3-я Всероссийская конференция по астробиологии

«ЭКЗОБИОЛОГИЯ: ОТ ПРОШЛОГО К БУДУЩЕМУ»

5 - 9 октября, 2020 г.
Пущино, Россия

ISBN 978-5-6045305-0-4

УДК 523; 524; 551.2/. 3; 52.5, 551.8.02 , 551.12 , 579; 579.65; 629.7; 656.7

«Экзобиология: от прошлого к будущему»:
3-я Всероссийская конференция по Астробиологии (Пущино, 5–9 октября 2020 года).
Программа и сборник тезисов.

Основные направления работы конференции:

- Юная Земля и ее обитатели: свидетели жизни былых эпох (палеонтологические, палеобиологические, геологические летописи и иные аспекты; возможные модели появления жизни на Земле);
- Абиогенный синтез биоорганических соединений и предбиологическая эволюция (изучение предбиологического синтеза органических соединений в космосе и на ранней Земле; астрокатализ – как источник первичного органического вещества);
- Экстремальные экосистемы – модель для экзобиологических исследований (изучение криосферы Земли как модели возможных экосистем на планетах криогенного типа; экзобиология ледяных спутников планет-гигантов: возможность биологических и предбиологических циклов в условиях отсутствия солнечного света и низких температур; исследование экстремальных термофильных и психрофильных микроорганизмов):
  - Микробные сообщества экстремальных экосистем (горячие, кислые и щелочные экосистемы);
  - Криобиосфера Земли и перспективы поиска жизни на планетах и телах криогенного типа;
- Определение пределов и механизмов выживаемости земных организмов в экстремальных условиях окружающей среды и космоса (изучение устойчивости биологических систем к условиям космоса; результаты экспериментов на низких Земных орбитах);
- Внеземные местообитания: моделирование и прямые исследования (исследование Луны, Марса, комет, метеоритов, межзвездной и межпланетной пыли и других тел Солнечной системы).

Научный комитет:

Председатель программного комитета: А.Ю. Розанов (академик РАН),

Зам. председателя: А.О. Алексеев (чл.- корр. РАН)

Председатель Оргкомитета конференции: Е.М. Ривкина (вед.н.с., к.г.-м.н.)

Оргкомитет:

Е.В. Спирина (секретарь конференции), А.А. Абрамов, С.А. Малявин, С.М. Чудинова, О.Г. Занина, А.В. Шатилович.

3-я Всероссийская конференция по астробиологии

«ЭКЗОБИОЛОГИЯ: ОТ ПРОШЛОГО К БУДУЩЕМУ»

5 - 9 октября, 2020 г.
Пущино, Россия

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
Программа конференции		**7**
Тезисы конференции		**15**
Пленарная сессия		**17**
Секция 1:	Юная Земля и ее обитатели: свидетели жизни былых эпох (палеонтологические, палеобиологические, геологические летописи и иные аспекты; возможные модели появления жизни на Земле)	**33**
Секция 2:	Абиогенный синтез биоорганических соединений и предбиологическая Эволюция (изучение предбиологического синтеза органических соединений в космосе и на ранней Земле; астрокатализ – как источник первичного органического вещества)	**44**
Секция 3.1:	Микробные сообщества экстремальных экосистем (горячие, кислые и щелочные экосистемы)	**53**
Секция 3.2:	Криобиосфера Земли и перспективы поиска жизни на планетах и телах криогенного типа	**66**
Секция 4:	Определение пределов и механизмов выживаемости земных организмов в экстремальных условиях окружающей среды и космоса (изучение устойчивости биологических систем к условиям космоса; результаты экспериментов на низких Земных орбитах)	**821**
Секция 5:	Внеземные местообитания: моделирование и прямые исследования (исследование Луны, Марса, комет, метеоритов, межзвездной и межпланетной пыли и других тел Солнечной системы)	**121**
Постерная сессия		**126**
Алфавитный указатель		**148**

ПРОГРАММА

3-ей Всероссийской конференции по астробиологии

«ЭКЗОБИОЛОГИЯ: ОТ ПРОШЛОГО К БУДУЩЕМУ»

5 - 9 октября, 2020 г.
Пущино, Россия

5 октября (понедельник)

9:00 – 9:30	**Приветственное слово**	
	Председатель Научного совета РАН по астробиологии, Академик РАН	**А.Ю. Розанов**
	Директор Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, чл.-корр. РАН	**О.А. Алексеев**
	Зам. Председателя Организационного комитета конференции, зав. лабораторией криологии почв ИФХиБПП РАН	**Е.М. Ривкина**
Пленарная сессия **Руководитель:** *Е.М.Ривкина (ИФХиБПП РАН, Пущино)*		
9:30 – 10:10	**А.Ю. Розанов** (*ПИН РАН, Москва*)	Астробиология и бактериальная палеонтология
10:10 – 10:50	**М.И. Панасюк** (*НИИЯФ МГУ, Москва*)	Актуальные проблемы радиационных рисков при планировании космических миссий
10:50 – 11.30	**В.А. Твердислов** *(МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)*	Молекулярная машина как универсальная физическая основа живых систем
11.30 – 12.10	**С.Э. Шноль** (*ИТЭБ РАН, Пущино*)	Форма «оптимально–малых» гистограмм как показатель метрики пространства-времени
12:10 – 14:00	**Перерыв**	
Секция 1	Юная Земля и ее обитатели: свидетели жизни былых эпох (палеонтологические, палеобиологические, геологические летописи и иные аспекты; возможные модели появления жизни на Земле)	
14:00 – 14:15	**В.Н. Обридко** *(ИЗМИРАН, Троицк)*	Раннее солнце и развитие биосферы: гипотезы и ограничения
14:15 – 14.30	**Е.Г. Храмова** *(ИЗМИРАН, Троицк)*	Парадокс слабого Солнца, или почему деревья зеленые

14:30 – 14:45	**М.М. Астафьева** (*ПИН РАН, Москва*)	О древнейших микроорганизмах Земли
14:45 – 15:00	**Перерыв**	
Секция 2	Абиогенный синтез биоорганических соединений и предбиологическая эволюция (изучение предбиологического синтеза органических соединений в космосе и на ранней Земле; астрокатализ – как источник первичного органического вещества)	
15:00 – 15:15	**А.А. Иванов** *(ГЕОХИ РАН, Москва)*	Движущие силы абиогенеза
15:15 – 15:30	**Е.А. Сапрыкин** *(ОИЯИ, Дубна)*	Хронология формирования молекул на ранних этапах существования Вселенной
15:30 – 15:45	**Н.Э. Скобликов** *(ФГБНУ КНЦЗВ, ООО «СЛ МедикалГруп», Краснодар)*	Поточно-каскадная модель предбиологической эволюции
15:45 – 16:00	**В.В. Суслов** *(ИЦиГ СО РАН, Новосибирск)*	Закон гомологических рядов Вавилова как закон биологии

6 октября (вторник)

Секция 4	Определение пределов и механизмов выживаемости земных организмов в экстремальных условиях окружающей среды и космоса (изучение устойчивости биологических систем к условиям космоса; результаты экспериментов на низких Земных орбитах)	
Руководитель: *Анастасия Шатилович (ИФХиБПП РАН, Пущино)*		
10:00 – 10:15	**И.Б. Алчинова** *(ГНЦ ФМБЦ им.А.И.Бурназяна ФМБА России, Москва)*	Исследование фрагментации ДНК под действием тяжелых ионов и протонов
10:15 – 10:30	**Е.И. Сухова** *(МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)*	Устойчивость бактериофага DT57C к облучению ускоренными электронами в условиях низкого давления и низких температур
10:30 – 10:45	**А.А. Буряк** *(ГНЦ РФ ИМБП РАН, Москва)*	Проблема повышенной радиации и гипомагнитных условий при

		культивировании высших растений во внеземных условиях
10:45 – 11:00	**А.В. Шатилович** *(ИФХиБПП РАН, Пущино)*	Адаптивные реакции современных и древних инфузорий *Colpoda steinii* в условиях орбитального полета
11:00 – 11:15	**И.Е. Вишняков** *(ИНЦ РАН, Санкт-Петербург)*	"Минимальная" клетка в космосе
11:15 – 11:30	**Е.А. Дешевая** *(ГНЦ РФ-ИМБП РАН, Москва)*	Выживаемость микроорганизмов на внешней стороне МКС
11:30 – 11:45	**Перерыв**	
11: 45 – 12:00	**К.Е. Клементьев** *(МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)*	Влияние высокоэнергетических частиц на первичные процессы преобразования энергии в фотосинтетическом аппарате цианобактерий
12:00 – 12:15	**М.О. Крючкова** *(ИБФМ РАН, Пущино; МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)*	Сообщества почвообитающих грибов как объект астробиологических исследований
12:15 – 12:30	**В.И. Ошуркова** *(ИБФМ РАН, Пущино)*	Влияние факторов околоземного космического пространства на выживаемость метаногенных архей
12:30 – 12:45	**М.В. Рагульская** *(ИЗМИРАН, Троицк)*	Особенности пандемии COVID-19 в условиях глобального минимума солнечной активности
12:45 – 13:00	**А.Е. Прощина** *(ФГБНУ НИИМЧ, Москва)*	Размножение и развитие позвоночных животных в космических полетах: проблемы, результаты, возможности.
13:00 – 14:30	**Перерыв**	
Секция 5	Внеземные местообитания: моделирование и прямые исследования (исследование Луны, Марса, комет, метеоритов, межзвездной и межпланетной пыли и других тел Солнечной системы)	
Руководитель: *Станислав Малявин (ИФХиБПП РАН, Пущино)*		
14:30 – 14:45	**А.К. Рюмин** *(ОИЯИ, Дубна)*	Разнообразие ископаемых микроорганизмов в углистых хондритах

14:45 – 15:00	**О.Р. Коцюрбенко** *(ЮГУ, Ханты-Мансийск)*	Экзобиология венерианских облаков: возможные микробные процессы и микроорганизмы
Круглый стол **Руководитель: О.Р. Коцюрбенко** *(ЮГУ, Ханты-Мансийск)*		
15:00 – 17:00	**Вопросы:** **1. Астробиология Венеры: перспективные направления для исследования** Облачный слой Венеры рассматривается как возможная среда для функционирования микробных форм. В свете планируемой Россией космической программы Venera-D и недавнего открытия фосфина в атмосфере Венеры планируется обсуждение теоретических и методологических аспектов, связанных с поиском жизни в системе венерианских облаков. **2. Перспективы астробиологии в России на примере ее развития в Европе.** За последние годы астробиология в Европе сделала существенный качественный скачек в своем развитии. Активно функционирует Европейская астробиологическая ассоциация (EANA), открылся европейский астробиологический институт (EAI). Проблемы астробиологии в России предполагается рассмотреть на примере их решения в Европе, а также обсудить национальные особенности астробиологических направлений в России.	

7 октября (среда)

Секция 3. Экстремальные экосистемы – модель для экзобиологических исследований (изучение криосферы Земли как модели возможных экосистем на планетах криогенного типа; экзобиология ледяных спутников планет-гигантов: возможность биологических и предбиологических циклов в условиях отсутствия солнечного света и низких температур; исследование экстремальных термофильных и психрофильных микроорганизмов)		
Секция 3.1	Микробные сообщества экстремальных экосистем (горячие, кислые и щелочные экосистемы)	
Руководитель: *Елизавета Ривкина (ИФХиБПП РАН, Пущино)*		
10:00 - 10:15	**В.Н. Компаниченко** *(ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан)*	Роль периодического стресса в зарождении и ранней эволюции сообществ термофильных микроорганизмов
10:15 – 10:30	**А.В. Шилова** *(ИЭГМ УрО РАН, Пермь)*	Биоразнообразие прокариотов содового шламохранилища – модели экстремально щелочной среды
10:30 - 10:45	**Т.А. Алехова** *(МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)*	История Микробиома в искусственной нише Международной космической станции (20 лет)

10:45 – 11:00	**В.Э. Трубицын** *(ИБФМ РАН, Пущино)*	Водородпотребляющие метаногены – потенциальные обитатели объектов Солнечной системы
11:00 – 11:15	**Перерыв**	
Секция 3.2	Криобиосфера Земли и перспективы поиска жизни на планетах и телах криогенного типа	
Руководитель: *Елена Спирина (ИФХиБПП РАН, Пущино)*		
11:15 – 11:30	**Д.А. Сидоров** *(ФНЦБ ДВО РАН, Владивосток)*	Что скрывает Гренландия?
11:30 - 11:45	**С.А. Булат** *(НИЦ "Курчатовский институт" - ПИЯФ, Гатчина)*	Доминантные микробные сообщества в подледниковом антарктическом озере Восток
11:45 – 12:00	**М.Б. Симаков** *(Санкт-Петербург)*	Экзобиология ледяных спутников планет-гигантов
12:00 – 12:15	**А.Г. Захарюк** *(ИБФМ РАН, Пущино)*	Микроорганизмы, способные к восстановлению железа в холодной экосистеме озера Байкал
12:15 – 12:30	**А.В. Якушев** *(МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)*	Гиполитные микробные сообщества почв и почвоподобных тел оазисов Восточной Антарктиды
12:30 – 14:00	**Перерыв**	
14:00 – 14:15	**С.А. Малявин** *(ИФХиБПП РАН, Пущино)*	Гипобиоз одноклеточных эукариот: механизмы и специфика в контексте астробиологических исследований
14:15 – 14:30	**Т.А. Вишнивецкая** *(ИФХиБПП РАН, Пущино)*	Зеленые и сине-зеленные водоросли из вечной мерзлоты
14:30 – 16:30	**ПОСТЕРНАЯ СЕССИЯ**	
Секция 1	**Сергеев В.Н.,** Печерникова Г.В. (ИДГ РАН, Москва) Критическое замедление и вымирание динозавров	
Секция 2	**Суслов В.В.,** Пономаренко М. П. (ИЦиГ СО РАН, Новосибирск) Гомологические ряды в неживом и живом	

Секция 4	**Чепцов В.С.,** Белов А.А., Воробьева Е.А., Павлов А.К., Ломасов В.Н. (МГУ им. М.В. Ломоносова, ИКИ РАН, Москва; ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПбПУ, Санкт-Петербург) Влияние предоблучения, интенсивности излучения и типа минеральной матрицы на радиорезистентность микроорганизмов
	Белов А.А., Чепцов В.С. (МГУ им. М.В. Ломоносова, ИКИ РАН, Москва) Метаболическая активность микробных сообществ в условиях дефицита влаги
Секция 5	**Печерникова Г.В.,** Сергеев В.Н. (ИДГ РАН, Москва) Венера – возможность существования жизни в ее истории
	Афанасьева А.Н. (ОИЯИ, Дубна) Актиномицеты в метеорите Оргей
	Гарипов Г.К., **Панасюк М.И.**, Конюхов И.В., Погосян С.И., Рубин А.Б., Андреев Д.Е. (НИИЯФ МГУ, НИИ ФХБ им. Н. Белозерского, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва) Поиск внеземных микроорганизмов на космических объектах и изучение динамики выживания земных микроорганизмов в космических условиях по сигналам флюоресценции
	Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Конюхов И.В., Погосян С.И., Рубин А.Б., Андреев Д.Е. (НИИЯФ МГУ, НИИ ФХБ им. Н.Белозерского, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва) Автоматическая биологическая лаборатория микроспутников для изучения микроорганизмов в космических условиях по флуоресцентному излучению

16:30 – 17:30	**Подведение итогов работы** 3-ей Всероссийской конференции по астробиологии «Экзобиология: от прошлого к будущему»
	Закрытие конференции

ТЕЗИСЫ

3-ей Всероссийской конференции по астробиологии

«ЭКЗОБИОЛОГИЯ: ОТ ПРОШЛОГО К БУДУЩЕМУ»

Пущино, Россия
5-9 октября 2020 г.

АСТРОБИОЛОГИЯ И БАКТЕРИАЛЬНАЯ ПАЛЕОНТОЛОГИЯ

Розанов А.Ю.

ПИН РАН, Москва, Россия

Бурное развитие работ по бактериальной палеонтологии существенно повлияло на изменение наших представлений о реальных геобиологических событиях в докембрии. Начнем с того, что в породах возраста 2 млрд. лет уже обнаружены целентераподобные и губкоподобные (многоклеточные) организмы (рис. 1-3). В связи с распространением концепции катастрофической оксигенизации атмосферы около 2,5 млрд. лет тому назад следует обратить внимание на то, что аргументы, приведенные в защиту этой концепции, не выдерживают критики. Ранее я уже писал об интерпретации зерен уранинита и неокисленного пирита (рис. 4-5), а также о явном недоразумении с возрастным диапазоном в распределении джаспилитов. Обсуждая факты из более древних отложений, напомню, что Шидловский (Perspectives in Astrobiology) (рис. 6, 7, 8) в 2005 году опубликовал данные по изотопии углерода, которые наводят на мысль, что в породах с возрастом 3,7 млрд. лет (Иссуа, Гренландия) уже находились водоросли заведомо эвкариотной природы. Очень интересным оказалось и то, что в корах выветривания в архее обнаруживается группа фоссилизированных организмов, что ставит под сомнение мысли о выходе жизни из моря на сушу (рис. 9). Эти данные были столь неожиданными, что большинство исследователей либо их не замечали, либо делали вид, что их нет. Упорными работами последних лет М.М. Астафьева показала, что в архее присутствовали как прокариоты (рис. 10), так и ядерные организмы (эвкариоты) (рис. 11, 12, 13). Все сказанное выше не оставляет сомнения в двух вещах: 1) катастрофический оксигенез атмосферы, который прописан во всех учебниках, не имел место быть, и 2) в древнейших достоверных осадочных породах Земли обнаруживаются эвкариоты, и отсюда напрашивается вопрос: а где же обитали организмы до-эвкариотного уровня? Серьезных данных об условиях на Земле между 4,5 и 4 млрд. лет очень мало, но более-менее ясно одно – то, что, по крайней мере, в первой половине этого времени поверхность Земли была сильно разогрета, но на эту поверхность прибывало достаточно внушительное количество ледяных комет, таяние которых могло создавать временные эфимерные образования, в которых, не исключено, что могла приживаться какая-либо жизнь. Однако, знания, которыми мы располагаем, могут быть интерпретированы и несколько иначе, что во время главной большой

кометной бомбардировки Земли в районе 4,0 млрд. лет прилетали на Землю, как первые поселенцы, уже протисты и эвкариоты. В согласии с такими представлениями могут быть результаты изучения ископаемых остатков в углистых хондритах (рис. 14-21). Сегодня в печати находится работа, в которой описаны десятки различных фоссильных организмов в метеорите Оргей. Само по себе наличие различных ископаемых организмов в углистых хондритах говорит о том, что жизнь была и на других телах планетного типа. После чего нельзя исключить, что в момент образования Солнечной системы образовывались такие субстанции, как мир РНК, протогеном, или прогеном, и т.д. Более того, следует задуматься над тем, что основная масса химических элементов Периодической системы Менделеева тоже образовывалась где-то в начале формирования Солнечной системы, а в период между Большим взрывом и формированием планет Солнечной системы работала только автокомбинаторика небольшого количества биофильных элементов (H, O, C, N и др.) (рис. 22).

Рис. 1. Удокания

Рис. 2. Губкоподобный организм

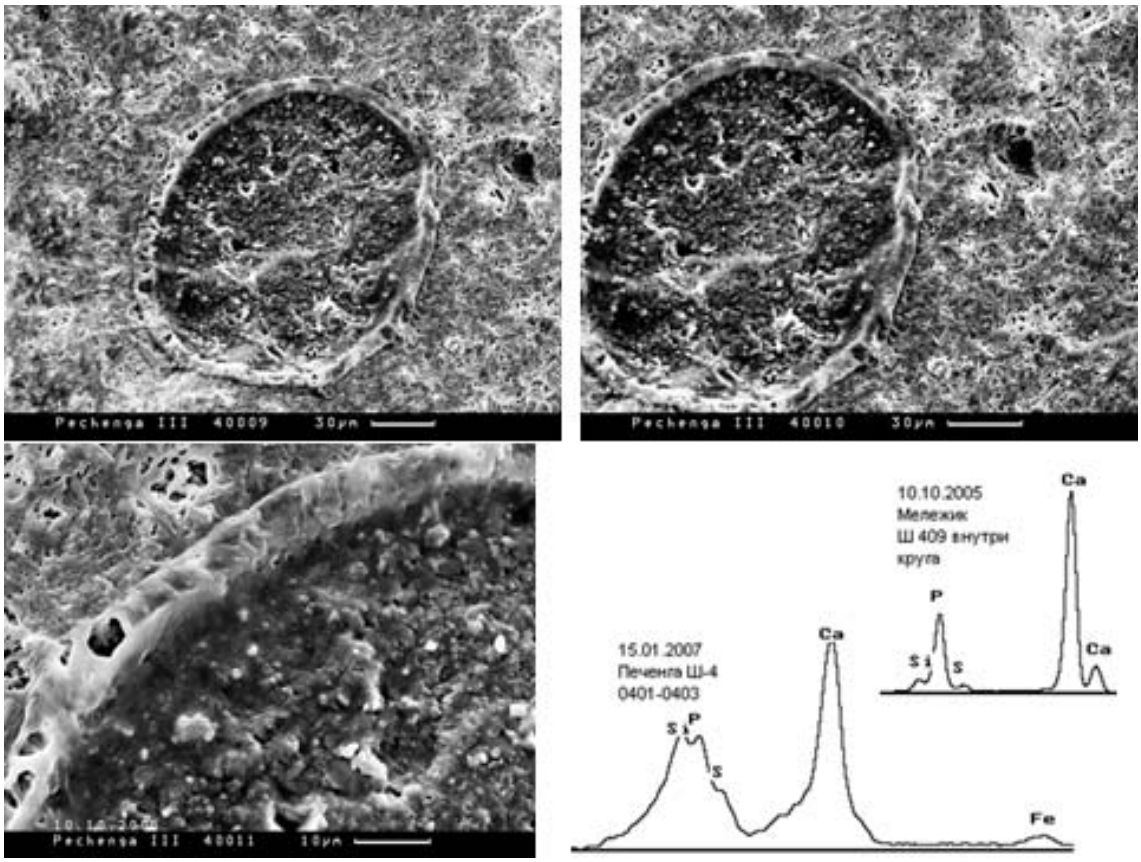


Рис. 3. Pechengia

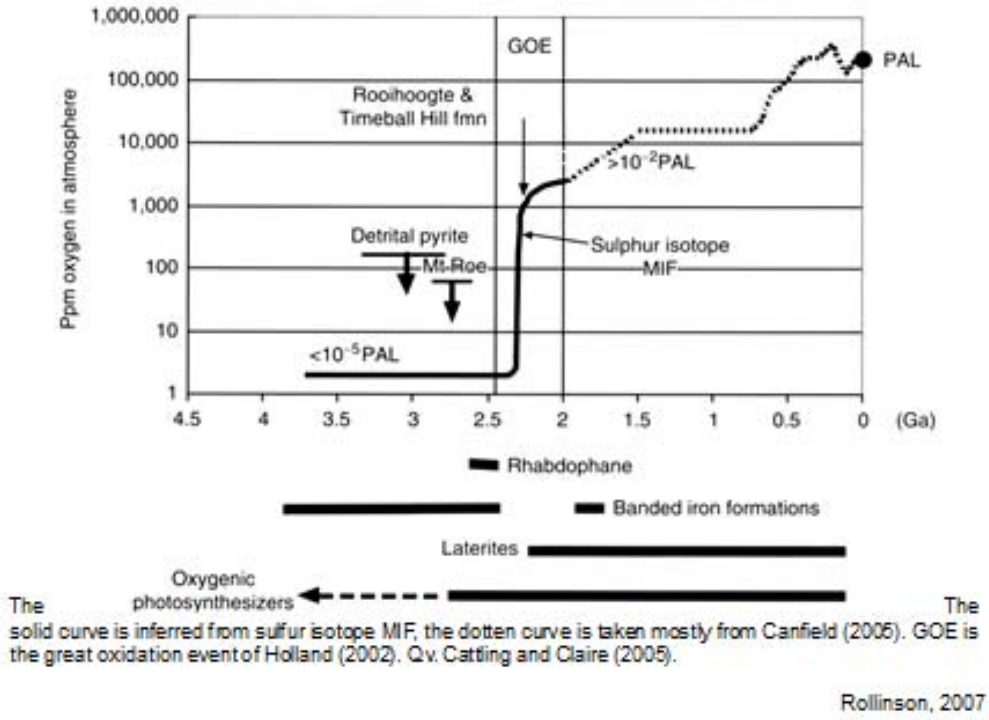


Рис. 4

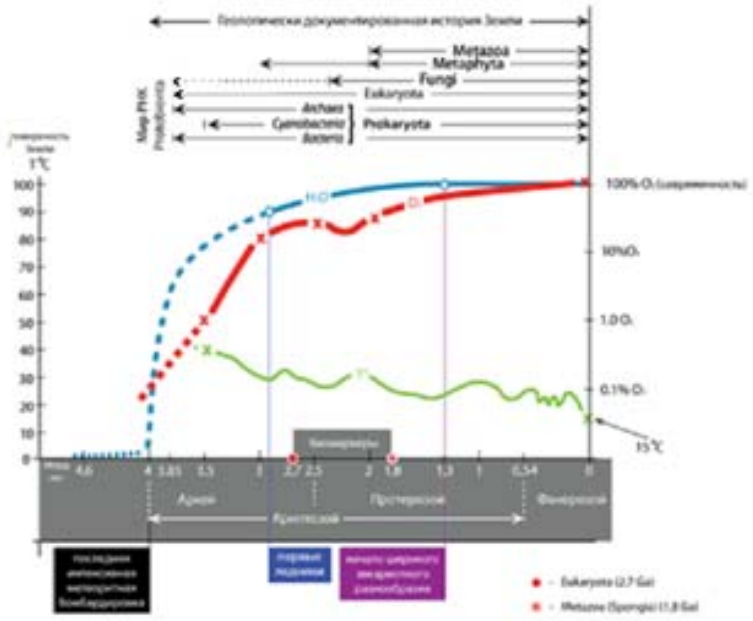
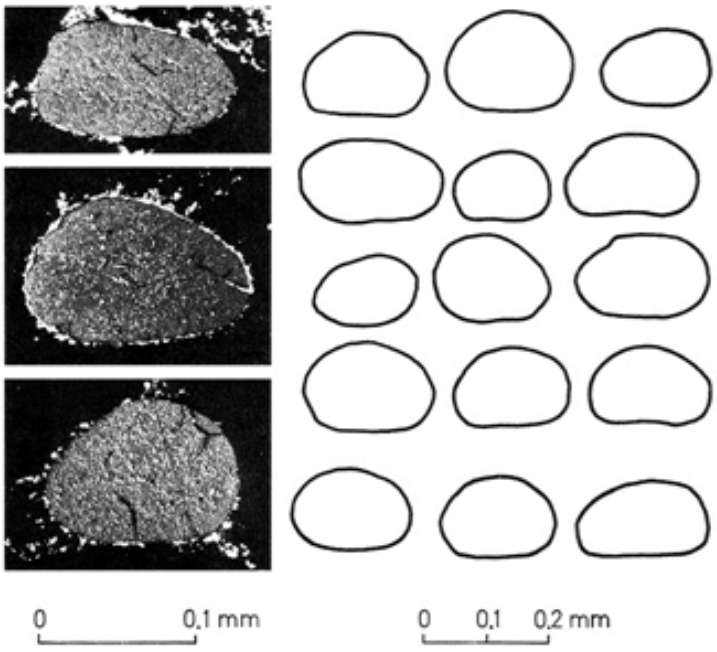
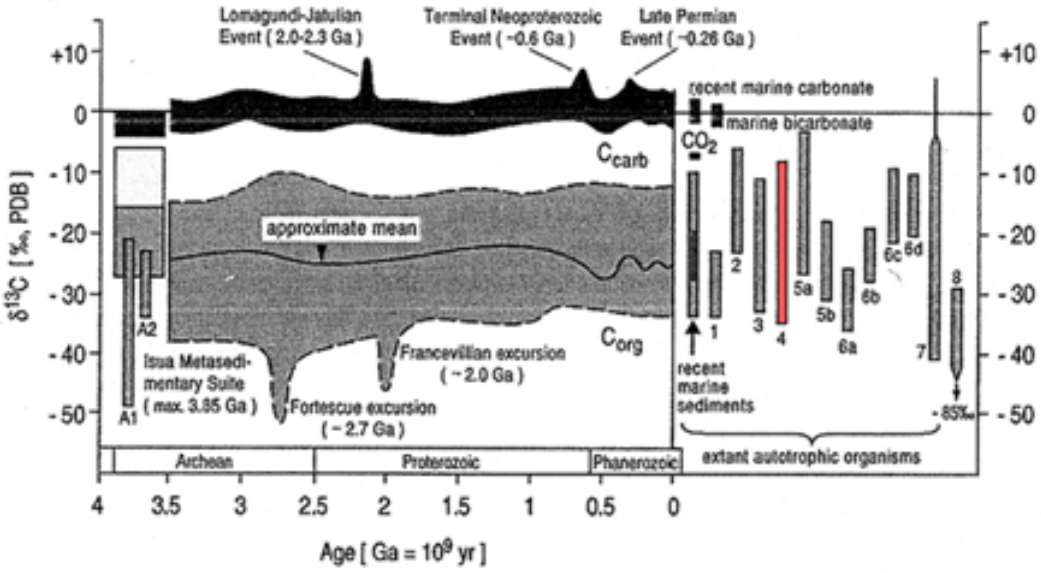


Рис. 5. Интегральная картина некоторых гео-биологических событий в докембрии (Розанов, 2009)



Left: Detrital grains of uraninite from the Basal Reef, Loraine Gold Mines, Ltd., Orange Free State, South Africa. The grains are dusted with myriads of tiny inclusions of galena (PbS) showing up as white specks; part of the galena has been "sweated out" and forms delicate PbS-aureoles on the grain surface. *Right:* Outlines of detrital monazite grains from a West Australian beach placer. Note the resemblance in shape between abrasion forms of uraninite on the left and these detrital "muffin-shaped" monazite grains.

