy & astrophysics*. 2020. V. 635. P. 8. DOI: 10.1051/0004-6361/201937324
- Pikuta E.V., Marsic D., Bej A., Tang J., Krader P., Hoover R.B. *Carnobacterium pleistocenium* sp. nov., a novel psychrotolerant, facultative anaerobe isolated from permafrost of the Fox Tunnel in Alaska // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2005. V. 55. № 1. P. 473–478. DOI: 10.1099/ijs.0.63384-0
- Pizzarello S., Cronin J.R. Non-racemic amino acids in the Murray and Murchison meteorites // *Geochim. et cosmochim. acta*. 2000. V. 64. № 2. P. 329–338. DOI: 10.1016/s0016-7037(99)00280-x
- Pizzarello S., Shock E. The Organic Composition of Carbonaceous Meteorites: The Evolutionary Story Ahead of Biochemistry // *Cold Spring harb. perspect. Biol.* 2010. V. 2. № 3. P. 1–19. DOI: 10.1101/cshperspect.a002105
- Pizzarello S., Cooper G.W., Flynn G.J. The Nature and Distribution of the Organic Material in Carbonaceous Chondrites and Interplanetary Dust Particles // *Meteorites and the ear-*

- ly solar system II (Space sci. ser.) / D.S. Lauretta, Jr.H.Y. McSween (eds). 2006. P. 625–651. DOI: 10.2307/j.ctv1v7zdm.36
- Priscu J.C., Christner B.C.* Earth's icy biosphere // Microbial diversity and bioprospectin / A.T. Bull (ed.). Washington: ASM press. 2004. P. 130–145. ISBN: 1555812678
- Puy D., Dubrovich V., Lipovka A., Talbi D., Vonlanthen P.* Molecular fluorine chemistry in the early Universe // Astronomy & astrophysics. 2007. V. 476. № 2. P. 685–689. DOI: 10.1051/0004-6361:20066934
- Reitz G., Horneck G., Facius R., Schafer M.* Results of space experiments // Radiat. environ. biophys. 1995. V. 34. № 3. P. 139–144. DOI: 10.1007/BF01211539
- Retallack G.J.* Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology. 2nd ed. Wiley. 2001. 404 p. ISBN: 978-1-119-53045-9
- Retallack G.J.* Paleosols and paleoenvironments of early Mars // Geology. 2014. V. 42. № 9. P. 755–758. DOI: 10.1130/G35912.1
- Retallack G.J.* Astropedology: paleosols and the origins of life // Geology today. 2016. V. 32. № 5. P. 172–178. DOI: 10.1111/gto.12149
- Retallack G.J.* The oldest known paleosol profiles on Earth: 3.46 Ga Panorama Formation, Western Australia // Palaeogeogr., palaeoclimatol., palaeoecol. 2018. V. 489. P. 230–248. DOI: 10.1016/j.palaeo.2017.10.013
- Retallack G.J., Noffke N.* Are there ancient soils in the 3.7 Ga Isua Greenstone Belt, Greenland? // Palaeogeogr., palaeoclimatol., palaeoecol. 2019. V. 514. P. 18–30. DOI: 10.1016/j.palaeo.2018.10.005
- Retallack G.J.* Soil salt and microbiome diversification over the past 3 700 million years // Palaeogeogr., palaeoclimatol., palaeoecol. 2022. V. 598. P. 111016. DOI: 10.1016/j.palaeo.2022.111016
- Retallack G.J., Jepson S., Broz A.* Petrogypsic paleosols on Mars // Icarus. 2023. V. 394. P. 1–5. DOI: 10.1016/j.icarus.2023.115436
- Rettberg P., Eschweiler U., Strauch K., Reitz G., Horneck G., Wanke H., Brack A., Barbier B.* Survival of microorganisms in space protected by meteorite material: results of the experiment 'EXOBILOGIE' of the PERSEUS mission // Adv. space res. 2002. V. 30. № 6. P. 1539–1545. DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00369-1
- Rivkina E., Shcherbakova V., Laurinavichius K., Petrovskaya L., Krivushin K., Kraev G., Pecheritsina S., Gilichinsky D.* Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in Permafrost // FEMS Microbiol. ecol. 2007 V. 61. P. 1–15. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2007.00315.x
- Rivkina E., Abramov A., Spirina E., Petrovskaya L., Shatilovich A., Shmakova L., Scherbakova V., Vishnivetskaya T.* Earth's perennially frozen environments as a model of cryogenic planet ecosystems // Permafrost and periglacial processes. 2018. V. 29 № 4. P. 246–56. DOI: 10.1002/ppp.1987
- Robertson B.E.* et al. Identification and properties of intense star-forming galaxies at redshifts $z > 10$ // Nature astronomy. 2023. V. 7. № 5. P. 611–621. DOI: 10.48550/arXiv.2212.04480
- Rodrigues D.F., Goris J., Vishnivetskaya T., Gilichinsky D., Thomashow M.F., Tiedje J.M.* Characterization of *Exiguobacterium* isolates from the Siberian permafrost. Description of *Exiguobacterium sibiricum* sp. nov. // Extremophiles. 2006. V. 10. P. 285–294. DOI: 10.1007/s00792-005-0497-5
- Rossignol-Strick M., Barghoorn E.S.* Extraterrestrial abiogenic organization of organic matter: The hollow spheres of the Orgueil meteorite // Space life sci. 1971. V. 3. P. 89–107. DOI: 10.1007/BF00927984
- Rozanov A.Yu.* Precambrian geobiology // Paleontol. j. 2006. V. 40. P. S434–S443. DOI: 10.1134/S003103106100030
- Rozanov A.Yu., Astafieva M.M.* A unique find of the earliest multicellular algae in the Lower Proterozoic (2.45 Ga) of the Kola Peninsula // Dokl. biol. sci. SP MAIK Nauka/Interperiodica. 2013. V. 449. P. 96–98. DOI: 10.1134/S0012496613020051
- Saar S.H., Brandenburg A.* Time Evolution of the Magnetic Activity Cycle Period. II. Results for an Expanded Stellar Sample // Astrophys. j. 1999. V. 524. № 1. P. 295–310. DOI: 10.1086/307794
- Saladino R., Carota E., Botta G., Kapralov M.I., Timoshenko G.N., Rozanov A.Yu., Krasavin E.A., Di Mauro E.* Meteorite-catalyzed syntheses of nucleosides and of other prebiotic compounds from formamide under proton irradiation // Proc. nat. acad. sci. 2015. V. 112. № 21. P. E2746–E2755. DOI: 10.1073/pnas.1422251112

- Saladino R., Bizzarri M., Botta L., Šponer J., Šponer J.E., Georgelin T., Jaber M., Rigaud B., Kapralov M.I., Timoshenko G.N., Rozanov A. Yu., Krasavin E.A., Timperio A.M., Di Mauro E. Proton irradiation: a key to the challenge of N-glycosidic bond formation in a prebiotic context // Scientific rep. 2017. V. 7. № 1. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41598-017-15392-8
- Schidlowski M. Paleobiological and Biogeochemical Vestiges of Early Terrestrial Biota: Baseline for Evaluation of Extraterrestrial Evidence // Perspectives in astrobiology. NATO sci. ser. I: Life and behavioural sci. / R.B. Hoover, R.R. Paepe, A.Yu. Rozanov (eds). IOS press. Amsterdam. 2005. V. 366. P. 146–169.
- Schmitt-Kopplin P., Gabelica Z., Gougeon R.D., Fekete A., Kanawati B., Harir M., Gebefuegi I., Eckel G., Hertkorn N. High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall // Proc. nat. acad. sci. 2010. V. 107. № 7. P. 2763–2768. DOI: 10.1073/pnas.0912157107
- Schoning K.U., Scholz P., Guntha S., Wu X., Krishnamurthy R., Eschenmoser A. Chemical etiology of nucleic acid structure: the α -thiofuranosyl-(3'→2') oligonucleotide system // Science. 2000. V. 290. № 5495. P. 1347–1351. DOI: 10.1126/science.284.5423.2118
- Schopf J.W., Barghoorn E.S., Maser M.D., Gordon R.O. Electron microscopy of fossil bacteria two billion years old // Science. 1965. V. 149. № 3690. P. 1365–1367. DOI: 10.1126/science.149.3690.136
- Schopf J.W. (ed.) Earth's earliest biosphere: its origin and evolution. Princeton univ. press. Princeton, New Jersey. 1983. 610 p. ISBN: 0978-0691083230
- Schulze-Makuch D., Grinspoon D.H., Abbas O., Irwin L.N., Bullock M.A. A sulfur-based survival strategy for putative phototrophic life in the Venesian atmosphere // Astrobiology. 2004. V. 4. № 1. P. 11–18.
- Sekanina Z. Dust jets, outbursts, and fragmentation of comets // Instruments, methods, and missions for astrobiology X. Proc. SPIE. 2007. V. 6694. P. 168–182. DOI: 10.1117/12.732612
- Sephton M.A. Organic Compounds in Carbonaceous Meteorites // Nat. product rep. 2002. V. 19. № 3. P. 292–311. DOI: 10.1039/B103775G
- Shcherbakova V.A., Chuvilskaya N.A., Rivkina E.M., Pecheritsyna S.A., Laurinavichius K.S., Suzi-na N.E., Osipov G.A., Lysenko A.M., Gilichinsky D.A., Akimenko V.K. Novel psychrophilic anaerobic spore-forming bacterium from the overcooled water brine in permafrost: description *Clostridium algoriphilum* sp. nov. // Extremophiles. 2005. V. 9. № 3. P. 239–246. DOI: 10.1007/s00792-005-0438-3
- Shcherbakova V.A., Rivkina E.M., Pecheritsyna S.A., Laurinavichius K.S., Suzina N.E., Gilichinsky D.A. *Methanobacterium arcticum* sp. nov., methanogenic archaeon from Holocene Arctic permafrost // Int. j. syst. evol. microbiol. 2011. V. 61. № 1. P. 144–147. DOI: 10.1099/ijs.0.021311-0
- Shcherbakova V.A., Chuvilskaya N.A., Rivkina E.M., Demidov N.E., Uchaeva V.S., Suetin S.V., Suzina N.E., Gilichinsky D.A. *Celerinatantimonas yamalensis* sp. nov., a cold-adapted diazotrophic bacterium from a cold permafrost brine // Int. j. syst. evol. microbiol. 2013. V. 63. № 12. P. 4421–4427. DOI: 10.1099/ijs.0.045997-0
- Sheldon N.D., Tabor N.J. Quantitative palaeoenvironmental and palaeoclimatic reconstruction using palaeosols // Earth sci. rev. 2009. V. 95. P. 1–52. DOI: 10.1016/j.earscirev.2009.03.004
- Sheldon R.B. Wet comet model: Rosetta redux // Instruments, methods, and missions for astrobiology XVII. Proc. SPIE. 2015. V. 9606. P. 304–313. DOI: 10.1117/12.2220075
- Sigurdson S., Richer H.B., Hansen B.M., Stairs I.H., Thorsett S.E. A Young White Dwarf Companion to Pulsar B1620-26: Evidence for Early Planet Formation // Science. 2003. V. 301. № 5630. P. 193–196. DOI: 10.1126/science.1086326
- Simakov M.B. Dinitrogen as a possible biomarker for exobiology: The case of Titan // Bioastronomy '99: A new era in Bioastronomy / G.A. Lemarchand, K.J. Meechs (eds). Sheridan Books. 2000. V. 213. P. 333–338.
- Simakov M.B. Asteroids and the origin of life – two steps of chemical evolution on the surface of these objects // Earth, planets and space. 2008. V. 60. № 1. P. 75–82. DOI: 10.1186/BF03352764