Рис. 6. Форма и размеры уранинитовых образований (Schopf, 1983)



Isotope age functions of organic carbon (C_{org}) and carbonate carbon (C_{carb}) as compared with the isotopic compositions of their progenitor substances in the present environment (marine bicarbonate and biogenic matter of various parentage, cf. Right box).

Contributors to the contemporary biomass are (1) C3 plants, (2) C4 plants, (3) CAM plants, (4) cukaryotic algae, (5a,b) natural and cultured cyanobacteria, (6) groups of photosynthetic bacteria other than cyanobacteria, (7) methanogenic bacteria, (8) methanotrophic bacteria. The $\delta^{13}C_{org}$ range in recent marine sediments [45] is based on some 1600 data points (black insert covers >90% of the data base).

Рис. 7

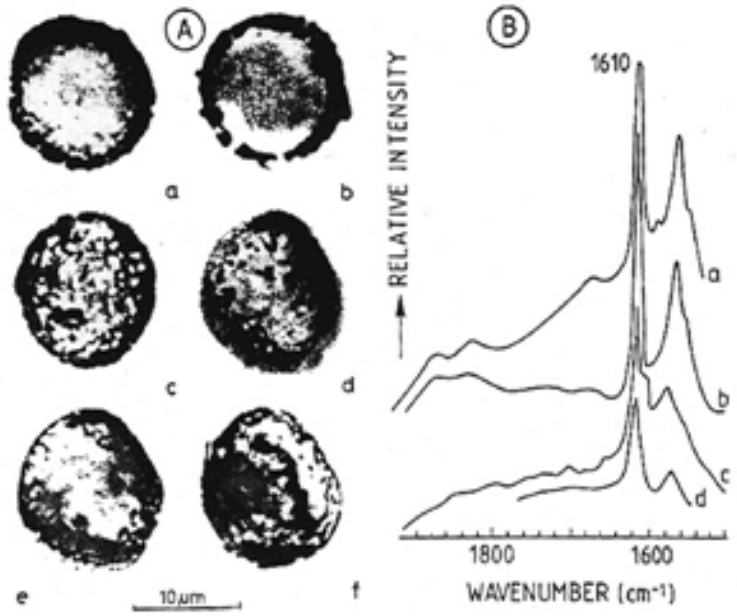
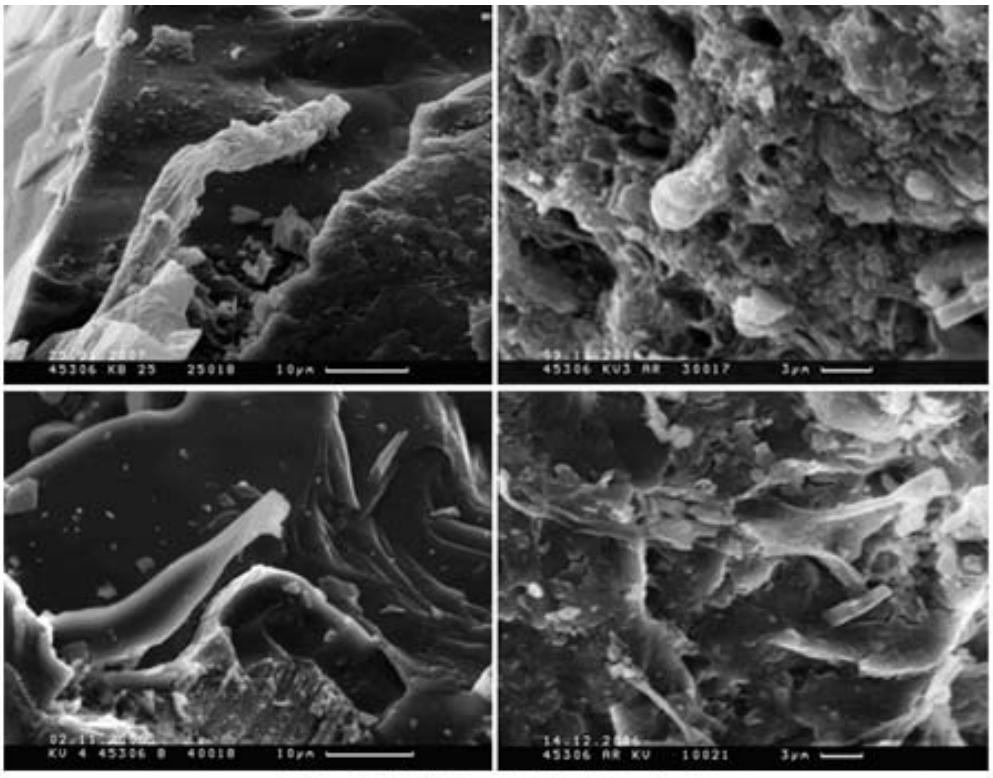


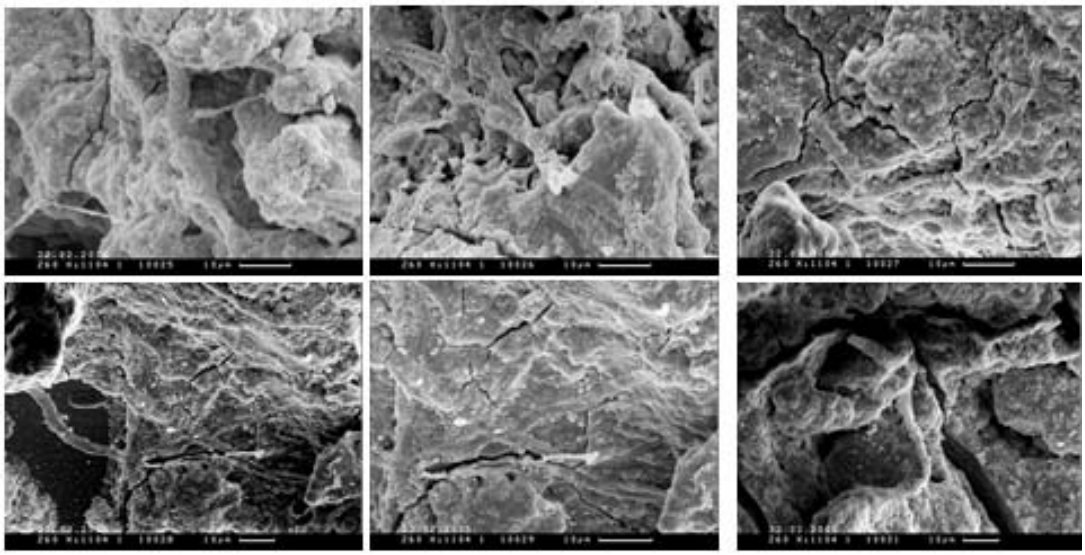
Fig. 23.3 A: Comparison of *Huroniospora* sp. from the ~2.0 Ga-old Gunflint iron formation, Ontario (a-c) with *Isuasphaera* sp. from the ~3.8 Ga-old Isua metasedimentary suite, West Greenland (d-f). The optically distinctive marginal rim may be explained as a relic of the original cell wall. B: Laser Raman spectra obtained from *Huroniospora* sp. as an isolated particle (a) and in thin sections (b) compared to those from *Isuasphaera* sp. (c, d) obtained under the same conditions. The close resemblance of the spectra suggests similarities in the composition of the residual organic component of the two types of microstructures. The prominent peak close to 1610 cm^{-1} is indicative of aromatic double bonds among the carbon atoms of the molecular structure (adapted from [44]).

Рис. 8



Paleosolls, 2.4 GA, Paanajarvi lake (Northern Karelia)

Рис. 9.

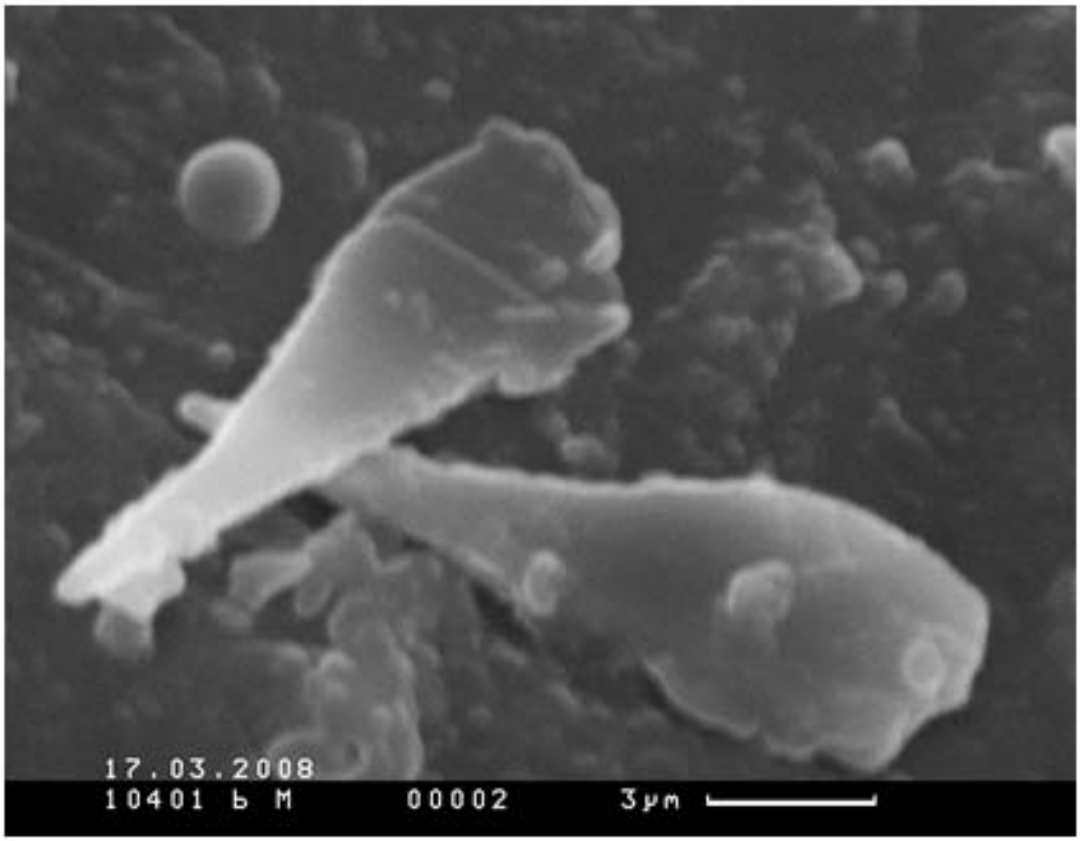


SEM, AR, 2.9 GA, KARELIA

Рис. 10. Астафьева, 2006

2.8 млрд лет; Воронье.

Рис. 11



2.8 млрд лет; Воронье.

Рис. 12

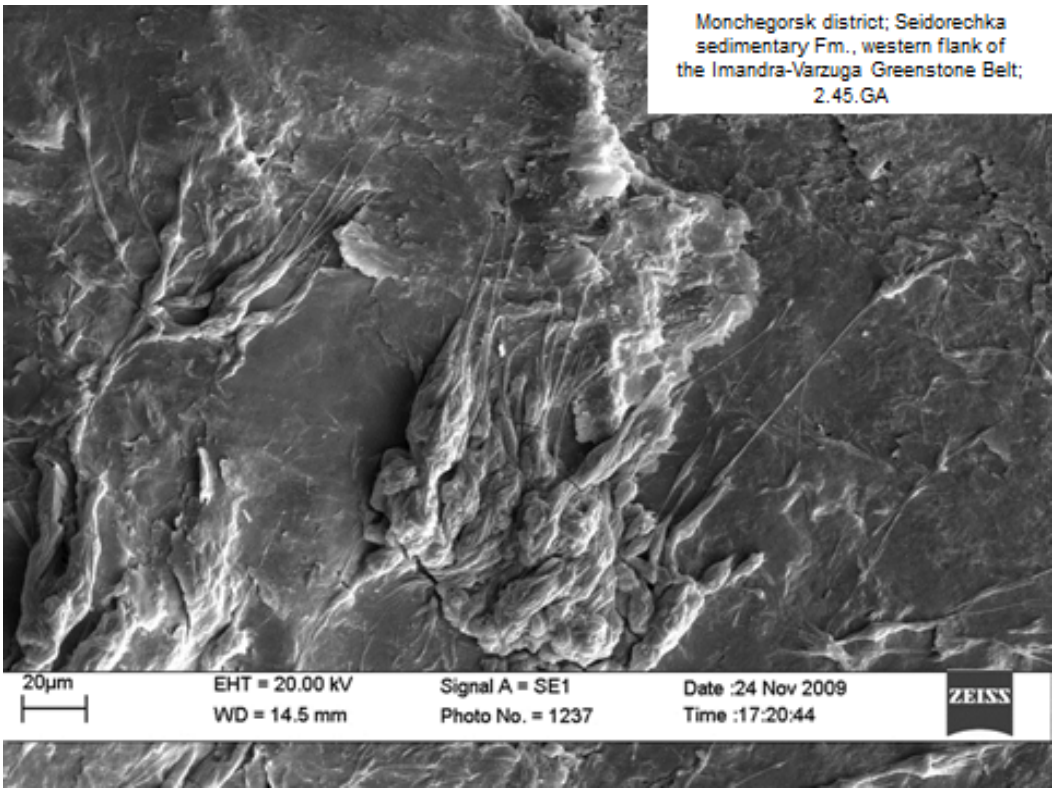


Рис. 13

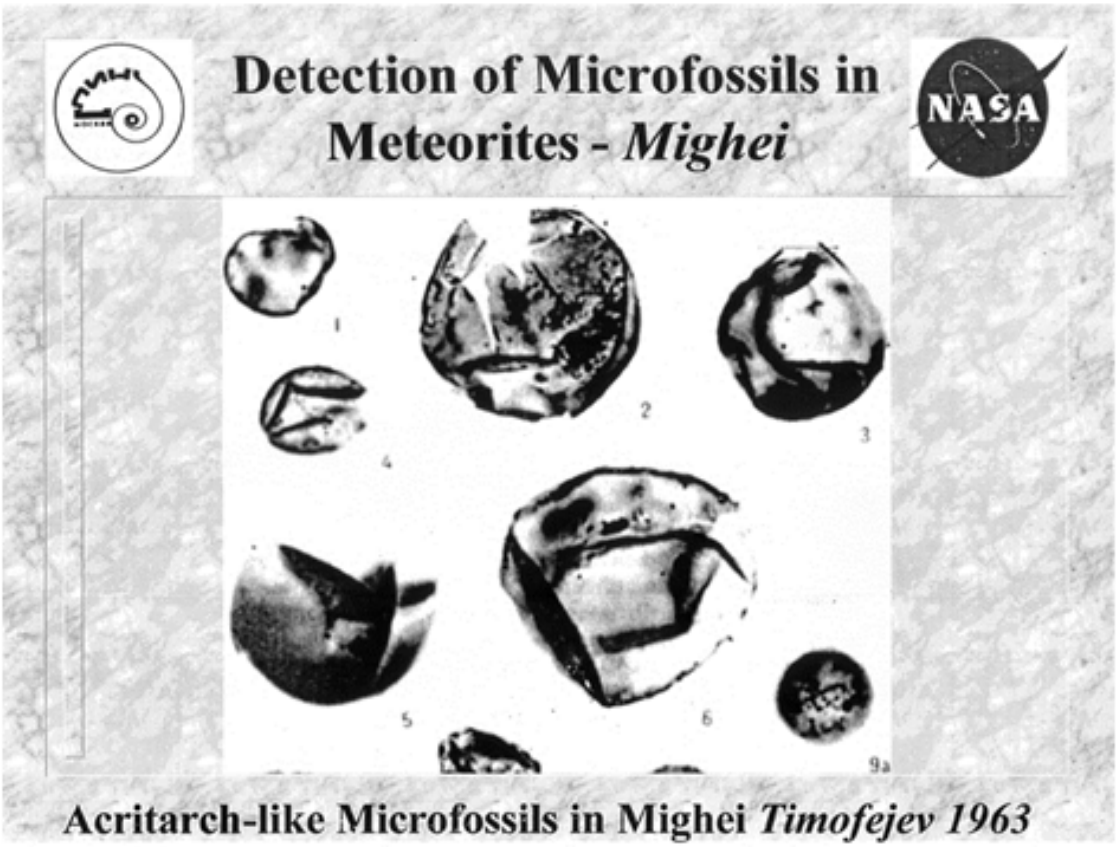


Рис. 14

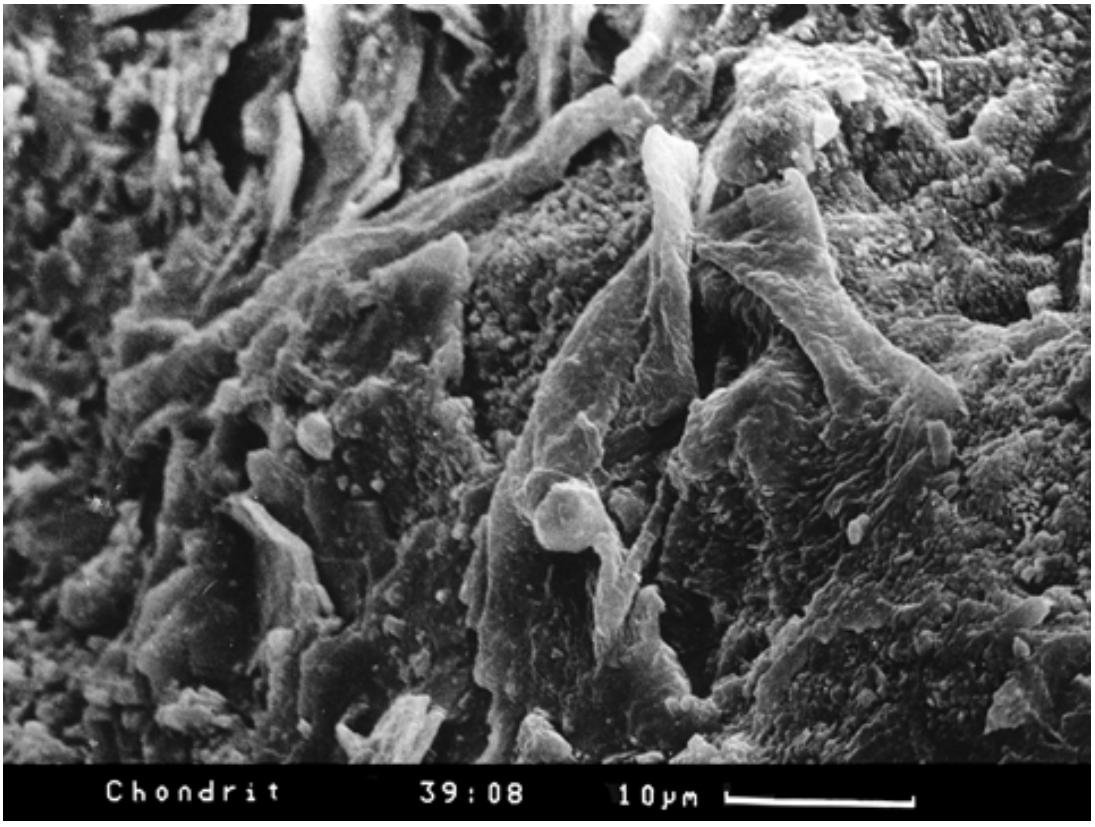


Рис. 15. Хондрит

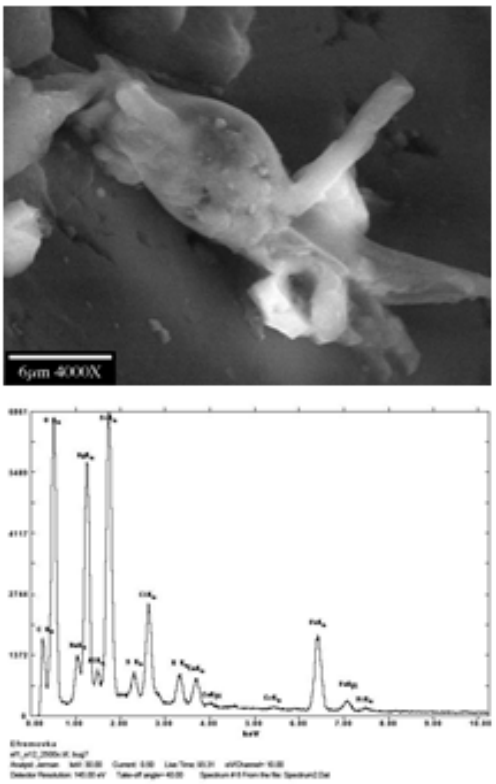


Рис. 16. Метеорит Ефремовка

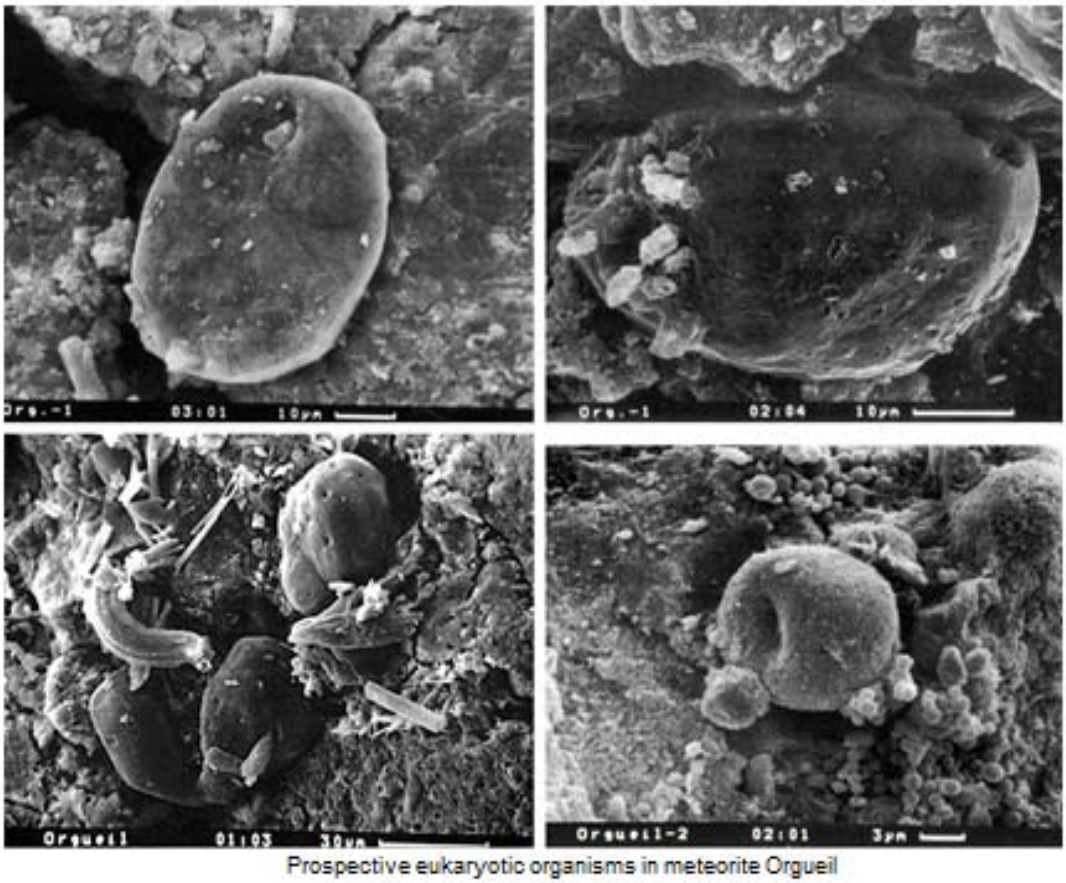


Рис. 17. Альвеолята, Tasmanites

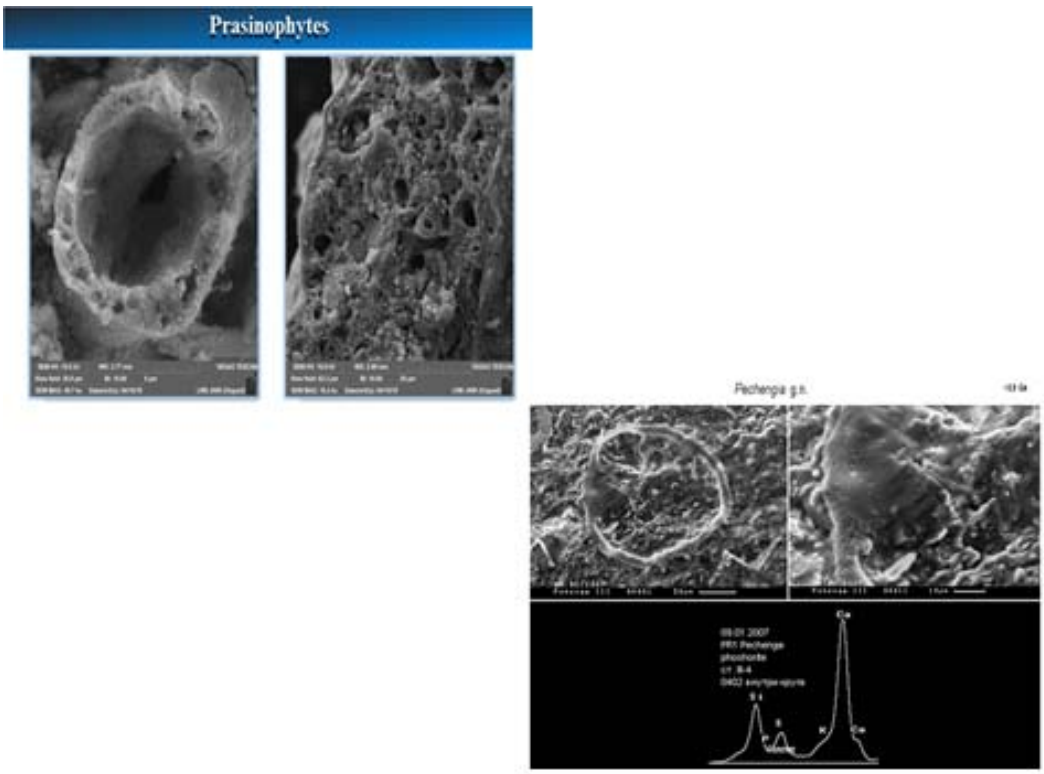


Рис. 18

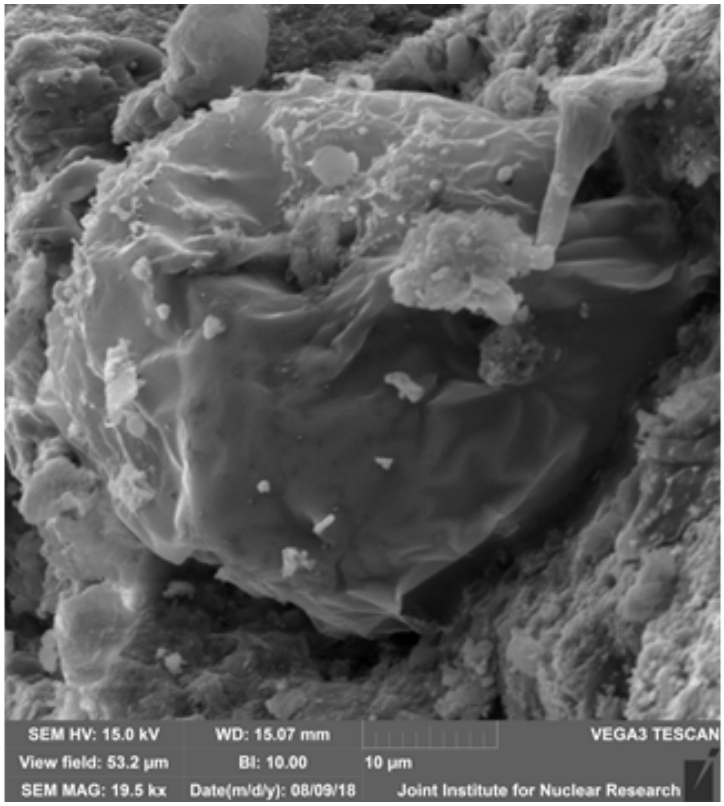


Рис. 19. Акритарха

Рис. 20

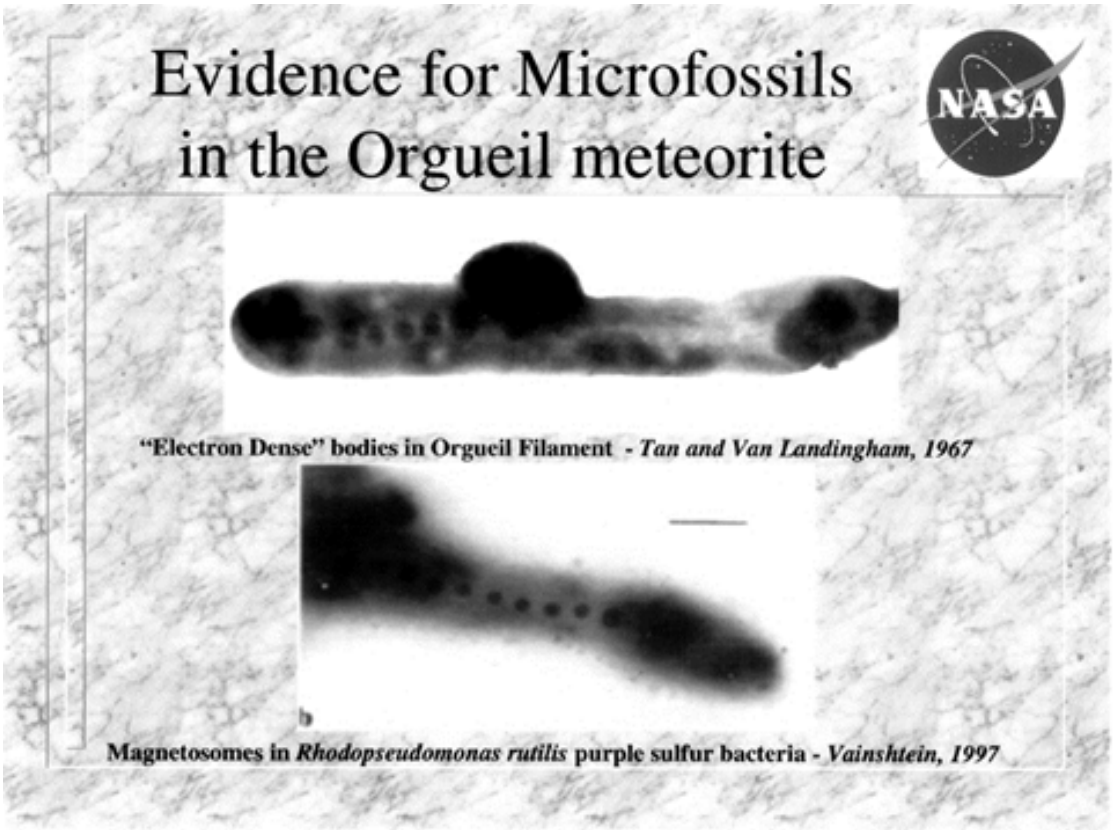
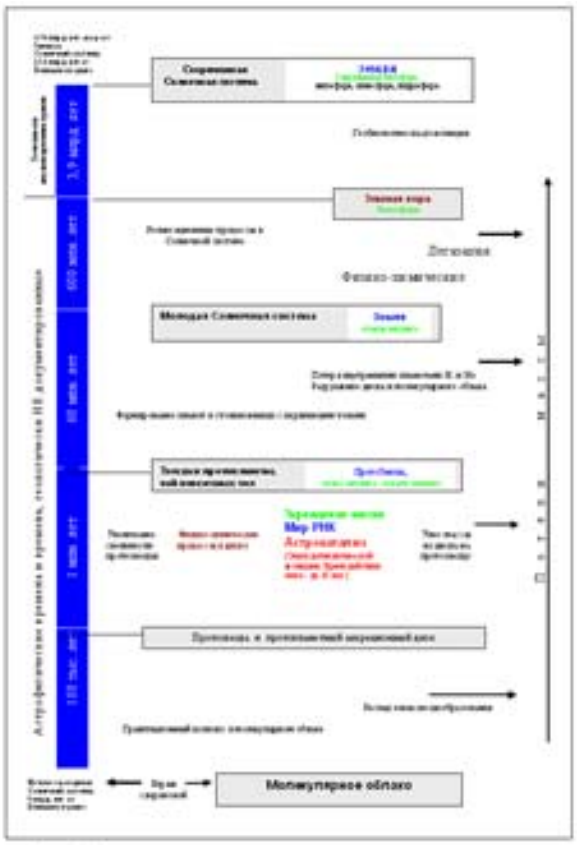


Рис. 21. Домены магнетита в нитях их метеорита Оргей (Tan, VanLandingham, 1967)



Астрофизическая и палеонтологическая шкала времени. Ключевые этапы происхождения земной биосферы. (по В.Н. Снытникову)

Рис. 22

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

Панасюк М.И.[1,2]

[1]*НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[2]*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Радиация - одно из самых опасных явлений в космическом пространстве, природа, которой обусловлена существованием заряженных частиц различного происхождения. Радиация не только создает проблемы для "живучести" самих космических аппаратов, но и для биообъектов в космосе. На низких, околоземных орбитах, опасность создает радиация, в основном, двух типов. Это - космические лучи - заряженные частицы огромных энергий, попадающие в окрестности нашей планеты из межзвездного пространства, а также - частицы, захваченные в магнитное поле Земли - радиационные пояса. Последние как раз и представляют наибольшую опасность для низкоорбитальных космических аппаратов. Радиационные пояса Земли, хотя они и расположены на больших высотах, но в районе Южной Атлантики "провисают" над

поверхностью Земли из-за аномальной структуры магнитного поля. В этой области оно ослаблено по сравнению с другими областями. Поэтому, например, Международная космическая станция, летающая на высоте 350 - 400 км, попадает эту опасную радиационную зону. Здесь дозы радиации значительно выше, чем вне ее, но для кратковременных полетов они не представляют существенной опасности. Однако на низких орбитах существует другая по своей природе радиационная опасность - это высокоэнергичные заряженные частицы - протоны и ядра более тяжелых элементов, захваченные в магнитное поле Земли, а также космические лучи. Их энергии достигают громадных значений и внешняя оболочка любого космического аппарата для них - не преграда. Именно эти частицы и создают проблемы для биобъектов и электроники в условиях долговременных околоземных миссий. Аналогичная проблема возникает и при планировании межпланетных перелетов и создании инфраструктуры для пребывания человека на поверхности Луны и Марса. Потоки космических лучей, солнечного и галактического происхождения, среди которых есть и тяжелые частицы, могут вызвать ряд явлений в биологических структурах на клеточном уровне, в том числе и необратимые. Обсуждается проблема возникновения когнитивных изменений у высших млекопитающих при воздействии тяжелой компоненты космической радиации. Как снизить радиационный риск при планировании космических миссий? Следует признать, что это - актуальная проблема, далекая от завершения. Основные трудности заключается в том, что мы пока не знаем все стороны процессов, происходящих внутри такого сложного объектов, каким является биоструктуры и современная электроника высокой степени интеграции, а также создании прогностических моделей космической радиации.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ МАШИНА КАК УНИВЕРСАЛЬНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА ЖИВЫХ СИСТЕМ

Твердислов В.А.

МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Важнейшим физическим признаком Жизни на Земле являются молекулярные машины, преобразующие энергию, вещество и информацию. Машиной можно назвать устройство (конструкцию), которое способно в циклическом режиме преобразовывать форму энергии, кинетически разделяя диссипацию и «полезную» работу, благодаря наличию в ней «выделенных», в частности, механических или квантовомеханических

степеней свободы. В неживой природе машин не существует, поскольку в ней нет понятия «пользы».

Эволюционно отобранная (макро)молекулярная машина принципиально должна быть достаточно большой и иерархически выстроенной, чтобы в ней могли формироваться «макроскопические» внутримолекулярные структуры-конструкции, формирующие «выделенные механические степени свободы» с характерными детерминированными типами движений, поступательными, колебательными, вращательными. Циклически работающая биологическая машина – хиральный объект с определенной направленностью обхождения цикла.

Макромолекулы-машины, будучи линейными полимерами, построены на основе гомохиральных мономеров: белки - из левых аминокислот, нуклеиновые кислоты – на основе правых сахаров рибозы и дезоксирибозы. Отмечено, что важнейшие структуры этих макромолекул-машин построены по единому принципу «этажерки», в которой чередуется знак хиральности («правость» и «левость») мономеров в нижних первичных структурах и выше - спиралей и суперспиралей. Выявлена системная молекулярно-биологическая закономерность: начиная с уровня асимметричного углерода в дезоксирибозе и аминокислотах, прослежена тенденция чередования знака хиральности внутримолекулярных структурных уровней D-L-D-L для ДНК и L-D-L-D для белков. Частным случаем хиральности выступает спиральность.

Знакопеременная хиральная иерархичность сопряженных уровней макромолекулярных структур в белках и нуклеиновых кислотах имеет общебиологическую значимость: обуславливает их дискретность, служит инструментом фолдинга, структурной основой «выделенных механических» степеней свободы в конструкциях макромолекулярных машин. Динамическая хиральность машины основана на отмеченных структурных особенностях биомакромолекул-машин.

Общий смысл развиваемой гипотезы, касающейся общего физического принципа работы молекулярных машин, состоит в том, что иерархически построенная хиральная машина есть инструмент нарушения симметрии для преобразования формы энергии, вещества и информации с целью выполнения той самой «полезной работы». А каждое преобразование энергии базируется на смене симметрий. Это утверждение можно рассматривать как следствие известных фундаментальных теорем Эмми Нётер о том, что законы сохранения в природе всегда сопряжены с отдельными типами симметрии.

Развивается точка зрения, согласно которой молекулярные машины могут быть универсальной физической основой самых разнообразных форм жизни во Вселенной при условии широкой вариабельности химического инструментария.

Список литературы

Твердислов В. А., Малышко Е. В. О закономерностях спонтанного формирования структурных иерархий в хиральных системах неживой и живой природы // УФН. - 2019. - Т. 189. - Вып. 4. - С. 375-385.

ФОРМА «ОПТИМАЛЬНО–МАЛЫХ» ГИСТОГРАММ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ МЕТРИКИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Шноль С.Э.[1,2]

[1]ИТЭБ РАН, Пущино, Московская обл., Россия
[2]МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Мы показали, что: «Неуничтожимый разброс результатов» любых измерений, является следствием Изменений метрики (масштаба) пространства-времени в результате движения Земли и других небесных тел в неоднородном анизотропном и гетерогенном пространстве-времени. Это показано в опытах на протяжении тысяч опытов 1960 – 2020 г.г. при измерениях процессов разной природы – (радиоактивного распада - альфа, бета, гамма, К-захвата, генерации источников света, химических и биологических реакций, механического движения)при измерениях на всех континентах Земли, в Арктике, в Антарктике, на Северном Полюсе, в наземных лабораториях, на самолетах и космическом полете спутника «Чибис», на кораблях в Тихом, Индийском, Атлантическом, Северном Ледовитом океанах. Изменения метрики пространства-времени синхронно проявляются в сходстве форм гистограмм, построенных по «оптимально малым» чисел измерений, независимо от природы измеряемых процессов, синхронно по местному времени - могут быть «навигационными сигналами в космических и подводных путешествиях, когда экранированы электромагнитные поля.

Соответствующие «Символы-простанства-времени» могут образовывать «навигационные таблицы».

Список литература

Шноль С.Э. Космофизические факторы в случайных процессах. 2009. Стокгольм.

Шноль С.Э., Кондрашова М.Н., Шольц Х.Ф. О многофазной зависимости АТФ=азной активности актомиозина и миозина от различных воздействий» // Вопр. Мед. Химии. 1957. Т. 3. № 5, с. 54-64

РАННЕЕ СОЛНЦЕ И РАЗВИТИЕ БИОСФЕРЫ: ГИПОТЕЗЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Обридко В.Н., Рагульская М.В., Храмова Е.Г.

ИЗМИРАН, Москва, Россия

Фактор воздействия излучения молодого Солнца и галактических космических лучей на физические условия на ранней Земле является существенно недооцененным при изучении проблемы возникновения и эволюции биосферы. В докладе обсуждается динамика солнечных и галактических факторов за 4,56 млд лет существования Солнечной системы, оказавшая существенное влияние на формирование адаптационных технологий древних и современных живых систем. Рассмотрены особенности развития биосферы ранней Земли в условиях более тусклого, но более вспышечно-активного молодого Солнца. Обсуждается парадокс слабого молодого Солнца и парадокс несоответствия спектра поглощения хлорофилла спектру солнечного излучения, а также пути их решения. Подчеркивается роль учета радиационной безопасности при рассмотрении моделей ранней биосферы Земли и гипотетических биосфер спутников планет-гигантов и экзопланет.

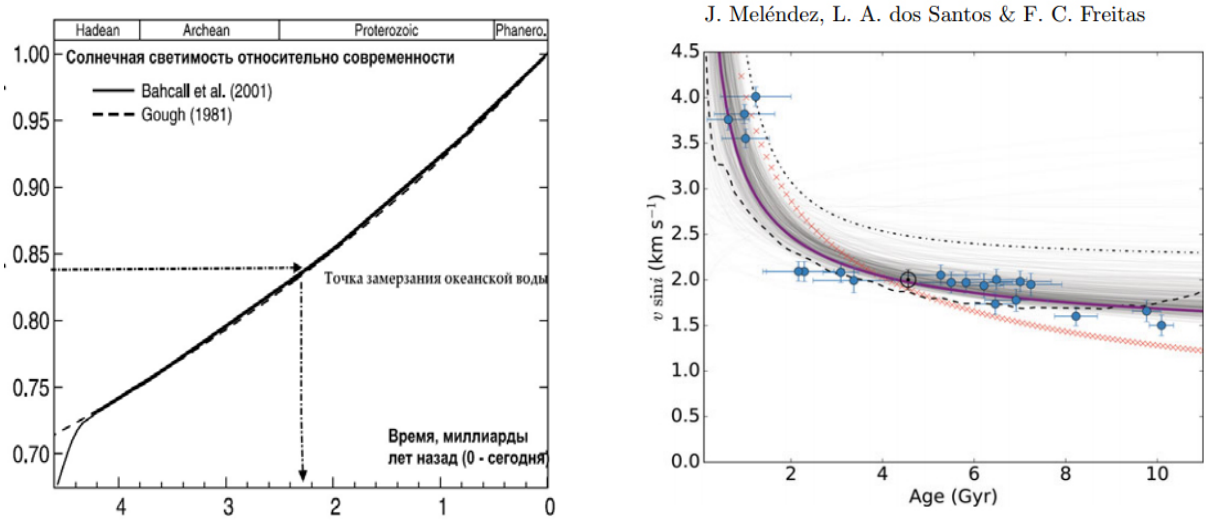


Рисунок 1. Изменение светимости Солнца по стандартной модели (слева. Справа - Прогнозируемые скорости вращения солнцеподобных звезд в зависимости от возраста. Наилучшее соответствие (сплошная линия) и закон Скуманича (красные символы) показаны. Из (Melendez et al., 2016)

Солнце является основным источником энергии для биосферы. Перерабатываемая живыми организмами энергия Солнца почти в 30 раз превышает энергию тектонических и вулканических процессов. И практически равна всей тепловой энергии, поступающей из недр Земли. В процессе своего возникновения и развития биосфера постоянно находилась под воздействием солнечного излучения и космофизических факторов. Эти факторы оказывали существенное влияние на физические условия на ранней Земле, состав атмосферы и химический состав океанов, температуру поверхности.

Раннее Солнце резко отличается от сегодняшнего (Manuel Güdel, 2007). Оно было более тусклым, но при этом - значительно более активным. Молодое Солнце имело период вращения – 6-8 дней, масса до 103%, активность – нестабильная и нерегулярная. Как показали наблюдения за солнцеподобными звездами, скорость вращения молодого Солнца вокруг оси в первые 1,5 - 2 млрд. лет стремительно падала от 5-8 дней до современных 25-28 дней, одновременно с потерей массы звезды. Эволюционная адаптация первых живых систем происходила в условиях пониженной светимости и повышенной радиационной опасности молодого Солнца и галактических космических лучей. Согласно стандартной модели, светимость молодого Солнца составляла 0,7 от современного уровня (Рисунок 1). Но при этом вспышечная активность и интенсивность солнечного излучения была на два-три порядка выше современной, особенно в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне (Рисунок 2).

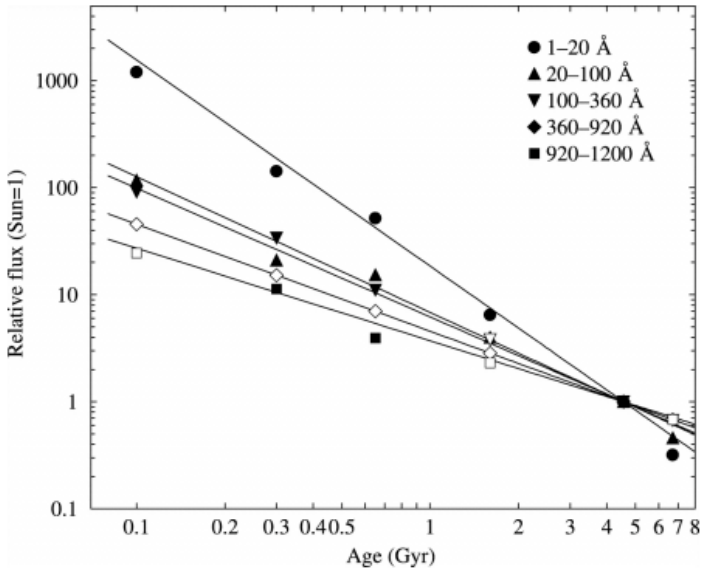


Рисунок 2. Солнечное излучение различных диапазонов в зависимости от возраста звезды (на основе наблюдения за солнцеподобными звездами). Из (Ribas et al, 2005).

Из наблюдений за солнцеподобными звездами можно предположить, что частота вспышек могла быть в 20 раз, а длительность событий в 500 раз больше современных значений. Это оценка относится и к потоку мощного коротковолнового

рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Молодое Солнце обеспечивало на несколько порядков более интенсивный солнечный ветер и поток солнечных космических лучей, усиленно бомбардировавших поверхность Земли и первые биологические системы. Интенсивность галактических космических лучей могла почти на порядок меняться при прохождении Солнечной системой рукавов Галактики или облаков более плотного галактического газа.

Формировавшиеся живые системы должны были не только противостоять, но и использовать космогеофизические факторы в своем развитии, например – в отборе единого кода ДНК или формировании процессов поглощения и накопления энергии.

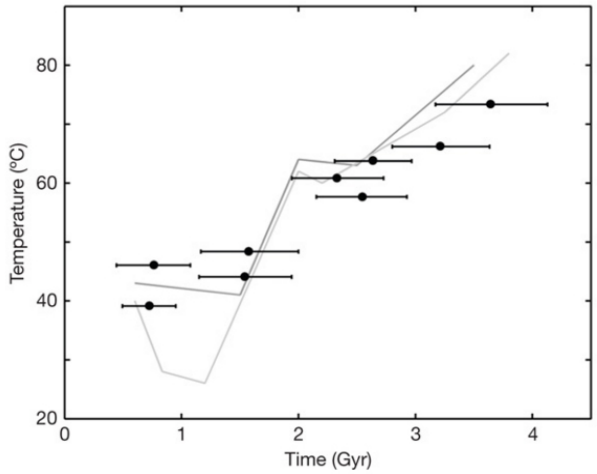


Рисунок 3. Оптимальные температуры для существования древних секвенированных белков (черные горизонтальные линии) и диапазон возможных температур поверхности Земли (серые линии). Из (Gaucher et al., 2008).

Одновременно с высокой солнечной радиационной активностью для молодой биосферы существовала и другая проблема – недостаток солнечного излучения, особенно в видимом диапазоне спектра. Недостаток светимости молодого Солнца должен был бы привести к замерзанию поверхности Земли по- крайней мере в первой половине ее жизни. Однако данные биологии, палеонтологии и геологии свидетельствуют о том, что средняя температура поверхности нашей планеты была даже выше современной («парадокс слабого молодого Солнца»). На Рисунке 3 представлены реконструированные оптимальные температуры для существования древних секвенированных белков и соответствующая им температура поверхности Земли в различные периоды ее существования. Тем не менее, парадокс слабого молодого Солнца требует решения. Например, за счет интенсивной потери массы Солнца, другого расстояния между Землей и Солнцем, высокой геотермальной активности на поверхности нашей планеты, или другого состава атмосферы ранней Земли, обеспечивающего сильный парниковый эффект. У всех этих моделей есть свои достоинства и недостатки, но не одна из них в полной мере не решает парадокс. В то же время, каждая из этих моделей предполагает разные условия для существования

первичной биосферы. Похоже, что выбор наиболее оптимальной модели ранней Солнечной системы будут осуществлять биологи, а не физики.