- Snytnikov V.N.* Astrocatalysis Hypothesis for Origin of Life Problem // Biosphere origin and evolution. Boston, MA: Springer US. 2008. P. 45–53. DOI: 10.1007/978-0-387-68656-1_3
- Soai K., Matsumoto A., Kawasaki T.* The Origin and Amplification of Chirality Leading to Biological Homochirality // Handbook of astrobiology / V.M. Kolb (ed.). CRC press. 2019. P. 341–354. ISBN: 9781315159966
- Staplin F.L.* Microfossils from the Orgueil meteorite // Micropaleontology. 1962. V. 8. № 3. P. 343–346.
- Sternfeld A.J.* La vie dans l'Univers // La Nature / Masson et Cie (eds). 1935. V. 2956. P. 1–12.
- Stevenson D.J., Halliday A.N.* The origin of the Moon // Philosoph. trans. roy. soc. A: Mathemat., phys. and engineer. sci. 2014. V. 372. № 2024. P. 20140289. DOI: 10.1098/rsta.2014.0289
- Stüeken E.E., Catling D.C., Buick R.* Contributions to late Archaean sulphur cycling by life on land // Nature geoscience. 2012. V. 5. № 10. P. 722–725. DOI: 10.1038/ngeo1585
- Stüeken E.E., Buick R., Schauer A.J.* Nitrogen isotope evidence for alkaline lakes on late Archean continents // Earth and planetary sci. let. 2015. V. 411. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.11.037
- Suetin S.V., Shcherbakova V.A., Chuvilskaya N.A., Rivkina E.M., Suzina N.E., Lysenko A.M., Gilichinsky D.A.* *Clostridium tagluense* sp. nov., a psychrotolerant, anaerobic, spore-forming bacterium from permafrost // Int. j. syst. evol. microbiol. 2009. V. 59. № 6. P. 1421–1426. DOI: 10.1099/ijs.0.002295-0
- Tabetah M.E., Melosh H.J.* Air penetration enhances fragmentation of entering meteoroids // Meteoritics & Planetary sci. 2018. V. 53. № 3. P. 493–504. DOI: 10.1111/maps.13034
- Tabor N.J., Myers T.S.* Paleosols as indicators of paleoenvironment and paleoclimate // Ann. rev. earth and planetary sci. 2015. V. 43. P. 333–361. DOI: 10.1146/annurev-earth-060614-105355
- Taher A.G.* Inland saline lakes of Wadi El Natrun depression, Egypt // Intern. j. Salt Lake res. / 1999. V. 8. P. 149–169. DOI: 10.1007/BF02442128
- Tan W.C., Van Landingham S.L.* Electron microscopy of biological-like structures in the Orgueil carbonaceous meteorite // Geophys. j. intern. 1967. V. 12. № 3. P. 237. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1967.tb03119.x
- Taylor M., Altobelli N., Buratti B.J., Choukroun M.* The Rosetta mission orbiter science overview: the comet phase // Philosoph. trans. roy. soc. A: Mathemat., phys. and engineer. sci. 2017. V. 375. № 2097. P. 1–20. DOI: 10.1098/rsta.2016.0262
- Tazaki K.* Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: an electron microscopical study // Clays and clay minerals. 1997. V. 45. № 2. P. 203–212. DOI: 10.1346/CCMN.1997.0450208
- Timofejev B.V.* Lebensspuren in Meteoriten: Resultate einer microphytologischen analyse // Grana. palynol. 1963. V. 4. № 1. P. 92–99. DOI: 10.1080/00173136309437862
- Tobie G., Lunine J. I., Sotin C.* Episodic outgassing as the origin of atmospheric methane on Titan // Nature. 2006. V. 440. № 7080. P. 61–64. DOI: 10.1038/nature04497
- Tuerk C., Gold L.* Systematic evolution of ligands by exponential enrichment // Science. 1990. V. 249. P. 505–510. DOI: 10.1126/science.2200121
- Valkovic V.* Origins of Life: Musings from Nuclear Physics, Astrophysics and Astrobiology. CRC press. 2021. 422 p. ISBN: 9781032010571
- Van Schmus W.R., Wood J.A.* A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites // Geochimica et cosmochimica acta. 1967. V. 31. № 5. P. 747–765. DOI: 10.1016/S0016-7037(67)80030-9
- Vance S.D.* Solar System Exploration: Icy Moons and Their Habitability // Handbook of astrobiology / V.M. Kolb (ed.). CRC press. 2019. P. 787–800. ISBN: 9781315159966
- Vishnivetskaya T.A., Almatari A.L., Spirina E.V., Wu X., Williams D.E., Pfiffner S.M., Rivkina E.M.* Insights into community of photosynthetic microorganisms from permafrost // FEMS Microbiol. ecol. 2020. V. 96. № 12. P. fiae229. DOI: 10.1093/femsec/fiae229
- Wacey D.* Early life on Earth: a practical guide. Dordrecht: Springer Netherlands. 2009. 274 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-9389-0_6
- Wahid A., Khan M.A.* Viruses, Bacteria and Thalloid Organisms. Islamabad. Textbook. Higher education commission. 2020. 160 p. ISBN: 969-417-085-0

- Wallis M.K., Wickramasinghe N.C. Interstellar transfer of planetary microbiota // Monthly not. roy. astronom. soc. 2004. V. 348. № 1. P. 52–61. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.07355.x
- Weisberg M.K., McCoy T.J., Krot A.N. Systematics and evaluation of meteorite classification // Meteorites and the early solar system II. 2006. V. 19. P. 19–52.
- Weiss M.C., Sousa F.L., Mrnjas N., Nelson-Sathi S., Martin W.F. The physiology and habitat of the last universal common ancestor // Nature microbiol. 2016. V. 1. № 9. P. 1–8. DOI: 10.1038/nmicrobiol.2016.116
- Weissman P., Morbidelli A., Davidsson B., Blum J. Origin and evolution of cometary nuclei // Space sci. rev. 2020. V. 216. № 1. P. 1–40. DOI: 10.1007/s11214-019-0625-7
- Wellman C.H., Strother P.K. The terrestrial biota prior to the origin of land plants (embryophytes): a review of the evidence // Palaeontology. 2015. V. 58. № 4. P. 601–627. DOI: 10.1111/pala.12172
- Wellman C.H., Cascales-Miñana B., Servais T. Terrestrialization in the Ordovician // Geol. soc. London, spec. publ. 2023. V. 532. № 1. P. 171–190. DOI: 10.1144/SP532-2022-92
- Wickramasinghe N.C., Wickramasinghe J., Napier W. Comets and the Origin of Life // World scientific. 2009. 220 p. DOI: 10.1142/6008
- Wickramasinghe N.C. Viva panspermia! // arXiv preprint arXiv:1101.4295. 2011. 5 p. DOI: 10.48550/arXiv.1101.4295
- Whipple F.L. A comet model. I. The acceleration of comet Encke // Astrophysical j. 1950. V. 111. P. 375–394. DOI: 10.1086/145272
- Whipple F.L. A comet model. II. Physical relations for comets and meteors // Astrophysical j. 1950. V. 111. P. 375–394. DOI: 10.1086/145416
- Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites // Meteoritics. 1993. V. 28. № 3. P. 460. Bibcode: 1993Metic..28Q.460W
- Woese C. The universal ancestor // Proc. nat. acad. sci. 1998. V. 95. № 12. P. 6854–6859. DOI: 10.1073/pnas.95.12.6854
- Xiang M., Rix H.W. A time-resolved picture of our Milky Way's early formation history // Nature. 2022. V. 603. № 7902. P. 599–603. DOI: 10.1038/s41586-022-04496-5
- Yashina S., Gubin S., Maksimovich S., Yashina A., Gakhova E., Gilichinsky D. Regeneration of whole fertile plants from 30,000-y-old fruit tissue buried in Siberian permafrost // PNAS. 2012. V. 109. № 10. P. 4008–4013. DOI: 10.1073/pnas.1118386109
- Zhang Z., Bowler B.P., Trent D.J., Brandt T.D., Brandt G.M., Cochran W.D., Endl M., MacQueen P.J., Kratter K.M., Isaacson H.T., Franson K., Kraus A.L., Caroline V.M., Zhou Y. The McDonald Accelerating Star Survey (MASS): Architecture of the Ancient Five-Planet Host System // Astronom. j. 2022. V. 165. № 2. P. 1–21. DOI: 10.48550/arXiv.2210.07252
- Малые тела Солнечной системы: [Электронный ресурс] // Проект «Исследование Солнечной системы». URL: <https://galspace.spb.ru/index382.html> (Дата обращения 25.10.2023)
- Метеориты [Электронный ресурс] // Большая российская энциклопедия. URL: <https://bigenc.ru/c/meteority-4f7c31> (Дата обращения 08.03.2024)
- Общая стратиграфическая (геохронологическая) шкала: [Электронный ресурс] // ТГУ. URL: https://geo.tsu.ru/content/news/section.php?ELEMENT_ID=2649 (Дата обращения 28.09.2023)
- The 'Allende' meteorite, a carbonaceous chondrite: [Электронный ресурс] // Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. URL: <https://www.dlr.de/en/images/2020/1/the-allende-meteorite-a-carbonaceous-chondrite> (Дата обращения: 03.10.2024)
- Catalogue of Exoplanets: [Электронный ресурс] // Exoplanet team. URL: <https://exoplanet.eu/catalog> (Дата обращения 20.03.2024)
- Cassini Spacecraft Reveals Evidence of Tholin Formation at High Altitudes in Titan's Atmosphere: [Электронный ресурс] // NASA. URL: <https://science.nasa.gov/missions/cassini/cassini-spacecraft-reveals-evidence-of-tholin-formation-at-high-altitudes-in-titans-atmosphere> (Дата обращения: 12.03.2024)