В условиях тусклого молодого Солнца одним из факторов, повышающих температуру поверхности планеты до геологически зафиксированных значений, могла стать глобальная океаническая органическая пленка. Наличие такой пленки также объясняет спектр поглощения хлорофилла, который не соответствует максимуму солнечного излучения ни молодого, ни современного Солнца (Храмова Е. Г., 2020). В ранних океанах верхние слои воды под градиентным воздействием космических лучей и УФ-излучения становились буквально инкубатором биоразнообразия живого мира нашей планеты (Belisheva N.K., Lammer H. at al., 2012).

Через 2,5 - 2 миллиарда лет Солнце вышло на близкий к современному режим циклической динамики, однако эволюционные адаптационные механизмы в проявляются и в современных живых системах, от дрожжевых клеток до человека. Вопрос об активности молодого Солнца и интенсивности космических лучей в ранней Солнечной системе оказывается важным не только для моделирования биосферы ранней Земли, но и для рассмотрения астробиологических вопросов возможности существования жизни на спутниках планет-гигантов и экзопланетах.

Список литературы:

1. Рагульская М. В. Солнце и биосфера: миллиарды лет вместе. М.: Радиофизика, 2019, 147 с. http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Ragulskaya-Sun-2019.pdf
2. Manuel Güdel. The Sun in Time: Activity and Environment . Living Reviews in Solar Physics, 2007, volume 4, Article number: 3, https://link.springer.com/article/10.12942/lrsp-2007-3
3. Рагульская М. В. , Обридко В. Н., Храмова Е. Г. Галактические факторы, молодое Солнце, Земля и биофизика живых систем. Биофизика, 2020, том 65, № 4, с. 804–817.
4. Eric Gaucher et al. Paleotemperature trend for Precambrian life inferred from resurrected proteins. Nature 2008, 451(7179):704-7
5. Belisheva N.K., Lammer H. at al. The effect of cosmic rays on biological systems // ASST, 2012, N8, p. 7-17 (www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012).

ПАРАДОКС СЛАБОГО МОЛОДОГО СОЛНЦА, ИЛИ ПОЧЕМУ ДЕРЕВЬЯ ЗЕЛЕНЫЕ

Храмова Е.Г.

ИЗМИРАН, Москва, Россия

В докладе излагается новый взгляд на парадокс слабого молодого Солнца: основная роль в решении парадокса отводится воздействию повышенной активности

молодого Солнца на атмосферу Земли. В качестве климатообразующего фактора, участвующего в разрешении парадокса слабого молодого Солнца, рассмотрена роль планетарных органических пленок. Обсуждается спектр излучения молодого Солнца и парадокс несоответствия спектра поглощения хлорофилла спектру солнечного излучения, а также обозначена возможная связь парадокса слабого молодого Солнца с зарождением и эволюцией фотосинтеза на Земле.

Согласно астрофизическим моделям, светимость молодого Солнца должна была быть на 30% ниже современной (Bahcall et al., 2001), а по палеоклиматическим данным температура поверхности Земли в Архее превышала современные значения (Розанов, 2009). Это несоответствие легло в основу Парадокса слабого молодого Солнца. Среди вариантов решения парадокса рассматривались: некорректно посчитанная солнечная постоянная молодого Солнца, значительно меньшее альбедо молодой Земли, неучтенные дополнительные источники энергии, более мощный парниковый эффект.

Самым вероятным выглядит вариант более мощного парникового эффекта, предложенный еще Карлом Саганом и Джорджем Малленом (Sagan and Mullen, 1972). Но он упирается в серьезные контраргументы со стороны минералогии, которая накладывает ограничения на содержание углекислого газа в атмосфере молодой Земли (не более чем в три раза выше современного уровня), чего явно недостаточно для обеспечения необходимого парникового эффекта (Rosing, Bird et al., 2010).

Предложенная автором гипотеза органических пленок, покрывавших поверхность океана, базируется на данных о первичной бескислородной атмосфере Земли, способствовавшей синтезу органических соединений и сохранности поверхностной пленки. Наличие такой пленки нарушает газообмен между океаном и атмосферой: соотношение атмосферных и растворенных в воде газов будет меняться в зависимости от толщины, площади покрытия океана и химического состава пленки. Это заставляет по-другому взглянуть на данные минералогии. К тому же, уменьшая испарение, пленка вносит изменения в теплообмен между океаном и атмосферой. За счет фотодиссоциации она еще и представляет собой источник парниковых газов. Эти и другие эффекты органической пленки подробнее рассмотрены в статье «О парадоксе слабого молодого Солнца» (Храмова, 2017).

Парадокс слабого молодого Солнца распространяется и на Марс, что дает основания для поиска единой причины. Обратим внимание на ключевую особенность парадокса: понижение поверхностных температур Земли и Марса при нарастающей солнечной светимости. На роль единого фактора, падающего и с расстоянием от

Солнца, и с возрастом Солнечной системы, подходит солнечная активность. Коротковолновое (гамма-излучение, рентген и ультрафиолет), радиоизлучение, корональные выбросы массы, солнечные космические лучи были на 2-3 порядка выше современных (Кацова и Лившиц, 2014). Под влиянием какого-либо из этих факторов (возможно, нескольких факторов сразу) могли образовываться парниковые газы, состав которых варьировался в зависимости от состава атмосферы, что, при учете эффектов органических планетарных пленок, могло объяснить все сложности парадокса.

Теперь перейдем ко второму, не менее удивительному парадоксу: почему деревья зеленые? Сравним спектр поглощения хлорофиллов a и b (основных хлорофиллов оксигенного фотосинтеза) со спектром солнечного излучения (рис. 1). В спектре поглощения хлорофиллы a и b имеют две интенсивные полосы поглощения в красной (640-700 нм) и синей (400-450 нм) областях видимой части спектра. Как видим, максимумы поглощения хлорофиллов не совпадают с областью максимума солнечного спектра у поверхности Земли, в чем и заключается парадокс.

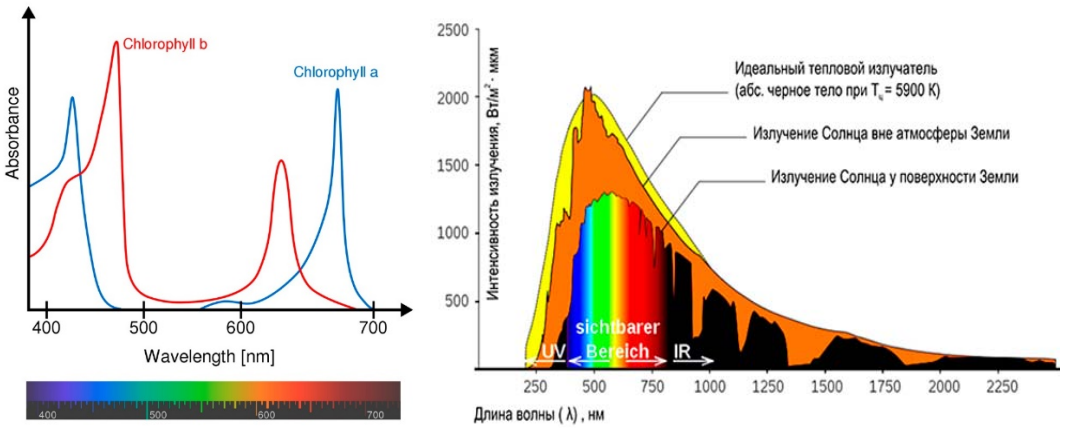


Рисунок 1. Слева - спектры поглощения хлорофиллов a и б. (Daniele Pugliesi, M0tty, 2012). Справа - спектр солнечного излучения, наблюдаемый над земной атмосферой и на уровне моря. (Degreen, 2006)

Логично было бы предположить, что на молодой Земле в период формирования фотосинтеза нечто поглощало солнечное излучение в центральной части видимого спектра, оставляя окна прозрачности в красной и синей области. Рассмотрим прохождение света сквозь нефтяную пленку (аналог древней органической пленки).

Изучая спектры поглощения нефтяных пленок (рис. 2) (Таер Абд Дейдан и др., 1994), видим, что при уменьшении длины волны в диапазоне 300-600 нм оптическая плотность нефтяных пленок растет вне зависимости от сорта нефти. Для излучения свыше 600 нм нефтяная пленка толщиной в 1 мкм практически прозрачна. Что согласуется с максимумами поглощения хлорофиллов в красной области, но ставит в

тупик при попытке объяснить максимум поглощения хлорофиллов в синей области спектра.

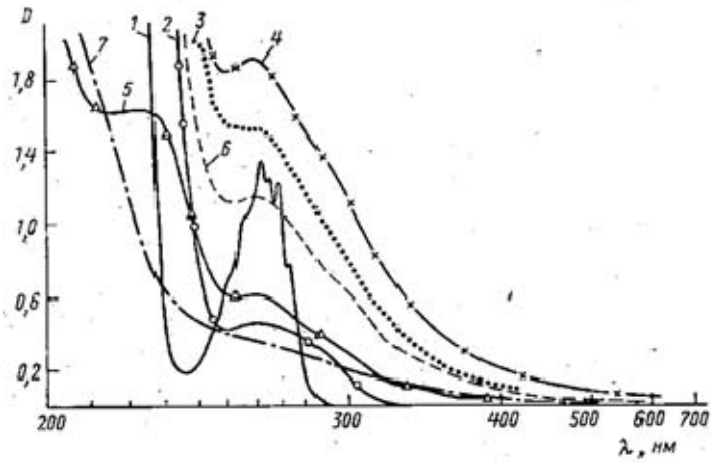


Рисунок 2. Зависимость оптической плотности D от длины волны λ для нефтепродуктов: бензин (1), дизельное топливо (2), саратовская (3), грузинская (4), шаимская (5) и ливийская нефть (6). Для бензина толщина кюветы 100 мкм, для др. нефтепродуктов — 1 мкм. Для сравнения приведен спектр поглощения РОВ в природной воде, толщина кюветы 3 см (7).

Разгадка, скорее всего, кроется в другом свойстве органических пленок – флуоресценции. Для сырых нефтей в пленке максимум флуоресценции расположен в области 420-490 нм при любой длине волны возбуждения. А максимум спектра поглощения хлорофиллов 400-450 нм. К примеру, максимум флуоресценции пленки ливийской нефти толщиной 10 мкм примерно 430 нм, что соответствует синему максимуму поглощения хлорофилла а (рис. 3) (Таер Абд Дейдан и др., 1994).

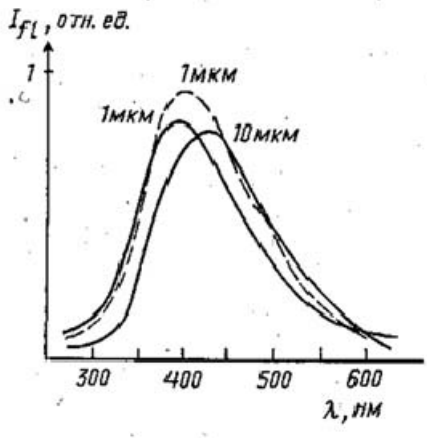


Рисунок 3. Спектры флуоресценции ливийской нефти (сплошные линии, толщина кюветы 1 и 10 мкм) и саратовской нефти (штриховая, толщина кюветы 1 мкм), при длине волны возбуждающего излучения 308 нм.

Изучение свойств флуоресценции различных органических пленок, в том числе нефтяных, и сравнение со спектрами поглощения пигментов фотосинтезирующих организмов может стать весьма перспективным направлением исследования эволюции климатических условий Земли.

Список литературы

1. Bahcall, John N.; Pinsonneault, M. H.; Basu, Sarbani. Solar Models: Current Epoch and Time Dependences, Neutrinos, and Helioseismological Properties. The Astrophysical Journal, Volume 555, Issue 2, pp. 990-1012, 2001.

2. Розанов А. Ю. Проблемы происхождения жизни, 2009.
3. Sagan C. and Mullen G. Science, 177:52-56, 1972.
4. Rosing M. T., Bird D. K. et al, Nature 464, 744-747, 2010.
5. Храмова Е. Г., 2017. О парадоксе слабого молодого Солнца. «Жизнь и Вселенная», коллективная монография под редакцией В. Н Обридко и М. В. Рагульской, Изд. ВВМ, стр. 74-91.
6. Кацова М. М., Лившиц М. А., 2014 Активность молодого Солнца. «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы», ред. Обридко В. Н., материалы междисциплинарного коллоквиума, май 21-23, 2014, стр. 67-81.
7. Таер Абд Дейдан, Пацаева С. В., Фадеев В. В., Южаков В. И. Флуоресцентные исследования нефтепродуктов в тонких пленках, Вестн. Моск. Ун-та, сер. 3, 1994, Т. 35, № 2, стр. 51-55.

О ДРЕВНЕЙШИХ МИКРООРГАНИЗМАХ ЗЕМЛИ

Астафьева М.М.

ПИН РАН, Москва, Россия

Несмотря на то, что докембрийский (AR-PR) этап по длительности превышает 85% всей истории Земли, а раннедокембрийский ($AR\text{-}PR_1$) - более 80%, долгое время этот период практически не изучался палеонтологами.

Всесторонние бактериально-палеонтологические изыскания начались с работ В.И. Вернадского в начале 1920-х годов, когда, исходя из структуры и геохимических особенностей различных осадочных пород, он пришел к заключению, что в геологической истории Земли не удается обнаружить периода – сколь угодно древнего – когда образование всех известных для него осадков происходило бы заведомо абиогенным путем. Причем биосфера Земли сформировалась с самого начала как сложная система с большим количеством видов организмов, каждый из которых выполнял свою роль в общей системе (Вернадский, 1967).

Традиционно самыми ранними проявлениями жизни на Земле считались раннеархейские ископаемые бактерии, обнаруженные в отложениях с возрастом 3.5 – 3.3 млрд. лет серии Онфервахт зеленокаменного пояса Барбертон Южной Африки (Knoll, Barghorn, 1977) и серии Варравуна кратона Пилбара Австралии (Lowe, 1980; Walter et al., 1980), в разрезах которых преобладают вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы. Результаты современных бактериально-палеонтологических исследований изменили наши представления о древнейших этапах эволюции жизни на Земле. Доказано, что сообщества микроорганизмов в древних осадочных и вулканогенных разрезах были важнейшим фактором эволюции биосферы и, прежде всего, осадкообразования на поверхности Земли, начиная с архея.

В конце прошлого века появились работы по древнейшим осадочным породам – зеленокаменному поясу Исуа в Гренландии. Возраст этого пояса 3.8 млрд. лет. Данные изотопного анализа углерода этих пород свидетельствовали о существовании жизни практически с самого начала их образования уже в эоархее 3.8 млрд. лет назад (Schidlowski, 1988). Несмотря на то, что эти данные многократно критиковались, они так и не были опровергнуты.

Мало того, дальнейшие исследования подтвердили существование жизни на Земле практически с возникновения земной коры. Есть данные о том, что первые следы жизни отмечены в отложениях, возраст которых превышает 3.77 млрд. лет (пояс Нуввуагиттук, Квебек, Канада) и даже может приближаться к 4.28 млрд. лет. Упомянутые породы интерпретируются как осадочные железистые придонные отложения, связанные с гидротермальными выходами. Были обнаружены гематитовые трубочки микронного размера по морфологии сходные с филаментами современных микроорганизмов из современных гидротерм. В архейских отложениях Нуввуагиттука также встречены гранулы графита - углеродистого материала, образовавшиеся в результате окисления биомассы. Предполагается, что эти графитовые гранулы обязаны своим существованием жизнедеятельности бактерий – деструкторов. Предположение об их биогенном происхождении было сделано на основании косвенных изотопных данных (Dodd et al., 2017).

Анализ соотношения изотопов углерода в графитах, заключенных в древнейших метаосадочных породах Северного Лабрадора, Канады (3.95 млрд. лет) позволил установить, что графиты имеют биогенное происхождение, а значит 3.95 млрд. лет тому назад уже существовали живые организмы. Наличие следов ранней жизни, которая процветала в водных бассейнах по крайней мере 3.7 млрд. лет назад подтвердили также морфология и изотопный анализ углерода в зернах графита сланцев Исуа (Ohtomo et al., 2014).

Таким образом, осадочные породы, происхождение которых может быть связано с биологическим фактором, были обнаружены в зеленокаменных поясах Нуввуагиттук (Nuvvuagittuq) Северного Квебека Канады, в комплексах Акилия (Akilia) и Исуа Гренландии. Все эти породы имеют литологическое и геохимическое сходство. Предполагается также, что полосчатые железистые кварциты, с которыми связаны возможные проявления жизни во всех самых древних местонахождениях, сохраняют как прямые, так и косвенные доказательства активности ранней микробиальной биосферы, использовавшей растворенные в морской воде соединения металлов (Mloszewska et al., 2013).

При изучении метаморфизованных осадочных пород Исуа (3.7 млрд. лет) были обнаружены не только свидетельства проявления древней жизни, но и ее очевидные следы. В открытом недавно местонахождении метакарбонатных пород (Исуа, 3.7 млрд. лет) были обнаружены строматолиты – макроскопические слоистые структуры, образованные сообществами микробов, высотой 1-4 см, которые могли сформироваться предположительно в мелководных условиях (Nutman et al., 2016).

Достаточно рано зафиксированы вероятные остатки аэробных бактерий. Цианобактерии известны из отложений возрастом около 3.5 млрд. лет (Knoll, Barghoorn, 1977; Walter, 1983; Schopf, 1983, 1993; Knoll, 1994).

Значительно древнее, чем считалось прежде, появились и одноклеточные эвкариоты - как минимум 2.7-2.9 млрд. лет назад (Тимофеев, 1982; Brocks et al, 1999) Розанов, 2003). Ранее их первое появление относили к ганфлинтскому времени (2.0-1.8 млрд. лет) раннего протерозоя (Schopf, 1983; Knoll, 1994).

Достоверные находки фоссилизированных остатков представителей эвкариот в архее впервые были зафиксированы Б.В. Тимофеевым (1982). Им были описаны акритархи и крупные трихомы из верхнеархейских отложений Центральной Карелии и Среднего Приднепровья. Выводы Б.В. Тимофеева были подтверждены в результате переизучения образцов из его коллекции. Был также проведен сбор и изучение дополнительного материала из архея Северной Карелии – Хизоваарской зеленокаменной структуры (2.8 млрд. лет). В результате исследований были обнаружены как прокариотные, так и предположительно эвкариотные ископаемые микроорганизмы (Астафьева, 2006).

Следует отметить находку микрофоссилий из керна скважины, пробуренной на западном фланге Имандра-Варзугского рифтогенного пояса (Кольский п-ов) (> 2.448 млрд. лет – т.е. практически на границе архея - протерозоя). Найденные ископаемые остатки, названные *Gazavarzinia*, по своей морфологии могут быть отнесены к многоклеточным эвкариотам, вероятно, красным или зеленым водорослям (Розанов, Астафьева, 2013).

Благодаря накопленным за последние десятилетия данным можно уже уверенно говорить, что жизнь на нашей планете появилась практически с началом геологической летописи, т.е. почти одновременно с образованием земной коры. Представлена эта древнейшая жизнь была бактериями, возможно археями (морфологически отличить эти группы в ископаемом состоянии невозможно), не исключая также присутствия цианобактерий, а значит и процесса фотосинтеза. В позднем архее, намного раньше

установленного прежде срока, появились первые эвкариоты, ставшие прародителями великого разнообразия жизни на Земле.

Список литературы:

1. Астафьева М.М. Архей Карелии и бактериальная палеонтология. Эволюция биосферы и биоразнообразия. К 70-летию А.Ю. Розанова. М.: Т-во научных изданий КМК. 2006. С. 120-128.
1. Вернадский В. И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. 283 с.
2. Розанов А.Ю. Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы // Палеонт. журн. 2003. № 6. С. 41-49.
3. Розанов А.Ю., Астафьева М.М. Уникальная находка древнейших (2.45 млрд. лет) многоклеточных водорослей // ДАН. 2013. Т. 449. № 3. С. 1-3.
4. Тимофеев Б.В. Микрофитофоссилии раннего докембрия. Л.: Наука, 1982 . 128с.
5. Broks J.J., Logan G.A., Buik R., Summons R.E. Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes // Science. 1999. V. 285. P. 1033-1036.
6. Dodd M.S., Papineau D., Grenne T., Slack J.F., Rittner M., Pirajno F., O'Neil J., Little C.T.S. Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates // Nature. 2017. V. 543. P. 60-65.
7. Knoll A.N. Proterozoic and Early Cambrian protists: evidence for accelerating evolutionary tempo // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1994. V. 91. № 6. P. 6743-6750.
8. Knoll A.H., Barghoorn E.S. Archaean microfossils showing cell division from the Swaziland System of South Africa // Science. 1977. V. 198. P. 396-398.
9. Lowe D.R. Stromatolites 3,400-Myr old from the Archaean of Western Australia // Nature. 1980. V. 284. P. 441-443. [Chapters 1, 7, 8, 9]
10. Mloszewska A.M., Mojzsis S.J., Pecoits E., Papineau D., Dauphas N., Konhauser K.O. Chemical sedimentary protoliths in the >3.75 Ga Nuvvuagittuq Supracrustal Belt (Québec, Canada) // Gondwana Research.2013. V. 23. P. 574-594.
11. Nutman A.P., Bennett V.C., Friend C.R.L. et al. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures // Nature. 2016. V. 537. P. 535-539.
12. Ohtomo Y, Kakegawa T., Ishida A. et al. Evidence for biogenic graphite in early Archaean Isua metasedimentary rocks // Nature Geoscience. 2014. V. 7. P. 25-28.
13. Schidlowski M.A. 3800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks // Nature. 1988. V. 333. P. 313–335.
14. Schopf J.W. (ed.) Earth's biosphere, its origin and evolution. Prinston: Prinston Univ. Press, 1983. 544 p.
15. Walter M.R., Buik R., Dunlop J.S.R. Stromatolites 3,400 – 3,500 Myr old from the North Pole area, Western Australia // Nature. 1980. V. 284. P. 443-445.

Секция 2: АБИОГЕННЫЙ СИНТЕЗ БИООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ (ИЗУЧЕНИЕ ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В КОСМОСЕ И НА РАННЕЙ ЗЕМЛЕ; АСТРОКАТАЛИЗ – КАК ИСТОЧНИК ПЕРВИЧНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА)

ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ АБИОГЕНЕЗА

Иванов А.А.[1], Лауринавичус К.С.[2], Каюшина Е.О.[3]

[1]ГЕОХИ РАН, Москва, Россия
[2]ИБФМ РАН, Пущино, Московская обл., Россия
[3]МОИП, Москва, Россия

Для прохождения любых физико-химических процессов, сопровождавших предбиологическую стадию возникновения жизни, кроме подходящих для этого условий, мест и исходных веществ, требовался источник силы, энергосопрягающий синтез органических полимеров и образование из них структур, формирующих обособленную живую систему.

Дискуссия о том, где впервые произошло абиогенное самозарождение жизни, теряет глубокий смысл, за неимением принципиального значения, если говорить о природе причин феномена её возникновения. Так представляется, потому что, формальное перенесение действия из одной точки пространства вселенной, в другую, не меняет существа вопроса о движущих силах абиогенеза, которые не могут быть не учтены при рассмотрении данной проблемы. И вне зависимости от того, где и когда это произошло впервые, задача выявления движущих сил абиогенеза, при любом сценарии развития событий, будет всегда актуальна. Поэтому вопрос - какие силы могут приводить в движение материю, чтобы в конечном итоге прийти к пониманию того, как возникла её биологическая форма, должен рассматриваться в первую очередь.

Несомненно, первая, из сил фундаментальных взаимодействий – гравитация, организующая крупномасштабную структуру пространства для проявления всех типов взаимодействий, и которая, в частности, принимала непосредственное участие в этапе самоорганизации условий для предбиологической стадии абиогенного самозарождения жизни.

Вторая – по природе электромагнитная. При самоорганизации условий абиогенеза, эта сила непосредственно участвовала в синтезе “кирпичиков” жизни. Она обеспечила все реакции химических элементов и молекулярные взаимодействия, в том числе при образовании аминокислот, нуклеотидов, углеводов, жирных кислот, а в последующем, наличие всех классов биополимеров: липидов, белков, сахаридов, нуклеиновых кислот. И к этому всему имеется достаточно полное научное понимание.

Но что является переносчиком взаимодействий в терминальной стадии абиогенеза - стадии возникновения протоклеток, то, что отвечает за структурное формирование протобионтов?! Какие силы двигали этот процесс? Этому вопросу отводится основная часть доклада, в изложении которой будут представлены экспериментальные результаты проверки работы новой концепции, как недостающего и дополняющего элемента теорий происхождения жизни - теневой стадии абиогенеза. В основе этой работы лежат представления и понимание того факта, что для терминальной стадии абиогенеза, стадии структурообразования протобионтов, классически рассматриваемых источников энергии – недостаточно. Силы, между реагирующими компонентами сформировавшихся структур, появившихся за счёт обмена промежуточными посредниками – переносчиками взаимодействий (уф-излучение, электрические разряды и т.д.), не имели для данного этапа требуемый формат энергий (Иванов, 2020). В связи с чем, для самоорганизации данного этапа становления биологического уровня материи, требовался иной источник силы, с определёнными параметрами энергетического формата: масштаба, времени и места действия. К примеру, таким местом могли стать каверны (ячейки) абразивных берегов, где при работе сил морского прибоя взаимодействовали органические соединения, сгущаясь в первичный бульон, в дальнейшем из которого регулярно и в большом количестве генерировались полипептидные микросферы – первые структурные элементы протобионтов. Это могло быть результатом того, что при резком сжатии воздуха, замкнутого водой прибоя морской волны, в ячейках абразивных берегов возникал пневмоудар, моментально сопровождавшийся кратковременным скачком давления (до 10 атм. и выше) и температуры (до 200°С и выше). Горячие от сжатия пузырьки воздуха, под давлением газирующие находящийся в ячейках первичный бульон, должны были коагулировать на своей внешней границе содержащиеся в нём пептиды. Как следствие, при этом в первичном бульоне могло образоваться множество полипептидных микросфер. Вероятно, ячеистая структура абразивных берегов являлась главной особенностью, способной формировать генеративные условия, в активной среде которых образовавшиеся микросферы вынуждены были, изменяясь в объёме, пульсировать в такт волнам первичного океана. В таких обстоятельствах пульсирующие микросферы могли объединяться и дробиться, менять форму и объём, поглощать и преобразовывать компоненты среды, обмениваясь при этом через поры полипептидной оболочки собственным содержимым. И всё это было бы возможно благодаря термобароциклическому режиму замкнутых условий образования многофазной пузырьковой среды во внутренней полости ячеек (пар, жидкость, газ,

твёрдые частицы, гель). Таким образом, подвергаясь принудительному обмену веществ, сменяющаяся череда поколений микросфер в течение длительного геологического времени могла, модифицируясь, видоизменяться и иметь возможность постепенно превращаться в клеткоподобные структуры протобионтов, в которых уже в дальнейшем могли появляться начальные признаки и элементы живого вещества. Очень важно и то, что при этом скалистые берега могли служить защитным экраном от воздействия мощного космического излучения, проникавшего через бескислородную атмосферу молодой Земли, предотвращая в такой теневой стадии от его губительного влияния примитивных протобионтов, тем самым позволяя им спокойно развиваться и эволюционировать до полноценных живых форм, уже способных к гетеротрофному онтогенезу. И только после этого примитивные, но уже самостоятельные живые организмы могли бы покинуть свою колыбель и обосноваться в прибрежье морей первичного океана. Исследованию возможности развития предбиологических событий по такому сценарию посвящена наша работа. И если это так, то не исключено, что для абиогенного самозарождения жизни, где бы ни возникали во Вселенной условия для нахождения воды в жидком состоянии, ещё одним обязательным фактором предбиологической среды является береговая линия с абразивными берегами. Только с возникновением абразивной береговой линии первичного океана появляется естественный точечный источник «мягкой» энергии пульсирующего режима действия, способного, работая геологически длительное время, запустить, раскачать и раскрутить «маховик» жизни до высоких оборотов. В роли побуждающей силы этого источника выступают морские волны, порождающие прибоем пневмоудар, возникающий в замкнутом объёме каверн абразивных берегов, в которых при этом регулярно формируется и активно поддерживается в постоянно подвижном состоянии многофазная пузырьковая среда. Именно пузырьки в этой многофазной среде являются акцепторами и переносчиками энергии этой силы.

Экспериментальная идея получения полипептидных микросфер состоит в следующем. В замкнутом объёме какого-либо сосуда, имитирующего отдельную ячейку абразивного берега и частично заполненного пептидно-водным раствором, производится пневмоудар. В момент пневмоудара воздух от резкого сжатия нагревается и под давлением горячими пузырьками газирует раствор. При этом под действием давления и температуры на горячей границе пузырьков коагулируется полипептидная плёнка, формирующая полые микросферы.

В первых модельных экспериментах использовались небольшие газовые баллоны от 0,1 до 1,5 л, на 2/3 по объёму заполненные водным раствором 5 % бычьего сывороточного альбумина (БСА) и на 1/3 — воздухом.

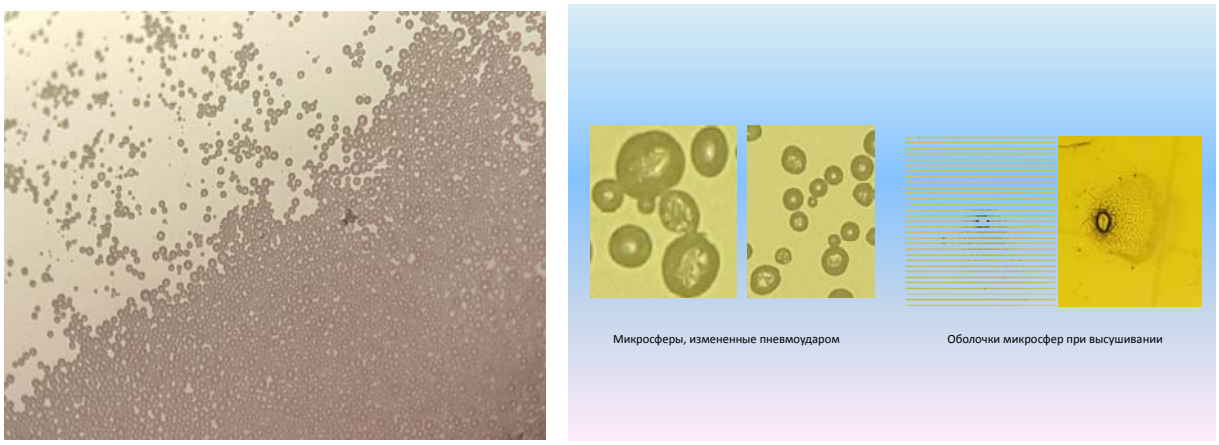


Рисунок 1. Белковые микросферы, размером от 1 до 10 мкм, полученные в модельном эксперименте.

Список литературы:

1. А.А. Иванов. Теневая стадия абиогенеза. М.: Издательство ИКАР, 2020. – 104с.

ХРОНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛ НА РАННИХ ЭТАПАХ СУЩЕСТВОВАНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Сапрыкин Е.А.[1], Рюмин А.К.[1], Капралов М.И.[1], Афанасьева А.Н.[1]

[1]ОИЯИ ЛРБ, Дубна, Московская обл., Россия

Один из постулатов теории панспермии заключается в том, что возникновение жизни произошло вне земного пространства. Предполагается, что этому предшествовал этап астрокатализа, в ходе которого, на стадии протопланетного диска, произошел переход от прекурсоров к высокомолекулярным органическим соединениям, непосредственно предшествовавшим возникновению живых организмов. Установлено, что протопланетные диски могут обнаруживаться возле некоторых звезд населения II, что, при условии наличия необходимых прекурсоров, позволяет предположить возможность протекания процесса астрокатализа на достаточно ранних этапах существования Вселенной (Snytnikov, 2008).

На сегодняшний день, в космическом пространстве обнаружено более 200 различных молекул, в основном органических, где они образуются в результате автокатализа под действием внешнего высокоэнергетического воздействия. Для многих из этих молекул не определен возраст их образования, однако, можно предположить,

что зная условия, при которых происходит их синтез, становится возможным, с определенной долей вероятности, определить, на каком именно этапе эволюции Вселенной могло произойти их появление (База данных).

Целью данного доклада является историографический обзор современного состояния проблемы обнаружения молекул вне земного пространства и механизмов их образования. Основываясь на результатах предыдущих исследований, предлагается гипотетическая хронология абиогенного синтеза молекул на ранних этапах эволюции Вселенной.

Список литературы:

1. Snytnikov V. N. Astrocatalysis Hypothesis for Origin of Life Problem // in Biosphere Origin and Evolution (Dobretsov N., Kolchanov N., Rozanov A. and Zavarzin G., Eds.). P. 45-53.
2. База данных: https://zeus.ph1.uni-koeln.de/cdms/molecules

ПОТОЧНО-КАСКАДНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Скобликов Н.Э.[1,2], Зимин А.А.[3]

[1]*ФГБНУ КНЦЗВ, Краснодар, Россия*
[2]*ООО «СЛ МедикалГруп , Краснодар, Россия*
[3]*ИБФМ РАН, Пущино, Московская обл., Россия*

Нами предложена гипотеза «горячего вулканического органического потока» как наиболее подходящей среды для абиогенной поликонденсации органических полимеров.

Первичный синтез органических соединений рассматривается как результат взрывного вулканического (возможно, метеорит-индуцированного) извержения. Такое извержение сопровождалось пепло-газовым выбросом и взрывной волной, распространявшейся в первичной атмосфере, что приводило к образованию эруптивного облака, в значительной мере состоящего из простых органических соединений – альдегидов, спиртов, аминов, аминоспиртов, нитрилов и аминокислот) – продуктов, обычно синтезирующихся в лабораторных условиях «разрядных» экспериментов.

Последующее охлаждение вулканогенного облака органических продуктов приводило к последовательной конденсации органических компонентов и их выпадению в виде жидких осадков с образованием горячего (> 100°C), вязкого и мутного органического потока. Первично синтезированными органическими

веществами, составляющими основной объём такого потока, нами предполагаются (осаждающиеся в порядке убывания температуры кипения): цианамид, ацетамид, формамид, гликольальдегид, гликолонитрил, ацетонитрил.

Такой поток – даже если время его существования было коротким – рассматривается нами как наиболее вероятная геологическая среда для абиогенной поликонденсации. Именно в таких условиях нами предполагается осуществление ключевого процесса предбиологической эволюции – воспроизводимого минерал-опосредованного синтеза линейных гетерополимеров (пептидов и нуклеиновых кислот).

В отличие от большинства других моделей абиогенного синтеза органических полимеров, в предложенной нами модели находят решения проблемы, связанные с наличием в реакционной среде жидкой воды, являющейся основным ингибитором поликонденсации. Предложенная модель характеризуется:

1. *исходным отсутствием* (или следовыми количествами, попадающими вследствие азеотропного эффекта) жидкой воды;
2. *связыванием образующейся* в результате реакций поликонденсации воды гидрофильными органическими веществами;
3. *постоянным удалением* остатков воды с потоком.

Дальнейшая агрегация синтезированных пептидов (и, вероятно, нуклеиновых кислот) в макромолекулярные комплексы – первые прото-клеточные структуры – происходила при дальнейшем охлаждении среды (< 100°C), сопровождавшемся её значительной гидратацией и формированием коллекторного водоёма.

Быстрая смена геологических локаций формировала натуральный *геохимический каскад* как основное пространство быстрой пребиотической эволюции. Предлагаемая поточно-каскадная модель объединяет все три основных этапа предбиологической эволюции – первичный органический синтез, поликонденсацию мономеров в макромолекулярные полимеры и образование функциональных макромолекулярных комплексов (прото-клеточных структур) в рамках единого геологического сценария, позволяя одновременно решить сразу несколько проблем:

1. объединение трёх *топологически разобщённых и физически разнородных* геологических локаций (вулканогенное облако – горячий органический поток – коллекторный водоём) в рамках единого вулканогенного процесса;
2. происхождение основных *растворителей* на различных стадиях пребиотической эволюции и механизм их замещения;

3. *фазовый переход* от «горячего старта» химической эволюции в эруптивном облаке к ранней биологической эволюции в жидкой водной среде;
4. происхождение, микроархитектуру и функционирование *органоминеральных частиц* как прото-органелл (возможных предшественников ацидокальцисом и рибосом);
5. продолжительный пребиотический синтез существенных количеств олигопептидов *в маловодной среде*;
6. образование макромолекулярных комплексов из синтезированных макромолекул в более холодной (< 100°C) водной среде в течение *очень короткого* (по сравнению с другими моделями) *времени*, что предполагает сверхбыстрый старт макромолекулярной эволюции.

Вероятно, вулканогенные события, приводившие к ранней предбиологической эволюции, могли происходить не только на Земле. Так, например, комплекс потухшего марсианского вулкана *Ceraunis Tholus*, включает все три геологических структуры, соответствующие трём основным этапам предбиологической эволюции (первичному органическому синтезу, поликонденсации и формированию макромолекулярных агрегатов, соответственно):

1. область кратера (кальдеры);
2. каньоны и долины – высохшие русла потоков на склонах вулкана;
3. коллекторный кратер *Rahe*.

Мы рассматриваем области выпадения пост-эруптивных осадков и формирования вулканогенных потоков, а также места их впадения в коллекторные струткуры наиболее предпочтительными локациями для поиска молекулярных маркеров сложной предбиологической эволюции на других космических телах, обладавших вулканической активностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Краснодарского края в рамках научного проекта № 19-44-230040-р_а.

Список литературы:

1. Adam ZR, Fahrenbach AC, HongoY, Cleaves HJ, Ruiqin Y, Yoda I, Aono M (2017) Production and concentration of water-alternative solvents on the prebiotic Earth. XVIIIth Intl Conf on Origin of Life 2017 4204
2. Ahnert SE, Marsh JA, Hernández H, Robinson CV, Teichmann SA (2015) Principles of assembly reveal a periodic table of protein complexes. Science 350(6266):aaa2245. doi: 10.1126/science.aaa2245
3. Bada JL, Chalmers JH, Cleaves JH (2016) Is formamide a geochemically plausible prebiotic solvent? Phys. Chem. Chem. Phys 18:20085-20090

4. Bar-Nun A, Bar-Nun N, Bauer SH, Sagan C (1970) Shock synthesis of amino acids in simulated primitive environments. Science. 168(3930):470-3
5. Basiuk VA, Navarro-Gonzalez R (1996) Possible role of volcanic ash-gas clouds in the Earth's prebiotic chemistry. Orig Life Evol Biosphere 26:173-194
6. Benner SA, Kim HJ, Carrigan MA (2012) Asphalt, water, and the prebiotic synthesis of ribose, ribonucleosides, and RNA. Acc Chem Res. 45(12):2025-34. doi: 10.1021/ar200332w.
7. Benner SA (2014) Paradoxes in the origin of life. Orig Life Evol Biosph 44(4):339-43. doi: 10.1007/s11084-014-9379-0
8. Damer B (2016) A Field Trip to the Archaean in Search of Darwin's Warm Little Pond. Life (Basel). 25;6(2). pii: E21. doi: 10.3390/life6020021
9. Damer B, Deamer D (2015) Coupled Phases and Combinatorial Selection in Fluctuating Hydrothermal Pools: A Scenario to Guide Experimental Approaches to the Origin of Cellular Life. Life (Basel). 2015 Mar; 5(1): 872–887. doi: 10.3390/life5010872
10. Harada K, Fox SW (1964) Thermal synthesis of natural amino-acids from a postulated primitive terrestrial atmosphere. Nature 201:335-336
11. Johnson AP, Cleaves HJ, Dworkin JP, Glavin DP, Lazcano A, Bada JL (2008) The Miller volcanic spark discharge experiment. Science 322:404 doi: 10.1126/science.1161527
12. Lavrentiev GA, Strigunkova TF, Egorov IA (1984) Abiological synthesis of amino acids, purines and pyrimidines under conditions simulating the volcanic ash-gas cloud. Orig Life Evol Biosphere 14:205-212
13. Markhinin EK, Podkletnov NE (1977) The phenomenon of formation of prebiological compounds in volcanic processes Orig Life (3):225-235
14. Miller SL (1953) A production of amino acids under possible primitive earth conditions. Science 117:528–529
15. Mulkidjanian AY, Bychkov AY, Dibrova DV, Galperin MY, Koonin EV (2012) Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. Proc Natl Acad Sci U S A 109:E821-830
16. Skoblikow NE, Zimin AA (2016) Hypothesis of lithocoding: origin of the genetic code as a "Double jigsaw puzzle" of nucleobase-containing molecules and amino acids assembled by sequential filling of apatite mineral cellules. J Mol Evol 82(4):163–172. doi: 10.1007/s00239-016-9736-x
17. Skoblikow NE, Zimin AA (2018) Mineral Grains, Dimples, and Hot Volcanic Organic Streams: Dynamic Geological Backstage of Macromolecular Evolution. J Mol Evol Volume 86, Issue 3-4, pp 172-183. doi: 10.1007/s00239-018-9839-7
18. Sutherland JD (2016) The Origin of Life – Out of the Blue. Angew Chem Int Ed Engl. 55(1):104-21. doi: 10.1002/anie.201506585
19. Wächtershäuser G (2006) From volcanic origins of chemoautotrophic life to Bacteria, Archaea and Eukarya. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 361(1474):1787-1806

ЗАКОН ГОМОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ ВАВИЛОВА КАК ЗАКОН БИОЛОГИИ.

Суслов В.В., Пономаренко М.П., Рассказов Д.А.

ИЦиГ СО РАН, Новосибирск, Россия

У закона нет исключений, есть отменяющие (**а**) и уточняющие (**б**) границы применимости. При **а** пропуски в ряду мнимы – член ряда по ошибке внесен в другой,

невыводимый из первого (α). *При **б** и пропуск, и ряд равно выводимы из одной причины (β)*. Иначе есть лишь *эмпирическое правило* (γ). Логически α и β противостоят γ: (α∨β)∧¬γ. В редакции 1922г Вавилов свел Закон гомологических рядов (ЗГР) к γ, выдвинув много причин. *В 1935г. он ставит вопрос о (α∨β)∧¬γ, для чего исключает из ЗГР ряды, чьи причины существуют/возникают независимо от формирования данного таксона и строит лишь комбинативные (слабый эпистаз) ряды*[1]*, связывая их генезис с разнообразием среды в центрах*[2]. Нами изучено влияние на фенотип мутаций в коре и флангах ТАТА-боксов, в композиционных элементах из ТАТА-боксов, перекрытых флангами с другими сайтами. Показано: 1) негомологичные мутации взаимокомпенсируются при функциональном перекрытии (ФП) кора и флангов, или сайтов, порождая ГР, независимо от общего предка; 2) нарушение симметрии ФП дает схему Харланда (майорген+гены-модификаторы)[3]; 3) в обоих случаях ГР со временем координировано (пучками) расходятся[4], а несколько пучков – это пропуски в каждом (β). 4) отбор на усиление ФП (на сильный эпистаз!) специализует субпризнаки: схема Харланда вырождается в эмерджентный признак, где субпризнаки работают вместе, но каждый со своей функцией. ГР по таким признакам коррелятивны, *что дает β лишь при наличии экстремального закона, связывающего субризнаки*[5]. 1-4 широкая применимы у эвкариот[6], уже у прокариот. Итак (5), ЗГР Вавилова – сугубо биологический закон: *ФП задается целью функционирования признаков, чего нет в физике*. Локальное сочетание разнообразия условий в вавиловском центре задает разнообразие целей, позволяющее по-разному функционально комбинировать признаки. Лишь после того, как отбор поддержит возникшие ФП, 1-2 или 1-3 пойдут (при условии постоянного мутагенеза) как в изменчивой, так и в неизменной, но не сильнопессимальной среде. *В отличие от живого гомологическое – по принципу организации – сходство в неживом порождается не локальной, а стабильной (предсуществующей таксону) общностью набора факторов среды.*

---

[1]Парадоксально игнорируя им же ценимые корреляции, в т.ч. генетические карты. Но не плоидность.

[2]Вавилов говорил о центрах происхождения, но нео- и палеоданные не подтверждают ни обязательность зарождения таксона в центре, ни особую эффективность первичного центра в адаптивной радиации таксона: *существенным для появления ГР остается лишь проникновение таксона в область повышенного средового разнообразия и дивергенция его там на субтаксоны.*

[3]Введена в ЗГР Вавиловым в 1935г.

[4]Что наблюдал, но не объяснил Соболев. Единственное свое расхождение – осыпающийся верхушкой колос у злаков – Вавилов вынес в примечание, не строя ГР!

[5]Так, главная и вторичные периодичности таблицы Менделеева выводятся из уравнения Шрёдингера, шире – из принципа Мопертюи.

[6]Строение промоторов эукариот (проксимальный промотор=майорген+дистальные элементы= модификаторы), их ферментов (активный сайт+сайт опознавания субстрата), признаков их анатомии (глоточные челюсти цихлид+ротовые), физиологии (адаптации Лаэма-Симкина+адаптации Дарвина) и экологии (клюв+песня дарвиновых вьюрков при подборе пар). Т.о. классическая случаи дивергенции (“исключения” из ЗГР) выводимы из общей с ЗГР причины, причем именно функционирования, а не наследования – промоторы и ферменты наследуемы моногенно. Сходство же генетических карт (не не плойдности) не связано с ФП, а итог нарушенного транспозонами наследия общего предка.

Секция 3. Экстремальные экосистемы – модель для экзобиологических исследований (изучение криосферы Земли как модели возможных экосистем на планетах криогенного типа; экзобиология ледяных спутников планет-гигантов: возможность биологических и предбиологических циклов в условиях отсутствия солнечного света и низких температур; исследование экстремальных термофильных и психрофильных микроорганизмов)

3.1. Микробные сообщества экстремальных экосистем (горячие, кислые и щелочные экосистемы)

РОЛЬ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СТРЕССА В ЗАРОЖДЕНИИ И РАННЕЙ ЭВОЛЮЦИИ СООБЩЕСТВ ТЕРМОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Компаниченко В.Н.

ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, Россия

В ходе многочисленных лабораторных экспериментов по предбиологической химической эволюции были получены разнообразные модели («протоклетки» и более сложные «искусственные клетки»), состоящие из биологически важных органических соединений (липиды, полинуклеотидные и полиаминокислотные цепочки, и др.). Они рассматриваются в качестве предшественников живых клеток. Однако, в них не проявляются самоподдерживающиеся биохимические процессы, которые можно было бы обозначить термином «жизнь». Согласно авторскому подходу, наличие предбиологических микросистем (органической матрицы) является только одной из двух главных составляющих для возникновения жизни. Второй составляющей является обязательная «накачка» микросистем непрерывными внешними воздействиями за счет высокочастотных колебаний физико-химических параметров, которая происходила в гидротермальной среде (Kompanichenko, 2017, 2019). В качестве ответа на накачку, в микросистемах неизбежно возникает ответное реагирование, инициирующее появление индуцированных экстремально быстрых химических реакций. Их скорость может достигать 10^{-10} секунды, что подтверждено экспериментально (Eigen, 1971). Именно такие реакции привели к появлению столь же фантастически быстрых биохимических реакций в ходе возникновения жизни на ранней Земле.

Общая схема преобразования предбиологической микросистемы в первичную форму жизни приведена на рисунке 1.

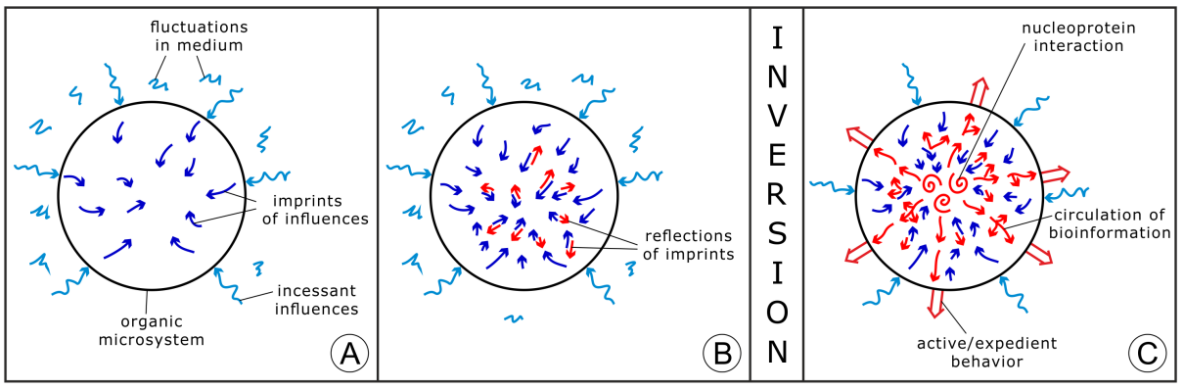


Рисунок 1. Схема превращения предбиологической микросистемы в первичную форму жизни в колебательной неравновесной среде. A: Возникновение (самосборка) предбиологической микросистемы в колебательной среде; проникновение внешних воздействий в микросистему и их фиксация в связях молекул и сети химических реакций (синие стрелки). B: Реагирование микросистемы на внешние колебания; возникновение индуцированных химических реакций (красные стрелки). C: превращение предбиологической микросистемы в первичную форму жизни, когда ее активность начинает превышать давление среды; развитие биохимических реакций (красные стрелки). Это преобразование коррелируется с термодинамической инверсией (переворотом) в системе.

Таким образом, в рамках развиваемого «инверсионного» подхода возникновение жизни происходило через активный (усиленный и целенаправленный) стресс-ответ на воздействия стресс-факторов среды, которые происходили в режиме высокочастотных колебаний физико-химических параметров (температуры, давления, концентраций компонентов, и т.д.). Из него вытекает, что даже первичные микроорганизмы и сообщества могли существовать в двух состояниях: а) пассивном (анабиотическом), если «давление» со стороны окружающей среды (действие стресс-факторов) превышало их способность к эффективному противодействию; б) активном, если их ответ на стресс-факторы среды был усиленным и целенаправленным. Ниже сформулированы три основных следствия из данной концепции, которые коррелируются с фундаментальными данными современной микробиологии.

1. Микроорганизм способен переходить из пассивного состояния (анабиоз) в активное состояние (свободно живущая форма) и обратно. Текущее состояние зависит от условий в окружающей среде (ее «давления», которое в рамках термодинамики может быть выражено через энтропию) и внутренних ресурсов микроорганизма.

2. При приближении неблагоприятных условий в среде обитания свободно живущий микроорганизм способен целенаправленно перестраивать свою структуру и функции, последовательно подготавливаясь к переходу в пассивное состояние (анабиоз) для сохранения потенциальной жизнеспособности.

3. Для выхода из анабиоза микроорганизм должен получить импульс (воздействие стресс-фактора) из среды, свидетельствующий о снижении ее давления. В

ответ на этот импульс активизируются законсервированные жизненные функции, и запускается множество обратных последовательных превращений, обеспечивающих его переход в активное состояние.

Изложенный подход применим и к эволюции термофильных микробных сообществ на ранней Земле. Так, группой итальянских микробиологов было проведено обобщенное рассмотрение генетических механизмов резистентности к токсичным металлам в сообществах термофилов Archaea и Bacteria, находящихся в нижней части филогенетического древа микроорганизмов (Gallo et al., 2018). Они описали по крайней мере четыре основных механизма резистентности к тяжелым металлам, которые могут быть даже в одном и том же микроорганизме: внеклеточный барьер; активный транспорт ионов металлов (отток); ферментативное восстановление ионов металлов; внутриклеточная секвестрация. В более поздних мезофильных формах часть этих механизмов уже теряется. Согласно разработанному автором подходу, перечисленные механизмы развились посредством эффективного стресс-ответа на постоянные возмущения в гидротермальной среде (действие стресс-факторов) в момент появления первичных форм жизни и их последующего развития. Других объяснений этим фактам пока не предложено. Также данный подход позволяет предложить объяснение и способности микроорганизмов и сообществ к экспансии в окружающей среде. Она обеспечивается появлением в ходе термодинамического переворота избыточной (над-энтропийной) свободной энергии, позволяющей им преодолевать давление среды (Рис. 1, С).

Инверсионный подход к возникновению жизни может быть проверен посредством лабораторных экспериментов нового типа, нацеленных на изучение преобразований в кластерах предбиологических микросистем в условиях, моделирующих гидротермальную среду с высокочастотными колебаниями параметров. Общая схема подобных экспериментов опубликована в статье (Kompanichenko, 2019).

Список литературы:

1. Eigen M. Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. // Naturwissenschaften. 1971. V. 58. P. 465–523.
2. Gallo Giovanni, Puopolo Rosanna, Limauro Danila, Bartolucci Simonetta and Fiorentino Gabriella. Metal-Tolerant Thermophiles: From the Analysis of Resistance Mechanisms to their Biotechnological Exploitation. // The Open Biochemistry Journal. 2018. V. 12. P. 149-160.
3. Kompanichenko V.N. Thermodynamic Inversion: Origin of Living Systems. Springer, Cham (Switzerland). 2017. 275 p.
4. Kompanichenko V. Rise of Habitable Planet: Four Conditions for the Origin of Life // Geosciences. 2019. V. 9. # 92.