-
- Chapter 14: Comets and Small Bodies of the Outer Solar System: [Электронный ресурс] // Eric H. Christiansen and Braxton Spilker. URL: <https://explanet.info/Chapter14.htm> (Дата обращения 25.10.2023)
- Classification systems: [Электронный ресурс] // Encyclopædia Britannica, Inc. URL: <https://www.britannica.com/science/meteorite/Alteration-processes> (Дата обращения 27.11.2023)
- Evidence for ancient river on Mars in new rover images: [Электронный ресурс] // EarthSky Communications, Inc. URL: <https://earthsky.org/space/river-on-mars-perseverance-rover> (Дата обращения 22.03.2024)
- Exploring the Birth of Stars: [Электронный ресурс] // NASA. URL: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-highlights/exploring-the-birth-of-stars> (Дата обращения 22.03.2024)
- Geysers of Enceladus: [Электронный ресурс] // NASA's Jet Propulsion Laboratory. URL: <https://gps.nasa.gov/resources/50/geysers-of-enceladus> (Дата обращения 22.03.2024)
- Habitable exoplanets catalogue: [Электронный ресурс] // PHL Arcicibo. URL: <https://phl.upr.edu/hwc> (Дата обращения 16.05.2024)
- Meteorites and their properties: [Электронный ресурс] // The Lunar and Planetary Institute. URL: https://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/meteorites/origin.html (Дата обращения 24.10.2023)
- Meteoritical bulletin database: [Электронный ресурс] // The Meteoritical Society. International Society for Meteoritics and Planetary Science. URL: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> (Дата обращения 13.11.2023)
- Meteorite Science: [Электронный ресурс] // UK Polar Meteorite Exploration and Research. URL: <https://ukantarcticmeteorites.wordpress.com/meteorite-classification> (Дата обращения 12.03.2024)
- Molecules in Space: [Электронный ресурс] // The Cologne Database for Molecular Spectroscopy CDMS. URL: <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules> (Дата обращения 14.11.2023)
- Reddish Bands on Europa: [Электронный ресурс] // NASA. URL: <https://science.nasa.gov/resource/reddish-bands-on-europa> (Дата обращения 22.03.2024)
- Titan Images: [Электронный ресурс] // NASA. URL: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/titan_images.html (Дата обращения 22.03.2024)