БИОРАЗНООБРАЗИЕ ПРОКАРИОТОВ СОДОВОГО ШЛАМОХРАНИЛИЩА – МОДЕЛИ ЭКСТРЕМАЛЬНО ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЫ

Шилова А.В., Максимов А.Ю., Максимова Ю.Г.

ИЭГМ УрО РАН, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия

В последние годы экстремофилы находятся в центре внимания исследователей. Микробная жизнь в экстремальных природных и антропогенных условиях, которые ранее считались не пригодными для жизни, может быть удивительно разнообразна. Данные места обитания широко распространены в природе и отличаются крайними значениями температуры, pH, солености, повышенным давлением, высокими концентрациями токсических веществ (Grant, Sorokin, 2011). Характеристика этих организмов, их эволюционных связей и среды обитания считается важнейшей для понимания того, как может развиваться жизнь в других местах во Вселенной. Экстремофилы живут в условиях, близких к тем, которые могут быть найдены на других планетах. Результаты, полученные при изучении экстремофилов, позволят идентифицировать потенциальные среды, в которых могут развиваться живые организмы, что делает более реалистичной надежду найти внеземную жизнь (Cavicchioli, 2004).

Одними из экстремальных мест обитания являются содовые озера, которые характеризуются щелочными значениями pH и высокой степенью минерализации. Данные природные системы являются удобной моделью для изучения алкалофильных бактерий (Sorokin et al., 2015; Grant et al., 2016; Kulkarni et al., 2019). Это связано с выяснением роли микроорганизмов в функционировании экстремальных мест обитания, открытием новых видов галофильных и алкалофильных представителей микробного сообщества (Casamayor, 2013; Kumar et al., 2015; Malekabadi et al., 2017; Sorokin et al., 2017; Karray et al., 2018; Kevbrin, 2019).

Значительный интерес для понимания функционирования содовых озер как экосистем отдельного типа представляет исследование микробиоценоза (Grant 2006).

Микробиологические исследования показали, что в содово-соленых озерах активно функционирует алкалофильное микробное сообщество, которое не встречается в других экосистемах (Шаргаева 2014; Егорова и др. 2011). Природные щелочные озера, образовавшиеся от десятков тысяч до многих миллионов лет назад, всесторонне

изучены, в отличие от содовых шламохранилищ, которые существуют лишь десятки лет. Микробиоценоз таких щелочных биотопов антропогенного происхождения интересен в плане изучения механизмов вторичной адаптации микроорганизмов к защелачиванию и высокой концентрации солей.

Данная работа направлена на изучение щелочных биотопов антропогенного происхождения, а именно исследование филогенетического разнообразия шламохранилища АО «Березниковский содовый завод» (Пермский край).

Проведен метагеномный анализ образцов, отобранных с территории шламохранилища (воды, донных отложений и прибрежных поверхностных техногенных образований).

Было показано, что в образцах доминируют представители филумов *Proteobacteria* и *Firmicutes*.

В исследуемых образцах были выявлены представители 8 классов, среди которых доминирующее положение занимали 2 класса: *Bacilli* (до 57,51%) и *Gammaproteobacteria* (до 31,51%) (рис 1).

В осадке соды, при pH 11 отмечено наиболее разнообразное микробное сообщество, основу которого составили представители 8 классов: *Gammaproteobacteria* (20,34% от общего количества), *Bacilli* (18,71%), *Alphaproteobacteria* (16,39%), *Clostridia* (7,49%), *Betaproteobacteria* (6,23%), *Actinobacteria* (4,75%), *Deltaproteobacteria* (3,73%), *Sphingobacteria* (3,53%).

В образцах прибрежных поверхностных образований микробное сообщество оказалось менее разнообразным. Здесь обнаружены представители 4 классов: *Bacilli* (45,60 %), *Gammaproteobacteria* (31,51%), *Betaproteobacteria* (6,89%), *Clostridia* (5,29%), несмотря на то, что условия были менее экстремальны (pH 8). Данные образования, очевидно, возникают при намыве соды на природные грунты. В образцах воды основу микробного сообщества составили всего 3 класса: *Bacilli* (57,51), *Gammaproteobacteria* (29,79%) и *Clostridia* (4,55%). Снижение биоразнообразия может быть связано как с экстремальным повышением pH (до 12,6), так и с тем, что в адгезированном состоянии на частицах осадка микроорганизмы более устойчивы к действию неблагоприятных факторов.

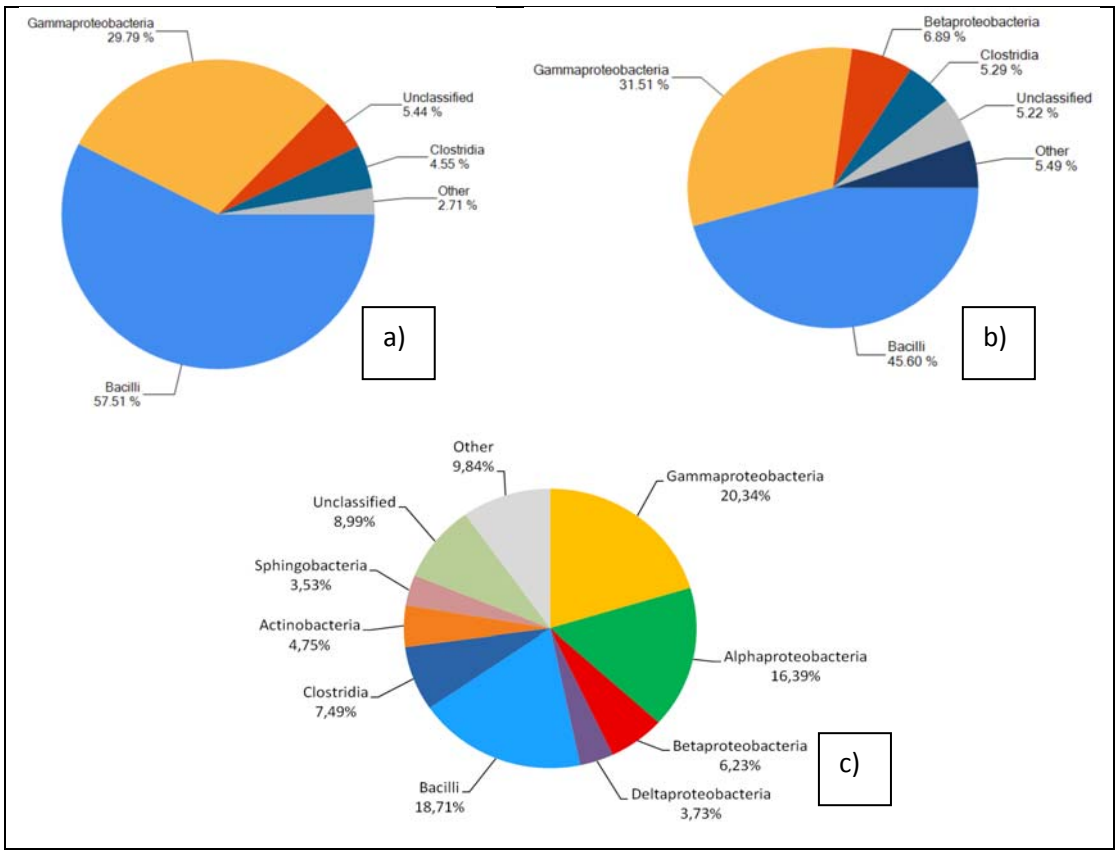


Рисунок 1. Разнообразие микробного сообщества содового шламохранилища в образцах: a) воды; b) прибрежных поверхностных техногенных образований; c) донных отложений

Установлено, что доминирующими видами являются *Staphylococcus sciuri* и *Acinetobacter baumannii*, ДНК которых в разных образцах составляет от 14,38 до 47,21% и от 7,91 до 24,60% выделяемого метагенома соответветственно. Следует отметить, что количество представителей *Staphylococcus* во всех образцах было выше, чем *Acinetobacter*.

Полученные нами данные дают представление о разнообразии бактерий в содовом шламохранилище, которое является эконишей с экстремальной антропогенной нагрузкой. Наименьшим биоразнообразием характеризуются образцы воды с pH 12,6. Несмотря на менее экстремальные условия прибрежной зоны (pH 8) филогенетическое разнообразие было снижено, что может быть связано с более низкой влажностью по сравнению с осадками (8% против 52%). В целом, филогенетическое разнообразие микроорганизмов содового шламохранилища значительно отличается от естественных биотопов, что может быть связано с иным элементным составом и более высокими значениями pH.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-34-90103.

Список литературы

1. Casamayor E.O., Triadó-Margarit X., Castañeda C. Microbial biodiversity in saline shallow lakes of the Monegros Desert, Spain // FEMS Microbiol. Ecol. 2013. V. 85. № 3. P. 503–518.
2. Cavicchioli R. Extremophiles and the Search for Extraterrestrial Life // Astrobiology. 2004. V. 2. № 3. P. 281–292.
3. Grant W.D. Alkaline environments and biodiversity // Extremophiles / Eds.: Gerday E.C., Glansdorff N. Oxford, UK: UNESCO, Eolss Publishers, 2010. V. 3.
4. Grant W.D., Jones B.E. Bacteria, Archaea and Viruses of Soda Lakes // Soda Lakes of East Africa / под ред. M. Schagerl.: Springer, Cham, 2016. P. 97–147.
5. Grant W.D., Sorokin D.Yu. Distribution and Diversity of Soda Lake Alkaliphiles In: Extremophiles handbook. Ed. by Horikoshi K., Antranikian G., Bull A., Robb F., Stetler K. Springer-Verlag, Tokyo, 2011. P. 27-54
6. Karray F., Abdallah B.M., Kallel N., Hamza M., Fakhfakh M., Sayadi S. Extracellular hydrolytic enzymes produced by halophilic Bacteria and Archaea isolated from hypersaline lake // Mol. Biol. Rep. 2018. V. 45. № 5. P. 1297–1309.
7. Kevbrin V.V. Isolation and Cultivation of Alkaliphiles // Adv. Biochem. Eng. Biotechnol. 2019. V. 84. № 4. C. 127–141.
8. Kulkarni S., Dhakar K., Joshi A. Alkaliphiles: Diversity and Bioprospection // Microbial Diversity in the Genomic Era. : Elsevier Inc., 2019. P. 239–263.
9. Kumar R.M., Kaur G., Kumar A., Bala M., Singh N.K., Kaur N., Kumar N., Mayilraj S. Taxonomic description and genome sequence of *Bacillus campisalis* sp. nov., a member of the genus *Bacillus* isolated from a solar saltern // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2015. V. 65. № 10. P. 3235–3240.
10. Malekabadi S., Badoei-dalfard A., Karami Z. Biochemical characterization of a novel cold active, halophilic and organic solvent-tolerant lipase from *B. licheniformis* KM12 with potential application for biodiesel production // Int. J. Biol. Macromol. 2017. V. 109. № 1. P. 389–398.
11. Sorokin D.Y., Banciu H.L., Muyzer G. Functional microbiology of soda lakes // Curr. Opin. Microbiol. 2015. V. 25. P. 88–96.
12. Sorokin D.Y., Chernyh N.A. *Desulfonatronospira sulfatiphila* sp. nov., and *Desulfitispora elongata* sp. nov., two novel haloalkaliphilic sulfidogenic bacteria from soda lakes // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2017. V. 67. № 2. P. 396–401.
13. Егорова Д.В., Ананьина Л.Н., Козырева Л.П., Захарюк А.Г., Плотникова Е.Г. (2011) Физико-химические свойства и микробное разнообразие озера Соленое (Республика Бурятия). Микробиология. 2011. №1. С. 55–59.
14. Шаргаева О.В., Абидуева Е.Ю. Микрозональное распределение целлюлолитических бактерий в донных отложениях содового озера Хилиганта (Юго-Восточное Забайкалье) // Вестник Бурятского Госуниверситета. 2014. №4. С. 113–115.

ИСТОРИЯ МИКРОБИОМА В ИССКУСТВЕННОЙ НИШЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (20 ЛЕТ)

Алехова Т.А., Александрова А.В.

МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

На орбитальных станциях при длительных полетах закономерно формируются и развиваются сообщества различных микроорганизмов, что может оказывать значительное влияние на безопасность полетов (Novikova et al., 2006; Gu et al., 2007; Blachowicz et al., 2018). В связи с этим, в рамках сформированной в 1999 году в России «Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, на Российском сегменте Международной Космической Станции РС МКС» проводится эксперимент «Начальные этапы биодеградации и биоповреждений в условиях космоса (Биодеградация)». Он продолжает мониторинговые исследования, начатые еще на станции Мир, и рассчитан на весь период эксплуатации МКС с отбором проб 2 раза в год. Его цель – контроль микробиологической обстановки и разработка методов обеспечения биобезопасности гермозамкнутых обитаемых аппаратов (Алехова и др., 2009). Особенно важны исследования состава микроскопических грибов, так как, во-первых, они оказывают влияние на здоровье экипажа и, во-вторых, способны повреждать различные конструкционные материалы и оборудование.

Для проведения мониторинга на борту орбитального комплекса была создана специальная укладка «Биопробы», предназначенная для доставки устройства для отбора проб с различных внутренних поверхностей станции, хранения отобранных материалов и доставки их на Землю с целью проведения микробиологического анализа (Алехова и др., 2005б, 2007а, 2008). Места забора проб – 20 точек – были согласованны с различными подразделениями ОАО РКК «Энергия» (материаловедами, проектантами, службой обеспечения жизнедеятельности) и находится в различных зонах возможного скопления и развития микроорганизмов. К настоящему времени, в рамках КЭ «Биодеградация» проведено 36 циклов исследований (с 2002 г. по 2020 г.). Дополнительно к этим работам на РС МКС проводили анализ микроорганизмов в пыли, собираемой пылесосом и на воздушных фильтрах.

В ходе мониторинга, за весь его период, было выявлено 77 видов различных микроорганизмов: 51 вид плесневых грибов, относящихся к 16 родам; 2 дрожжевых гриба и 24 вида бактерий, представленных 17 родами. Виды грибов и бактерий, к которым отнесены исследованные штаммы, являются широко распространёнными и, как правило, сопутствующими в жилых и рабочих помещениях и связаны с продуктами и материалами, используемыми в деятельности человека.

Все выявленные мицелиальные грибы относились к группе анаморфных (несовершенных грибов). Среди них преобладали представители родов *Penicillium* (18 видов) и *Aspergillus* (12 видов). Среди грибов самыми распространенными являются *Penicillium chrysogenum* и *Rhodotorula* sp. Довольно часто выявляются *Aspergillus niger, A. sydowii*, *A. versicolor*, *A. flavus, Penicillium aurantiogriseum*, *P. spinulosum* и *Ulocladium botrytis.*

Эти наиболее обычные грибы составляют "ядро" микобиоты станции, они относятся к группе технофилов и способны образовывать органические кислоты. Кроме того, представители рода *Aspergillus*, и многие виды из рода *Penicillium* являются токсинообразователями и условными патогенами, их споры могут быть причиной аллергических заболеваний. Все выделенные грибы относятся к группе технофилов и способны образовывать органические кислоты.

Регулярные исследования позволили проследить динамику общей численности и видового состава микробиома РС МКС.

Изменения заселенности станции микроорганизмами можно проследить, сравнивая, как менялось количество проб, в которых были выявлены микроорганизмы от этапа к этапу (рис. 1). На диаграмме хорошо видна цикличность, выявляемая на протяжении исследования.

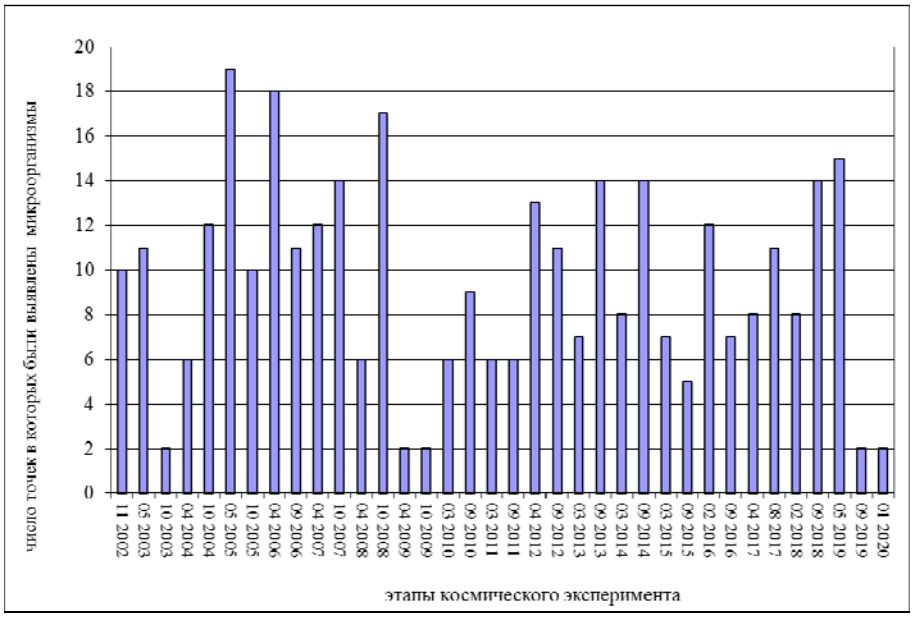


Рисунок 1. Динамика заселенности станции микроорганизмами на разных этапах эксперимента «Биодеградация» с использованием укладки «Биопробы» в период с октября 2002 г. по февраль 2020 г.

Количество выявляемых колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов (рис. 2) также изменялась волнообразно. Нарастание амплитуды колебаний по

численности микроорганизмов выражено сильнее, чем по степени заселенности. Наибольший всплеск КОЕ грибов наблюдался на 18 этапе – МКС–26, 22 марта 2011 г.

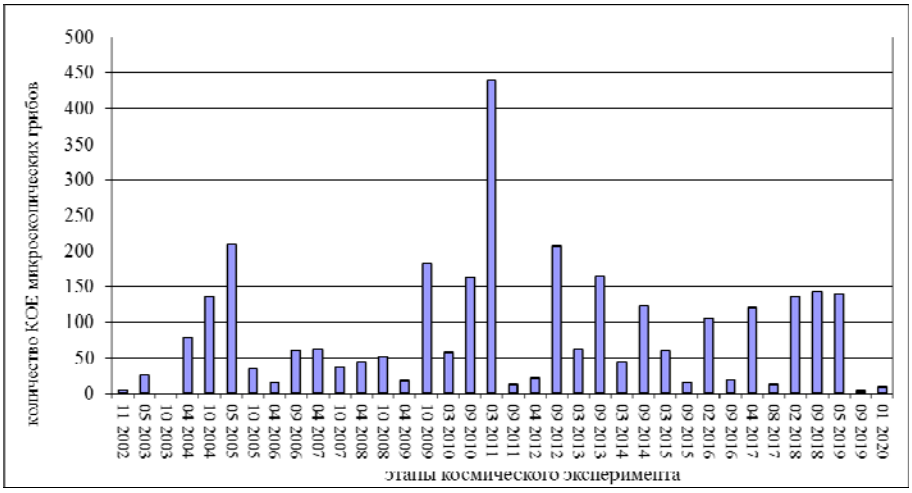


Рисунок 2. Динамика численности микромскопических грибов на разных этапах эксперимента «Биодеградация» с использованием укладки «Биопробы» с октября 2002 г. по февраль 2020 г.

Видовое разнообразие микроскопических грибов и бактерий изменялось сходным образом (рис. 3).

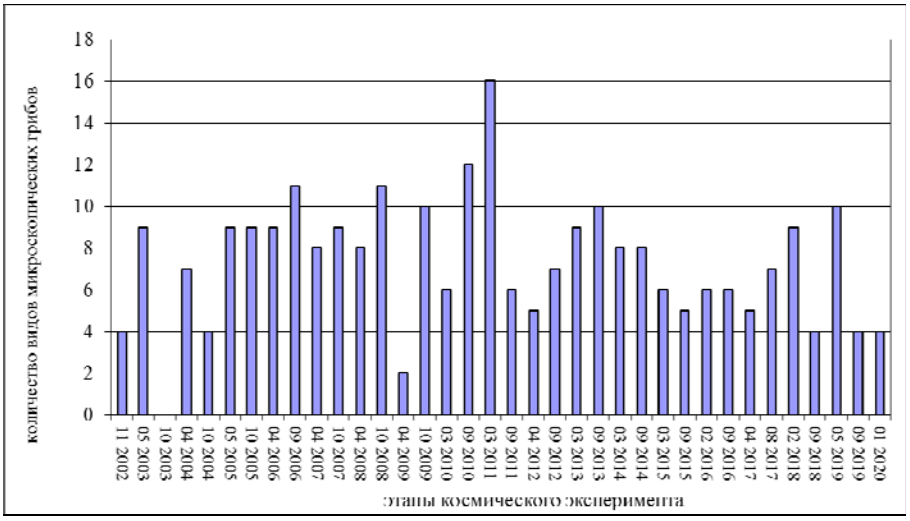


Рисунок 3. Динамика видового разнообразия микроскопических грибов на разных этапах эксперимента «Биодеградация» с использованием укладки «Биопробы» в период с октября 2002 г. февраль 2020 г.

Видовое разнообразие и количественные характеристики микобиоты на РС МКС меняется волнообразно. Можно предположить, что заселение станции происходит регулярно с прибывающими грузами и экипажем, но остаются только те виды, которые находят для себя подходящие условия и местообитания.

В результате работ сформирована коллекция чистых культур микроскопических грибов, выделенных с конструкционных поверхностей станции Мир и РС МКС на разных сроках эксплуатации (Алехова и др., 2009). Также в нее включены

культуры аналогичных видов, выделенные из природных местообитаний, используемые для сравнительных исследований.

Штаммы микроскопических грибов, освоившие конструкционные материалы и поверхности внутри РС МКС не проявляют заметных отличий от своих аналогов их наземных местообитаний, к аналогичные выводы были сделаны и в отношении бактериальных культур (Mora et al., 2019).

Список литературы:

1. Алехова Т.А., Александрова А.В., Загустина Н.А., Новожилова Т.Ю., Романов С.Ю. Микроскопические грибы на российском сегменте международной космической станции // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43, Вып. 5. С. 9–19.
2. Blachowicz A., Venkateswaran K., Wang C.C. Persistence of Fungi in Atypical, Closed Environments: Cultivation to Omics // Methods in Microbiology. Academic Press, 2018. Т. 45. С. 67-86. https://doi.org/10.1016/bs.mim.2018.07.006
3. Gu J. D. Microbial colonization of polymeric materials for space applications and mechanisms of biodeterioration: a review // International biodeterioration & biodegradation. 2007. Т. 59. №. 3. С. 170-179.
4. Mora M., Wink L., Kögler I., Mahnert A., Rettberg P., Schwendner P., et al. The International Space Station selects for microorganisms adapted to the extreme environment, but does not induce genomic and physiological changes relevant for human health // bioRxiv. Nature communications. 2019. Vol. 10, no. 1. P. 1-18. https://doi.org/10.1101/533752
5. Novikova N, De Boever P., Poddubko S., Deshevaya E., Polikarpov N., Rakova N., et al. Survey of environmental biocontamination on board the International Space Station // Research in microbiology. 2006. Т. 157. №. 1. С. 5-12.

ВОДОРОДПОТРЕБЛЯЮЩИЕ МЕТАНОГЕНЫ – ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ОБИТАТЕЛИ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Трубицын В.Э., Ошуркова В.А.

ИБФМ РАН, Пущино, Московская обл., Россия

Метаногенные микроорганизмы, по-видимому, являются одной из наиболее древних и живучих групп организмов на Земле. Их распространённость в средах с экстремальными условиями и пластичность их метаболизма, построенного на простейших субстратах, водороде и углероде, позволяет сделать их идеальными модельными организмами для изучения жизни на других планетах (Taubner et al., 2015). По данным некоторых исследований, гидрогенотрофный путь с высокой вероятностью возник раньше остальных путей метаногенеза, ещё до становления современных филумов архей (Berghuis et al., 2019).

Несмотря на наличие метана в атмосферах всех планет Солнечной системы (Rauf et al. 2015), объектов, на которых потенциально могла развиться жизнь,

относительно немного. Наиболее интенсивно изучаются Марс (Formisano et al., 2004; Reid et al., 2006; Webster et al., 2018), спутник Юпитера Европа (Shulze-Makush & Irwin, 2001; Chapelle et al., 2002) и луны Сатурна, Титан (Niemann et al., 2005; McKay, 2016) и Энцелада (Taubner et al., 2018). И хотя концентрация метана, определённая на Марсе, находится в диапазоне частей на миллиард и периодически колеблется в течение сезона (Webster et al., 2018), долгосрочная стабильность и присутствие метана в атмосфере в течение геологических периодов времени считается маловероятным из-за разложения УФ-излучением и/или химическими окислителями (Maus et al., 2020). В целом ожидается, что жизнь, если она действительно там есть, будет развиваться под поверхностью планеты, где не так много органического углерода для поддержания жизни (Chapelle et al., 2002), однако постоянным донором электронов может служить водород, возникающий в ходе многих абиогенных процессов.

Многие исследования были посвящены тому, чтобы определить, способны ли земные организмы расти в условиях, аналогичных другим планетам. Есть данные об успешном культивировании *Methanothermococcus okinawensis* в условиях, максимально приближённых к условиям Энцелады (Taubner et al., 2018). Подобные исследования, но с имитацией условий Марса, проводили с *Methanosarcina barkeri*, *Methanothermobacter wolfeii*, *Methanococcus maripalidus*, *Methanobacterium formicicum* (Goodhart & Kral, 2010), несколькими штаммами *M. soligelidi* (Serrano, 2014). Выделенные из вечной мерзлоты штаммы демонстрировали в этом случае наилучшие результаты (Serrano, 2014; Maus et al., 2020), выдерживая не только низкие температуры и давление, но также низкое содержание влаги и присутствие перхлоратов.

Таким образом, изучение метаногенных архей из вечной мерзлоты представляет большой научный интерес для дальнейших поисков модельных объектов астробиологии. Нами выделен новый штамм метаногенных архей из образцов вечной мерзлоты, взятых вблизи п. Баренцбург на территории о. Западный Шпицберген (Норвегия).

Штамм VT культивируют на среде с добавлением формиата или смеси H_2/CO_2 в качестве источников углерода и энергии. Клетки штамма представляют собой длинные извитые палочки, как одиночные, так и образующие агрегаты. В жидкой среде культура образует хлопья тёмно-серого цвета, при взбалтывании хлопья распадаются. Выделение культуры осуществлялось путём последовательных посевов на среды с антибиотиками (стрептомицин и ванкомицин). Оптимальная концентрация формиата для роста составила 5 г/л, оптимальная температура роста - 20^{o}C. Последовательность гена 16S рРНК длиной 1205 н.п. секвенирована с использованием пары универсальных

праймеров Arch21f (5′-TTCCGGTTGATCCYGCCGGA-3′) и 1378r (5′-TGTGCAAGGAGCAGGGAC-3′). Филогенетический анализ показал, что штамм VT кластеризуется с представителями рода *Methanobacterium*, ближайшим к нему родственным штаммом является *M. lacus* $17A1^T$ с подобием последовательностей 97,02%, что свидетельствует о том, что новый метаноген представляет новый вид рода *Methanobacterium.*

Работа поддержана грантом РФФИ №18-34-00334 мол_а.

Список литературы

1. Berghuis B.A., Yu F.B., Schulz F., Blainey P.C., Woyke T., Quake S.R. Hydrogenotrophic methanogenesis in archaeal phylum *Verstraetearchaeota* reveals the shared ancestry of all methanogens // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2019. V. 116. №11. P. 5037–5044.
2. Chapelle F.H., O'Neill K., Bradley P.M., Methá B.A. et al. A hydrogen-based subsurface microbial community dominated by methanogens // Nature. 2002. V. 415. №6869. P. 312–315.
3. DeLong E.F. Archaea in coastal marine environments // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1992. V. 89. №12. P. 5685–5689.
4. Formisano V., Atreya S., Encrenaz T., Ignatiev N., Giuranna M. Detection of methane in the atmosphere of Mars // Science306. 2004. P. 1758–1761.
5. Goodhart T., Kral T.A. The Effects of Perchlorate on Methane Production of Methanogens // LPI Contrib. 2010. V. 1538. P. 5524.
6. Maus D., Heinz J., Schirmack J., Airo A., Kounaves S. P., Wagner D., Schulze-Makuch D. Methanogenic Archaea Can Produce Methane in Deliquescence-Driven Mars Analog Environments // Scientific Reports. 2020. V. 10. №1. P. 1–7.
7. McKay C. P. Titan as the abode of life // Life. 2016. V. 6. №1. P. 8.
8. Niemann H.B., Atreya S.K., Bauer S.J., Carignan G.R. et al. The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe // Nature. 2005. V. 438. P. 779-784.
9. Rauf K.M., Hossieni H., Majeed D., Ibrahim R. Comparing the Atmospheric Compositions of All Planets and Giant Moons in Solar System // Journal of Astrobiology & Outreach. 2015. V. 3. №3. DOI: 10.4172/2332-2519.1000136.
10. Reid I.N., Sparks W.B., Lubow S., McGrath M. et al. Terrestrial models for extraterrestrial life: Methanogens and halophiles at Martian temperatures // International Journal of Astrobiology. 2006. V. 5. №2. P. 89–97.
11. Schulze-Makuch D., Irwin L.N. Alternative energy sources could support life on Europa // Eos. 2001. V. 82. №13. P. 150.
12. Serrano P. Methanogens from Siberian permafrost as models for life on mars // Doctoral thesis. 2014. P. 1-107.
13. Taubner R.-S., Firneis M.G., Leitner J.J., Schleper C., Rittmann S.K.-M.R. The potential of Methanogenic Life in the Solar System // European Planetary Science Congress. 2015. V. 10, P. 3–4.
14. Taubner R.S., Pappenreiter P., Zwicker J., Smrzka D. et al. Biological methane production under putative Enceladus-like conditions // Nature Communications. 2018. V. 9. №1. P. 1–11.
15. Webster C.R., Mahaffy P.R., Atreya S.K., Moores J.E. et al. Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations // Science360. 2018. P. 1093–1096.

Секция 3. Экстремальные экосистемы – модель для экзобиологических исследований (изучение криосферы Земли как модели возможных экосистем на планетах криогенного типа; экзобиология ледяных спутников планет-гигантов: возможность биологических и предбиологических циклов в условиях отсутствия солнечного света и низких температур; исследование экстремальных термофильных и психрофильных микроорганизмов)

3.2. Криобиосфера Земли и перспективы поиска жизни на планетах и телах криогенного типа

ЧТО СКРЫВАЕТ ГРЕНЛАНДИЯ?

Сидоров Д.А.

ФНЦБ ДВО РАН, Приморский край, Владивосток, Россия

Знания о биологическом разнообразии нашей планеты и ее эволюции, полезны не только для общего расширения кругозора и места в нем человека (как биологического вида *H. sapiens*), но и оказывает ощутимую пользу для народного хозяйства, например, тяжело переоценить открытие протеиназы К гидролитического фермента, выделенного из экстракта грибка *E. album* или полимеразы из термофильных бактерий *T. aquaticus*.

Настоящая работа продолжает цикл исследований по анализу зоогеографического распространения и происхождения древнепресноводных стигобионтных беспозвоночных животных, населяющих островные и континентальные подземные воды (Copilas-Ciocianu et al., 2019). Хотя находки многоклеточных беспозвоночных в экстремальных местообитаниях довольно хорошо документированы, например, обнаружение на глубине 3.6 км 17 новых видов в недрах южноафриканских рудников, но эти данные не носят массовый характер. Наше внимание привлекло недавнее исследование наших коллег, показавших возможность выживания подземных амфипод (Amphipoda) под ледником в Исландии во время ледникового периода (Kornobis et al., 2010). В этом контексте совершенно особое место занимает ряд недавних сообщений о существовании подледных озер и водотоков под ледниковым щитом в Гренландии (Chambers et al. 2019).

На данный момент при построении филогении крангониктоидных амфипод, мы столкнулись с загадкой, не позволяющей обоснованно связать разрозненные группы подземных амфипод Нового и Старого света. Данная работа акцентирует внимание на важности изучения подледниковых экосистем, что возможно позволит, в будущем, прояснить родство разобщенных популяций.

Список литературы:

1. Chambers C., Greve R., Altena B., Lefeuvre P.-M. On the possibility of a long subglacial river under the North Greenland ice sheet. The Cryosphere Discussions. Preprint. 2019. P. 1-21.
2. Kornobis E., Palsson S., Kristjansson B., Svavarsson J. Molecular evidence of the survival of subterranean amphipods (Arthropoda) during Ice Age underneath glaciers in Iceland. Molecular Ecology. 2010. V. 19. № 12. P. 2516-2530.
3. Copilas-Ciocianu D., Sidorov D., Gontcharov A. Adrift across tectonic plates: molecular phylogenetics supports the ancient Laurasian origin of old limnic crangonyctid amphipods // Organisms Diversity & Evolution. 2019. V. 19. P.191-207.

ДОМИНАНТНЫЕ МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА В ПОДЛЕДНИКОВОМ АНТАРКТИЧЕСКОМ ОЗЕРЕ ВОСТОК

DOMINANT MICROBIAL COMMUNITIES IN THE SUBGLACIAL ANTARCTIC LAKE VOSTOK

Булат С.А., Доронин М.В., Сумбатян Д.А.

НИЦ «Курчатовский институт» - Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

Целью исследования был поиск микробных сообществ в подледниковом Антарктическом озере Восток путем анализа озерной воды верхнего слоя, вошедшей в буровую скважину и замерзшей в ней в результате трех проникновений (вскрытий) в озеро (5 февраля 2012 г., 25 января 2015 г. и 3 февраля 2015 г.). Данное сообщение посвящено анализу ранее не исследованного керна льда замерзшей воды с глубины 3721 м, полученного после 2-го вскрытия озера.

Сегмент льда 3721 м был тщательно деконтаминирован в холодных и чистых (по классу чистоты) лабораторных помещениях. Однако, запах керосина (основная часть буровой жидкости) все же присутствовал при плавлении льда, свидетельствуя о следовой контаминации образца. Образец воды был сконцентрирован, и выделенная геномная ДНК была амплифицирована в ПЦР с праймерами, специфичными для области v3-v4 16S бактериальных рибРНК генов. Полученные ампликоны были клонированы и секвенированы стандартным методом по Сэнджеру. Результаты представлены в данном сообщении.

ДНК анализ выявил в целом 16 бактериальных филотипов при довольно низком покрытии генной библиотеки (55.2%), что указывает на значительное разнообразие, вскрытие которого требует применения технологий секвенирования типа NGS Illumina MiSeq and Oxford Nanopore sequencing. Вместе с тем, из 16 филотипов

только один филотип (3721v34-24) успешно прошел все контроли на контаминацию, включая сравнение с нашей собственной Библиотекой контаминантов (329 16S рибДНК филотипов на июль 2020 г.). Он оказался уникальным в плане отличий от ранее обнаруженных трех филотипов бактерий, очень вероятно населяющих озеро Восток (Bulat, 2016). Среди них до сих пор неизвестный и филогенетически неклассифицированный филотип w123-10, вероятно принадлежащий разделу *Parcubacteria* Candidatus *Adlerbacteria*, филотип 3429v3-4, показавший сходство ниже уровня рода с *Herminiimonas glaciei, Oxalobacteraceae* (*Beta-Proteobacteria*) и 3698v46-27, оказавшийся конспецифичным сразу нескольким видам *Marinilactobacillus, Carnobacteriaceae* (*Firmicutes*). Отметим, что филотипы w123-10 и 3698v46-27 представляли собой доминантные популяции – состоящие из клонов с несколькими аллельными вариантами 16S рибДНК.

Новый обнаруженный филотип 3721v34-24 еще в большей степени доминировал в генной библиотеке (41.1% клонов) и был представлен как минимум тремя аллельными вариантами. Его не удалось таксономически идентифицировать – 87.7% сходства (ниже уровня семейства) с *Mucilaginibacter daejeonensis* NR_041505 of *Bacteroidetes* (по-видимому, *Sphingobacteriaceae*). Вместе с тем идентичные ему ДНК клоны были выявлены в Genbank, например, некультивируемый и неидентифицированный клон *Bacteroidetes* DQ316809 с урановых рудников в США, а также менее сходные неидентифицированные клоны из осадочных пород другого генезиса, например, KC431957 и DQ404664.

Таким образом, в воде подледникового Антарктического озера Восток, был выявлен новый доминантный неидентифицированный и неклассифицированный ‘sediment-loving’ филотип из раздела *Bacteroidetes*, который с двумя ранее открытыми филотипами (*Parcubacteria* Candidatus *Adlerbacteria* и *Marinilactobacillus, Carnobacteriaceae, Firmicutes*), может представлять истинные микробные сообщества озера Восток. Применение технологий NGS Illumina MiSeq and Oxford Nanopore sequencing позволить вскрыть полное биоразнообразие в воде озера (пока в наиболее верхнем слое воды).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и НЦНИ в рамках научного проекта № 18-55-16004.

Список литературы:

Bulat S.A. Microbiology of the subglacial Lake Vostok: first results of borehole-frozen lake water analysis and prospects for searching for lake inhabitants // Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2016. V. 374(2059), 20140292.

ЭКЗОБИОЛОГИЯ ЛЕДЯНЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Симаков М. Б.

Независимый исследователь, Санкт-Петербург

Успешное изучение внешних областей системы при помощи космических аппаратов показало, что существует класс крупных космических объектов, которые удовлетворяют главными критериями существования биосферы: 1. наличие на космическом объекте жидкой воды в течении длительного геологического 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. Это ледяные спутники планет-гигантов — Европа, Ганимед, Каллисто, Титан, Энцелад. В данную группу можно включить и некоторые другие тела Солнечной системы — спутники Урана Ариэль, Оберон, Титания и Умбриэль; спутник Нептуна Тритон. Другие карликовые планеты внешней области, такие как Церера, Эрис, Седна и Орхус, так же попадают в категорию потенциально обитаемых миров из-за возможности существования там глубинного океана. Гравитационные взаимодействия в системе Плутон–Харон могут поддерживать наличие океана внутри обоих тел.

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 радиацией 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. Радиолиз поверхностного льда расщепляет воду на её составляющие — кислород и водород, которые частично адсорбируются поверхностью, а частично покидают её, 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. Оценки параметров такой доставки говорят о том, что до 4×10^9 моль окислителей в год может пополнять состав океанической воды.

Важным вопросом является определение возможного химического состава внутреннего океана: 1. нейтральный — система, состоящая из $Na–Mg–SO_4–H_2O$ компонентов; 2. щелочной ($Na–SO_4–CO_2$); 3. кислотный ($Na–H–Mg–SO_4$). Любой их 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.

Ганимед, крупнейший спутник нашей Солнечной системы, также имеет водно–ледяную оболочку поверх силикатной коры, которая покрывает мантию и ядро спутника. Именно океан на глубине 150 км может объяснить наличие магнитного поля у этого небесного тела. По некоторым оценкам, толщина ледовой мантии Ганимеда может достигать от 30 до 120 км, а глубина океана — до 800 км. Наличие льдов высокого давления, которые покрывают силикатную мантию на дне океана, несколько уменьшает экзобиологический потенциал этого спутника, так как они препятствуют процессам серпентинизации в силикатной коре. То же относится и к третьему ледяному спутнику — Каллисто, для которого построены аналогичные модели внутреннего строения из трех химически разных оболочек: 1. внешняя водно–ледяная (ледяная кора, внутренний водный океан, льды высокого давления на его дне); 2. каменно–ледяная мантия (смесь льдов высоко давления и хондритового материала); 3. центральное железокаменное ядро. Толщина ледяной литосферы оценивается в 135–150 км, толщина самого океана — 120–180 км. В пользу существования океана говорит и морфология ударных кратеров на поверхности, как Каллисто, так и Ганимеда. Явно видно участие жидкой воды в процессах их формирования.

Титан является, с точки зрения астробиологии, одним из наиболее интересных объектов Солнечной системы. 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.

Основное отличие Титана от спутников системы Юпитера — наличие плотной атмосферы, толщиной более 400 км, давление которой у поверхности в полтора раза превышает земное. Главный компонент атмосферы — азот, метан (1.4–4.9%), аргон с неожиданно высоким отношением $^{40}Ar/^{36}Ar$. Большинство ученых рассматривает атмосферу Титана как модель первичной восстановительной атмосферы Земли, то есть, тех условий, в которых проходили реакции абиогенного синтеза на заре возникновения жизни. Вся атмосферная химия Титана построена на радикальных реакциях под действием ультрафиолета и потоков заряженных частиц.

Один из основных процессов, требующих внимания — это взаимодействие воды с органическими соединениями, синтезировавшимися в богатой атмосфере Титана. Следует обратить внимание на количество 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.

Потенциально обитаемые миры можно обнаружить и во внешних областях Солнечной системы, за орбитой Сатурна. Например, глубина подледного океана Тритона может достигать 190 км. На поверхности зафиксированы следы 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 её плотность говорят о том, что она имеет в своем составе от 17 до 30% водного льда по массе и её недра дифференцированы. Лёд

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.

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

МИКРООРГАНИЗМЫ, СПОСОБНЫЕ К ВОССТАНОВЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗА В ХОЛОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Захарюк А.Г., Щербакова В.А.

ИБФМ РАН, Пущино, Московская обл., Россия

Железо — один из главных биогенных элементов. Это самый распространенный из всех d-элементов металл в земной коре. В свободном состоянии железо обнаружено только в метеоритах. Известно около 300 железосодержащих минералов, наиболее часто встречающимися из которых являются магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3), сидерит ($FeCO_3$), пирит (FeS_2) и ферригидрит ($Fe_5HO_8x4H_2O$). На сегодняшний день микробиологами описан полный биогенный цикл железа, осуществляемый микроорганизмами разных физиологических и филогенетических групп. Сделано много принципиально важных открытий, способствующих понимаю роли железовосстанавливающих бактерий (ЖВБ) в природных микробных сообществах экстремальных экосистем, в том числе и низкотемпературных. Температура – это важнейший фактор существования жизни, поскольку от нее зависит наличие жидкой воды. Микроорганизмы способны расти и размножаться при температурах от –15 ^oC до +122 ^oC. Приспособленные к низким температурам простые жизненные формы и микробные сообщества характеризуются крайне низкими требованиями к энергии для поддержания роста.

Объектом наших исследований являлись донные осадки озера Байкал. Байкал — озеро тектонического происхождения в южной части Восточной Сибири, самое глубокое озеро на планете. Современное значение максимальной глубины озера — 1642 м (Бухаров, 2001). Вопрос о возрасте Байкала следует считать открытым. Обычно в литературе приводится цифра в 20-25 млн. лет. Однако применение различных методов определения возраста дает значения от 20-30 миллионов до нескольких десятков тысяч лет. Если допустить, что верна традиционная точка зрения, то Байкал можно считать

и самым древним озером на Земле. Оно появилось на ранних этапах становления биосферы на нашей планете и является реликтовой экосистемой с постоянно низкой положительной температурой (t поверхностных слоев – +8 ^{o}C, t глубинных слоев – +4 ^{o}C). Не исключено, что выделенные микроорганизмы могут быть представителями древних видов прокариот, способных к литотрофному росту при низких температурах и, теоретически, входить в состав микробных сообществ экзопланет криогенного типа.

В результате длительной инкубации проб донных отложений оз. Байкал в темноте при 5, 15 и 20 ^{o}C с цитратом Fe(III), в качестве акцептора электронов, и формиатом, в качестве донора электронов, нами было получено несколько накопительных культур ЖВБ. Детальный анализ активностей накопительных культур показал, что у микробного сообщества одной накопительной культуры при 15 ^{o}C восстановление Fe(III) являлось формой анаэробного дыхания сопряженного с окислением формиата. Данная накопительная культура ЖВБ представляла для нас особый интерес и была выбрана для дальнейших экспериментов. Посев на твердую среду в анаэробных условиях позволил получить отдельные мелкие колонии черного цвета. В результате переноса отдельных колоний в жидкую среду того же состава, была получена чистая культура ЖВБ – штамм Bkl1. Клетки штамма представлены Г(-) подвижными палочками (0.5–0.6 x 2.0–4.0 мкм). С лактатом в качестве донора электронов, выделенный микроорганизм был способен восстанавливать слабокристаллический оксид Fe(III) (аналог природного ферригидрита), цитрат Fe(III) и хинон (AQDS). Через два месяца культивирования образовывалось до 6 мМ Fe(II), что составляло более 50% от начальной концентрации Fe(III) в среде. Концентрация клеток штамма при этом увеличивалась в 4 раза (от 6.8x10^{6} до 28x10^{6} кл/мл) (рис. 1).

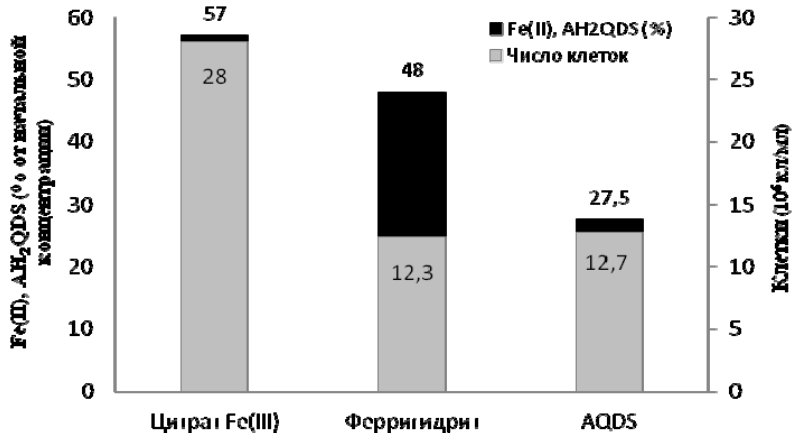


Рисунок 1. Анаэробное восстановление растворимых и нерастворимых соединений Fe(III) и AQDS и увеличение числа клеток в процессе роста штамма Bkl1 в течение 60 суток при 15^{o}C.

Филогенетический анализ полученной нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК штамма Bkl1 выявил, что изолят принадлежит к роду *Pelosinus*, семейства *Sporomusaceae,* филума *Firmicutes*. Его ближайшим родственником являлся *P. fermentans* (99.17% сходства) (Shelobolina et al., 2007). На сегодняшний день описано всего три вида рода *Pelosinus*, выделенных из различных природных и антропогенных мест, расположенных в разных странах (Moe et al., 2012). Все виды данного рода спорообразующие анаэробы, способные восстанавливать растворимые комплексы Fe(III) при наличии в среде сбраживаемого субстрата. Как и другие ферментативные бактерии, они используют трехвалентное железо для стока электронов.

Дальнейшее изучение выделенной нами чистой культуры ЖВБ позволит более полно сказать о ее физиологических особенностях, стратегиях адаптации к низким температурам и роли в железовосстанавливающем микробном сообществе холодных экосистем. Чем больше мы знаем об экстремофилах и сложнейших условиях, в которых они способны существовать на Земле, тем выше оцениваем шансы найти жизнь на других объектах Солнечной системы, в особенности на спутниках внешних планет.

Список литературы

1. Бухаров А. А. Байкал в цифрах (краткий справочник). — Иркутск: Изд-во ИП «Макаров С. Е.», 2001. — 72 с.
2. Moe W. M., Stebbing R. E., Rao J. U., Bowman K. S, Nobre M. F., M. S. da Costa and Rainey F. A. *Pelosinus defluvii* sp. nov., isolated from chlorinated solvent-contaminated groundwater, emended description of the genus *Pelosinus* and transfer of *Sporotalea propionica* to *Pelosinus propionicus* comb. nov. // IJSEM. 2012. V. 62. P. 1369 – 1376.
3. Shelobolina E. S., Nevin K. P., Blakeney-Hayward J. D., Johnsen C. V., Plaia T. W., Krader P., Woodard T., Holmes D. E., VanPraagh C. G and D. R. Lovley. *Geobacter pickeringii* sp. nov., *Geobacter argillaceus* sp. nov. and *Pelosinus fermentans* gen. nov., sp. nov., isolated from subsurface kaolin lenses // IJSEM. 2007. V. 57. P. 126 – 135.

ГИПОЛИТНЫЕ МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА ПОЧВ И ПОЧВОПОДОБНЫХ ТЕЛ ОАЗИСОВ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

Якушев А.В.[1], Соина В.С.[1], Федоров-Давыдов Д.Г.[2], Мергелов Н.С.[3]

[1]Факультет почвоведения МГУ, Москва, Россия
[2]ИФХиБПП РАН, Пущино, Московская обл., Россия
[3]ИГ РАН, Москва, Россия

На свободных ото льда прибрежных территориях Восточной Антарктиды возникли уникальные ландшафты, называемые антарктическими оазисами. Экстремальные климатические условия привели к почти полному отсутствию растений кроме мохообразных и крупных беспозвоночных животных (мезофауна), что в свою

очередь обусловило доминирование микробных биоплёнок как на поверхности, так и на глубине до нескольких сантиметров (гиполитные сообщества), где условия для жизни микроорганизмов менее экстремальные, чем на поверхности. Это биопленки интересны тем, что являются аналогами древних биопленок, существовавших на суше в период до массового распространения сухопутных беспозвоночных животных и растений. Целью исследования было сравнить гиполитные микробные сообщества почв и почвоподобных тел оазисов Восточной Антарктиды с аналогичными микробными сообществами умеренной природной зоны - биопленками на поверхности обычных почв: торфяной, урбанозёма и выветрелых стенок почвенных лизиметров Почвенного стационара МГУ на Воробьевых горах. Исследование проводилось на территории оазиса Холмы Ларсеманн Земли принцессы Елизаветы (залив Прюдс, Восточная Антарктида). Местность представляет собой свободную ото льда холмистую территорию площадью около 50 км^2, которая глубоко расчленена ледниковыми долинами. Изучались криосоли со слабо развитыми гиполитными органоминеральными горизонтами, расположенные во влажных долинах оазиса (Mergelov et al., 2020). Так же исследования проводились на территории оазиса Ширмахера – района в центральной части Берега Принцессы Астрид, Земля Королевы Мод. Местность представляет собой мелкосопочник с холмами разделенными ложбинами, в которых располагаются многочисленные озёра. Изучались гиполитные сообщества почв расположенных по берегам озера Черного.

Был проведен 6-летний полевой эксперимент по изучению развития микроорганизмов в гиполитных горизонтах *in situ* с помощью модернизированного метода пластинок обрастания Росси-Холодного (Якушев, Бызов, 2009, Тимофеева Якушев, 2018). Стерильные предметные стекла (75 × 25 мм) экспонировались в вертикальном положении непосредственно под поверхностью в гиполитных горизонтах почв с марта 2010 г. по март 2016 г. (Mergelov et al., 2020). Метод основан на способности микробных клеток адгезироваться к инертным поверхностям и развиваться в прикрепленном состоянии на границе жидкой и твердой фаз, где концентрация питательных веществ повышена за счет адсорбции (Якушев, 2014). В гиполитном горизонте стекло позволило имитировать прикрепление микроорганизмов к полупрозрачным зернам кварца и процесс колонизации микроорганизмами новых минеральных поверхностей. По окончании периода экспонирования стекла аккуратно изымали из гиполитных горизонтов, не допуская скользящих движений, чтобы не счистить обрастания со стекла. После этого пластинки замораживали до передачи в лабораторию, а затем высушивали. Микробные обрастания исследовались с помощью

световой безартифактной микроскопии (свет по Келлеру) с фотофиксацией картин обрастания на цифрую камеру “DCM-510”. Морфометрические измерения микробных клеток были выполнены с использованием программы ScopePhoto v3.1 (http://www.scopetek.com/).

В ходе полевого эксперимента было установлено:

1. Микроорганизмы гиполитного сообщества (цианобактерии, грибы с септированным и несептированным (*Mucoromycota*) мицелием, дрожжи, зелёные и диатомовые водоросли, гетеротрофные одноклеточные бактерии) успешно колонизировали за 6 лет новые минеральные поверхности. По всей видимости, скорости микробного роста и колонизации намного больше и колонизация новой минеральной поверхности возможна за один теплый сезон, так как часто на пластинках преобладали отмирающие и переходящие в покоящуюся стадию клетки микроорганизмов, что означает: каждый новый теплый сезон происходит обновление микробной биомассы. Процессу обновления микробной биомассы способствуют и почвенные животные, найденные на пластинках обрастания: раковинные амёбы, нематоды и панцирные клещи.