Коллектив авторов

Алексеев Андрей Олегович

Член-корреспондент РАН

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
г. Пушкино, Московская обл., 142290 Россия***Алексеева Татьяна Викторовна**

Доктор геолого-минералогических наук

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
г. Пушкино, Московская обл., 142290 Россия***Афанасьева Анастасия Николаевна***Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.,
141980 Россия***Гувер Ричард Брайс**

Почетный профессор РАН

*Космический и ракетный центр Соединенных Штатов, г. Хантсвилл,
Алабама, 35805 США**Центр космических полетов им. Дж. Маршалла, Хантсвилл, Алабама, США***Капралов Михаил Игоревич***Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия**Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Московская обл., 11980
Россия***Ривкина Елизавета Михайловна**

Кандидат биологических наук

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
г. Пушкино, Московская обл., 142290 Россия***Рюмин Антон Константинович***Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.,
141980 Россия***Самылина Ольга Сергеевна**

Кандидат биологических наук

*Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии
РАН, г. Москва, 117312 Россия**Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, 117647
Россия***Симаков Михаил Борисович**

Кандидат химических наук

Научный совет РАН по астробиологии, г. Москва, 199991 Россия

Снытников Валерий Николаевич

Кандидат физико-математических наук

*Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск, 630090 Россия*

Фронтасьева Марина Владимировна

Кандидат физико-математических наук

*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.,
141980 Россия*

Цельмович Владимир Анатольевич

Кандидат физико-математических наук

*Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, д. 142, п. Борок, Ярославская обл., 152742 Россия*

Сапрыкин Егор Алексеевич

*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.,
141980 Россия*

Розанов Алексей Юрьевич

Академик РАН

*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, 141980 Россия
Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, 117647
Россия
Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Московская обл., 11980
Россия*

Научное издание

Алексеев А. О., Алексеева Т. В., Афанасьева А. Н. и др.

АСТРОБИОЛОГИЯ

Под редакцией А. Ю. Розанова, Е. А. Сапрыкина

Макет М. К. Емельяновой

Подписано в печать 30.10.2024

Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Печать цифровая

Усл. печ. л. 9,75. Уч.-изд. л. 7,9. Тираж 500 экз. Заказ № 60966

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/