2. Несмотря на один срок отбора образцов (март), микробные комплексы (судя по морфологии грибов и нитчатых цианобактерий) находились на разных стадиях развития: на одних рост только начинался, на других было множество вегетирующих клеток, на третьих преобладало образование покоящихся структур. Подобная гетерохронность гиполитных сообществ в условиях антарктических оазисов связана с разным временем достижения благоприятной температуры и влажности в различных микролокусах.

3.Среди фотоавтотрофов преобладали типичные эврибионтные (*Phormidium* sp.) и эпилитные роды (*Calothrix*, *Scytonema*, *Nostoc*, *Gloeocapsa*, *Stigonema*) цианобактерий (являющихся фотобионтами лишайников), а так же зелёных и диатомовых водорослей, однако максимум их обилия был не у самой поверхности почвы, а в центральной части стекла обрастания, что указывает на переход эпилитных видов фототрофов к гиполитному существованию, где условия для жизни лучше.

4. Далеко не во всех вариантах преобладали цианобактерии среди фототрофов: часто фоторофный блок представлял собой ассоциацию одноклеточных и нитчатых зелёных водорослей без примеси цианобактерий.

5. Клетки цианобактерий и водорослей, грибов были окрашены защитными пигментами в буро-оливковый, коричневый и красный цвета для защиты от солнечной радиации. Цианобактерии преимущественно нитчатые и гетероцистные, так как в

условиях полярного лета азотфиксация в негетероцистных формах не возможна из-за отсутствия темного времени суток.

6. Грибы и гетеротрофные бактерии строго приурочены к биоплёнкам, глубже их нет, так как нет животных зарывающих вглубь почвы органические остатки при своём движении и нет корней, которые проникают вглубь почвы.

7. Водоросли и цианобактерии - биоплёнкообразователи с обильным внеклеточным полисахаридным матриксом (в том числе и капсулами) образуют компактные шаровидные микроколонии и не образуют протяженных биоплёнок даже за 6 лет экспозиции пластинок обрастания. Это может свидетельствовать о невыгодности организации протяженных колоний в условиях гиполитных сообществ почв и грунтов антарктических оазисов. Тем более что часто основу биопленок составляли роды цианобактерий, формирующие подвижные тяжи или диатомовые водоросли, способные к движению.

8. Отсутствует мицелий актиномицетов, который, как правило, активно развивается в сухие периоды в обычных почвах. Периоды просыхания почв слишком коротки, либо сочетание низких температур и сухости не позволяет актиномицетам развить мощный мицелий.

9. Грибной мицелий может быть очень обилен на пластинках обрастания, но разнообразие грибов крайне низко. Как правило, доминирует один морфотип мицелия, нет даже разнообразия форм грибных спор, которое могло свидетельствовать о потенциальном видовом разнообразии. Возможно, развитие части грибов происходит из проросших соредий лишайников, ибо мохово-лишайниковые ассоциации являются другими доминантами исследованных территорий.

10. Для грибов характерен паразитизм на нитчатых цианобактериях и мхах, проявляющийся в проникновении гиф в живые клетки фототрофов. Это явление вызвано дефицитом разлагающихся органических остатков в почве - основной пищи грибов.

11. Одноклеточные зелёные водоросли целенаправленно адгезируются вдоль грибных гиф, что не характерно для почв гумидных регионов. Видимо в условиях гиполитных сообществ водоросли получают от грибов какие-то питательные вещества.

12. Существует 7 основных типа обрастаний, которые можно расположить в ряд по мере уменьшения экстремальности местообитания: 1. Нет обрастания - сухие каменистые пустоши; 2. Единичные глобулы (шаровидные колонии в полисахаридном внеклеточном матриксе) одного вида цианобактерий, даже не выросшие за 6 лет на стекле, а случайно прилипшие к стеклу из прилегающего субстрата; 2.

Монодоминирование одной цианобактерии; 3. Обильное обрастание с небольшим разнообразим цианобактерий с примесью диатомей и зелёных водорослей и, часто, обильным грибным мицелием – видимо, это днища влажных долин, где периодически течет вода; 4. Разнообразные сообщества под мхами (есть протонема, ризоиды и веточки листостебельных мхов) или печеночниками с большим разнообразием микроорганизмов: диатомеи, цианобактерии, грибы и т.д.; 5. Из фототрофов встречаются только крупные оливковые одноклеточные зелёные водоросли (возможно жёлто-зеленые), нитчатые зелёные, гриб (как правило, один вид) и мхи; 6. Обрастание состоит только из гетеротрофов - грибы, бактерии. Встречаются останки мхов. Видимо в последнем варианте в мощных подушках мхи затеняют водорослей и цианобактерий.

Работа была поддержана грантом МГУ имени М.В.Ломоносова для поддержки ведущих научных школ МГУ «Депозитарий живых систем Московского университета» в рамках Программы развития МГУ.

Список литературы

1. Тимофеева Е. А., Якушев А. В. Новые подходы в обучении почвоведению и экологии в рамках Школы юного почвоведа-эколога // Материалы докладов второй открытой конференции молодых ученых ПОЧВОВЕДЕНИЕ: ГОРИЗОНТЫ БУДУЩЕГО. 2018. ГЕОС Москва, 2018. С. 133–138.
2. Якушев А. В., Бызов Б. А. Гидролазная активность как показатель состояния микробного сообщества вермикомпоста // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2009. № 2. С. 41-46.
3. Якушев А.В. Микромир почвы: тема урока в музее // Труды Государственного Дарвиновского музея Вып. XVIII. Государственный Дарвинский музей Москва, 2014. С. 203–215.
4. 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 reports. 2020. V.10, 10277.

ГИПОБИОЗ ОДНОКЛЕТОЧНЫХ ЭУКАРИОТ: МЕХАНИЗМЫ И СПЕЦИФИКА В КОНТЕКСТЕ АСТРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Малявин С.А., Шмакова Л.А.

ИФХиБПП РАН, Пущино, Московская обл., Россия

Условия большей части вселенной несовместимы с тем, что мы привыкли называть жизнью. Существование подходящих для жизни условий предполагается в Солнечной системе в настоящее время лишь для подземных зон некоторых планет и их спутников (Марс, Энцелад, Европа), а также в прошлом для поверхности Марса. Даже на Земле значительная часть жизни существует в условиях, предполагающих

регулярное замедление метаболизма (гипобиоз). Организмы же, которые могли бы обитать в настоящее время на других телах Солнечной системы, — либо могли бы быть успешно перенесены с Земли или на Землю — очевидно должны обладать способностью к гипобиозу.

В контексте астробиологической тематики основное внимание уделяется изучению гибернации млекопитающих и покоящимся формам бактерий. Млекопитающие представляют собой модель человека, и мотивацией для их изучения служит необходимость гибернации экипажа при длительных (дольше 2–3 лет) перелетах. Бактерии же интересны как наиболее вероятный компонент внеземных экосистем, а также потенциальные межпланетные контаминанты. Таким образом, наиболее пристальное внимание уделяется самым простым и самым сложно организованным организмам. Лишь несколько экспериментов были направлены на изучение устойчивости покоящихся форм некоторых многоклеточных и одноклеточных (протисты) эукариот к условиям космической станции и открытого космоса.

Механизмы гипобиоза работают на разных уровнях организации: клеточном, тканевом, организменном. Чем сложнее организм, тем труднее восстановить согласованную работу его систем даже после восстановления клеточного метаболизма. У одноклеточных организмов эта проблема отсутствует, и наблюдаемые экспериментально эффекты, таким образом, можно однозначно отнести к проявлениям клеточных механизмов. Вместе с этим, клетка одноклеточного является организмом со всеми присущими ему функциями, что позволяет исследовать отложенные эффекты гипобиоза, например, в ряду поколений. При этом клетки бактерий устроены проще, чем клетки протистов; они не обладают ни сложно организованной системой мембран, включающей ядро, ни центром организации микротрубочек, ни митохондриями.

Несмотря на очевидные успехи в изучении биохимических механизмов низкотемпературного и осмотического стресса, биофизики замерзания, в разработке технологий криоконсервации клеток, тканей, органов и зародышей, многие аспекты остаются недостаточно изученными. Так, открыт вопрос о сохранении активности большинства ферментов в процессе замораживания-оттаивания, не определены пределы обратимого повреждения внутриклеточных мембран и цитоскелета микрокристаллами льда и в процессе витрификации, неизвестна скорость деградации макромолекул под влиянием фонового ионизирующего излучения. Одноклеточные эукариоты являются хорошими модельными объектами для подобного рода исследований.

В рамках проблемы межпланетной контаминации рассматривается два направления: прямое (занос на небесные тела живых организмов с Земли) и обратное (занос на Землю внеземной жизни). В качестве наиболее возможных контаминантов в обоих случаях рассматриваются бактерии, как организмы, обладающие наиболее широким физиологическим репертуаром и спектром устойчивости. Однако покоящиеся стадии многих одноклеточных и многоклеточных эукариотических организмов обладают не менее впечатляющей устойчивостью к разного рода неблагоприятным воздействиям и, благодаря микроскопическим размерам, также могут быть занесены на другие планеты. Многие виды протистов являются факультативными или облигатными анаэробами и, по-видимому, могут оставаться физиологически активными при отрицательных температурах в наличии жидкой воды (например, в гиперсоленых водоемах). В случае наличия, например, под поверхностью Марса активных форм жизни, аналогичных земным бактериям, попавшие туда земные протисты могут встроиться в экосистему.

Что касается обратной контаминации, этот сценарий, в данном случае, предполагает появление эукариотического уровня организации вне Земли. Современные гипотезы возникновения эукариот предполагают, что это событие (или события) произошли до насыщения земной атмосферы кислородом, поэтому предполагаемый бескислородный характер атмосферы Марса теоретически не препятствует возможности возникновения там форм жизни, аналогичных эукариотам. Однако во время, когда на Земле, согласно оценкам, появились эукариоты, — около 2 млрд. лет назад — на поверхности Марса, опять-таки согласно оценкам, уже около миллиарда лет не было жидкой воды. Тем не менее, возможность эволюции внеземной жизни до эукариотического уровня полностью исключать нельзя, так же как и, соответственно, возможность обратной межпланетной контаминации.

GREEN ALGAE AND CYANOBACTERIA FROM PERMAFROST

Vishnivetskaya T.A.[1,2], Almatari A.L.[1], Spirina E.V.[2], Wu X.[1], Williams D.E.[1], Pfiffner S.M.[1], Rivkina E.M.[2]

[1]University of Tennessee, Knoxville, TN, USA

[2]Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Pushchino, Russia

Earth is a habitable planet and contains a diverse array of life forms ranging from simple prokaryotic archaea and bacteria to complex multicellular eukaryotic organisms such as fungi, plants and animals (including humans) (5). Earth is the only place that life is known to exist in the Universe.

The better we understand life on Earth, the greater chance we have for successfully finding it elsewhere. There are as many as 40 billion Earth-sized planets orbiting in the habitable zones (1) of space possessing the right temperature for liquid water to exist on their surface (4). Evidence of microfossils similar to Cyanobacteria was discovered in freshly fractured slices of the interior surfaces of the carbonaceous meteorites (3). Cyanobacteria are able to convert solar energy into chemical energy synthesizing carbohydrate molecules from carbon dioxide, water and sunlight (2) and they could thrive in extremely hostile habitats. Therefore, photosynthetic microorganisms are expected to be the first organisms to look on planets, where carbon dioxide, moisture and sunlight are available. Keeping in mind that cyanobacteria and green algae possess metabolic versatility and resistance to environmental stresses we asked the following questions. Could cyanobacteria and unicellular green algae be revived from permafrost? How long could photosynthetic microorganisms survive in permafrost? What is their biodiversity? What could we learn from metagenomes about distribution and diversity of cyanobacteria and unicellular green algae? During this work we integrated cultivation studies of Siberian permafrost and analyses of metagenomes from different locations in the Arctic with the aim of obtaining new insights into the community of photosynthetic microorganisms in perennially frozen deposits. Cyanobacteria and microalgae have been described in Arctic aquatic and surface soil environments, but their diversity and ability to withstand harsh conditions within the permafrost are still largely unknown. Community structure of photosynthetic organisms in permafrost sediments was explored using Arctic metagenomes available through the MG-RAST. Sequences affiliated with cyanobacteria represented from 0.25 to 3.03% of total sequences, followed by sequences affiliated with Streptophyta (algae and vascular plants) 0.01-0.45%, and Chlorophyta (green algae) 0.01-0.1%. Enrichment and cultivation approaches revealed that cyanobacteria and green algae survive in permafrost and they could be revived during prolonged incubation at low light intensity. Among photosynthetic microorganisms isolated from permafrost, the filamentous *Oscillatoria*-like cyanobacteria and unicellular green algae of the genus *Chlorella* were dominant. Our findings showed that cyanobacteria and green algae survive in million-year-old permafrost and we assume that they likely to be found on other planets.

This work was supported by the National Science Foundation (DEB-1442262 and 1460058), the Russian Federal Target Program (0191-2019-0044), the Russian Academy of Sciences (0578-2014-0021), RP19-280, the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (19-04-01240 and 19-29-05003mk) and partially supported by the U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Biological and Environmental Research, Genomic Science Program under Award Number DE-SC0020369.

1. Akeson RL, Chen X, Ciardi D, Crane M, Good J, Harbut M, Jackson E, Kane SR, Laity AC, Leifer S, Lynn M, McElroy DL, Papin M, Plavchan P, Ramírez SV, Rey R, Braun Kv, Wittman M, Abajian M, Ali B, Beichman C, Beekley A, Berriman GB, Berukoff S, Bryden G, Chan B, Groom S, Lau C, Payne AN, Regelson M, Saucedo M, Schmitz M, Stauffer J, Wyatt P, Zhang A. 2013. The NASA Exoplanet Archive:

Data and Tools for Exoplanet Research. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 125:989.

2. Amesz J. 2000. Photosynthesis, 1 ed, vol 15. Elsevier.
3. Hoover RB. 2011. Fossils of Cyanobacteria in CI1 Carbonaceous Meteorites: Implications to Life on Comets, Europa, and Enceladus. Journal of Cosmology 13.
4. Lammer H, Bredehöft JH, Coustenis A, Khodachenko ML, Kaltenegger L, Grasset O, Prieur D, Raulin F, Ehrenfreund P, Yamauchi M, Wahlund J-E, Grießmeier J-M, Stangl G, Cockell CS, Kulikov YN, Grenfell JL, Rauer H. 2009. What makes a planet habitable? The Astronomy and Astrophysics Review 17:181-249.
5. Lissauer JJ. 1999. How common are habitable planets? Nature 402:C11-4.

Секция 4: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ И МЕХАНИЗМОВ ВЫЖИВАЕМОСТИ ЗЕМНЫХ ОРГАНИЗМОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И КОСМОСА (ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ К УСЛОВИЯМ КОСМОСА; РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА НИЗКИХ ЗЕМНЫХ ОРБИТАХ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ ДНК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ И ПРОТОНОВ.

Алчинова И.Б.[1,2], Полякова М.В.[1,2], Пронина И.В.[2], Карганов М.Ю.[1,2], Иноземцев К.О.[3], Satoshi Kodaira[4]

[1] ГНЦ ФМБЦ им.А.И.Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия
[2] ФГБНУ НИИОПП, Москва, Россия.
[3] ГНЦ РФ ИМБП РАН, Москва, Россия.
[4] National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Japan

Целью космического эксперимента «Феникс» является получение новых данных о воздействии факторов космического пространства на состояние генетического аппарата и выживаемость высушенных лимфоцитов человека и клеток костного мозга мыши. Ампулы с клетками в пеналах и укладках, снабженных трековыми детекторами, были размещены в трех разных местах в герметичном отсеке РС МКС: СМ, МИМ2 и СО-1. Контрольные ампулы с клетками и необходимое количество трековых детекторов были оставлены в условиях лаборатории. Было показано, что степень фрагментации ДНК зависит от дозы напрямую. Более мелкие фрагменты ДНК были обнаружены в образцах, облученных на модуле СО-1, где мощности доз были максимальными (Karganov M Yu, 2017, Алчинова И.Б., 2017).

Образцы, использованные в настоящей серии экспериментов, по своему составу идентичны полетным. Суспензию клеток костного мозга мыши (10^6 кл/100 мкл) вносили в легкоплавкий агарозный гель и лиофилизировали. Нанесение образцов на стекла обусловлено конструктивными особенностями установки, на которой

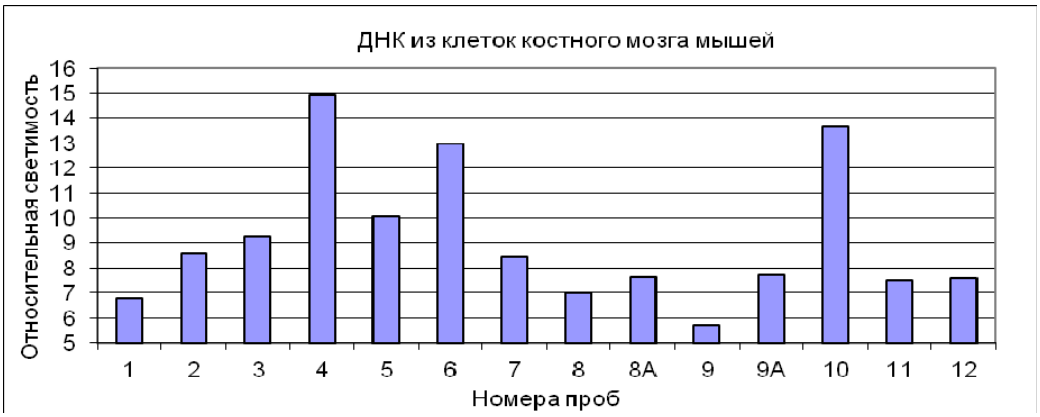
осуществлялось облучение заряженными частицами и ионами, являющимися компонентами космического излучения. Параметры облучения и дозы соответствующих проб: **1** – Ne 230 MeV/amu, 0.1 Gy; **2** – Ar 500 MeV/amu, 0.1 Gy; **3** – Kr 400 MeV/amu, BF 10.44 mm, 0.1 Gy; **4** - Kr 400 MeV/amu, 0.1 Gy; **5** – H 230 MeV, 0.1 Gy; **6** - H 230 MeV, 0.25 Gy; **7** - H 230 MeV, 0.5 Gy; **8** – H 6 MeV, 10 мкм лексановая пленка, $2 \cdot 10^6$ частиц/cm^2; **8A** – внутренний контроль, не облучали; **9** – C 6 MeV/amu, 10 10 мкм лексановая пленка, $2 \cdot 10^6$ частиц/cm^2; **9A** - внутренний контроль, не облучали; **10** – смешанное облучение Kr 400 MeV/amu: BF 1.14 mm, 0.1 Gy + BF 31.82 mm, 0.1 Gy; **11** – транспортный контроль; **12** – лабораторный контроль.

После облучения из клеток выделяли ДНК с помощью фенольного метода. Концентрацию и чистоту выделенной ДНК оценивали при измерении оптической плотности полученного раствора (Nanodrop,“Thermo Scientific”, США) при 260 нм по сравнению с поглощением ТЕ-буфера. Пробы выравнивали по количеству содержащейся ДНК.

Для работы были использованы праймеры для проведения ПЦР в реальном времени с интеркалирующим красителем SYBR Green. ПЦР в реальном времени проводили с праймерами, специфичными к исследуемому гену *GAPDH*, с использованием смеси "qPCRmix-HS SYBR" компании «ЗАО Евроген» (кат. № РК147S) и интеркалирующего красителя SYBRGreen, входящего в состав смеси. Измерение флюоресценции проводили на стадии элонгации. Метод ПЦР в реальном времени очень чувствителен к ошибкам пипетирования и различного рода контаминациям. В связи с этим, смесь для реакции готовили в отдельном ламинаре, с использованием отдельного набора пипеток с одноразовыми стерильными носиками. Все реакции ставили в трёх повторах. Анализ проводили на амплификаторе CFX96 Touch™ Real-Time PCR Detection System, Bio-Rad, США. Температурный режим ПЦР указан в таблице 1. ПЦР проводили по следующей программе: предварительная денатурация - 10 мин., +95°C (один цикл); денатурация - 15 сек., +95°C, отжиг/элонгация - 1 мин., +60°C (40 циклов). В качестве отрицательного контроля (К-) использовали деионизованную воду, в качестве положительного контроля использовали суммарную ДНК. Цикл, на котором происходит выход кривой ПЦР (резкое, экспоненциальное возрастание уровня флюоресценции), называется пороговым (Ct). Именно эта величина является ключевой для дальнейшей обработки данных, полученных в ходе ПЦР в реальном времени (РВ-ПЦР). Результаты (Ct) были усреднены для трёх повторов по каждому из образцов. В работе измеряли изменение уровня транскрипционной активности гена *GAPDH* в

различных образцах, для этого производили вычисление разности между Ct для отрицательного контроля и Ct для исследуемых образцов: ΔCt= Ct (образец) – Ct (К-). Результаты РВ-ПЦР (значения ΔCt) были перенесены в программу MO Excel для дальнейшей обработки (Рис.1).

Как показано на рис. 1, интенсивность флуоресценции всех 4-х контрольных образцов (8a, 9A, 11, 12) практически одинакова. Таким образом, транспортировка не оказывала влияния на исследуемые параметры.



Относительная интенсивность флуоресценции Sybr Green I-продуктов зависит от соотношения краситель / пара оснований (Zipper H., 2004). Поскольку изучаемый ген GAPDH chr12:6,533,927-6,538,375(GRCh38/hg38) не имеет копий в геноме, мы можем ожидать, что чем выше уровень флуоресценции, тем больше количество фрагментов ДНК после облучения. Исходя из этого предположения, ион с большими потерями энергии (Ar, ок. 90 КЭВ / мкм) приводит к большему количеству фрагментов, чем Ne, прибл. 40 КЭВ/мкм (образцы 2 и 1, соответственно). Облучение ионами Kr (420 КЭВ / мкм) в той же дозе приводило к усилению фрагментации (образец 4). Увеличение дозы протонного облучения имеет двухступенчатый эффект. Доза 0,25 Гр приводит к более интенсивной фрагментации, чем 0,1 Гр (образцы 6 и 5, соответственно). При увеличении дозы до 0,5 Гр, уровень флуоресценции уменьшается (образец 7). С нашей точки зрения, это может быть связано с повреждением гена GAPDH и снижением копийности при анализе ПЦР в реальном времени. Следует отметить, что такая доза эквивалентна дозе, накопленной за 2 года космического полета. Два образца облучали аналогичными дозами (образцы 6 и 10, 0,25 и 0,2 Гр, соответственно). Интересно, что уровень флуоресценции и, как мы полагаем, фрагментации был практически одинаковым. Образцы, облученные протонами и ионами углерода и покрытые пленкой лавсана, показали уровень флуоресценции вблизи контрольных значений.

Длительное (до 2 лет) экспонирование образцов высушенных клеток во внутренней среде орбитальной космической станции позволит на качественно новом уровне уточнить степень медицинских рисков, обусловленных фактором космической радиации, при освоении человеком околоземного космического пространства и осуществлении межпланетных полетов.

Список литературы:

1. Karganov M Yu, Alchinova I B, Yakovenko E N, Kushin V V, Inozemtsev K O, Strádi A, Szabó J, Shurshakov V A, Tolochek R V. The "PHOENIX" Space Experiment: Study of Space Radiation Impact on Cells Genetic Apparatus on Board the International Space Station. // Journal of Physics: Conf. Series **784** (2017) 012024, (6pp), doi:10.1088/1742-6596/784/1/012024
2. Алчинова И.Б., Яковенко Е.Н., Кушин В.В., Иноземцев К.О., Карганов М.Ю., Баранов В.М. Космический эксперимент «Феникс»: предварительные итоги. // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т. 51. № 7 (спецвыпуск). С. 26-30. **DOI**: 10.21687/0233-528X-2017-51-7
3. Zipper H., Brunner H., Bernhagen J., Vitzthum F. Investigations on DNA intercalation and surface binding by SYBR Green I, its structure determination and methodological implications. // Nucleic Acids Research 32(12), e103 (2004).

УСТОЙЧИВОСТЬ БАКТЕРИОФАГА DT57C К ОБЛУЧЕНИЮ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В УСЛОВИЯХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ И НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Сухова Е.И.[1], Воробьёва Е.А.[1], Чепцов В.С.[1, 2], Белов А.А.[1], Складнев Д.А.[3], Павлов А.К. [4]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия;
[2]ИКИ РАН, Москва, Россия;
[3] ИНМИ РАН, Москва, Россия;
[4]ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

При оценке пределов жизнеспособности земных форм жизни в качестве объекта обычно исследуют бактерии или грибы, почти не уделяя внимания вирусам. Однако самыми многочисленными биологическими объектами на Земле являются именно вирусы, численность которых превосходит суммарное количество всех организмов. Общее количество вирусов оценивается в $\sim 10^{30}$ в океанах и $\sim 10^{31}$ на всей планете (Breitbart, Rohwer, 2005), при этом наибольшая часть вирусов — это бактериофаги (Hatfull, Hendrix, 2011). Для вирусов характерно полное отсутствие метаболизма и аппарата трансляции, в связи с чем их существование возможно лишь при наличии организмов-хозяев. По этой причине они могут рассматриваться в качестве потенциальных биомаркеров в астробиологических исследованиях. Тем не

менее, исследования устойчивости вирусов к воздействию экстремальных факторов внеземного пространства на сегодняшний день единичны. В качестве основного фактора, ограничивающего сохранение организмов и биомолекул за пределами Земли, рассматривается ионизирующая радиация. Условия (температура, давление, состав атмосферы, концентрация воды и др.), в которых происходит облучение, существенно влияют на радиационные эффекты. Принимая во внимание вышесказанное, мы исследовали устойчивость бактериофага DT57C к облучению ускоренными электронами в условиях низкого давления и низких температур.

Образец бактериофага DT57C был облучён электронами высоких энергий (~1 МэВ) в дозах 5 кГр и 10 кГр в условиях низкого давления (~0.01 торр) и низких температур (от - 50°C до -165°C) с целью оценки возможной длительности сохранения вирусов в открытом космосе и на различных объектах Солнечной системы. Образцы бактериофага (в жидкой питательной среде LB и в монтмориллоните) помещали в климатическую камеру, которая была разработана для моделирования внеземных условий, и позволяющую поддерживать низкие температуры и низкое давление при облучении. Был поставлен контроль температуры и давления, для чего некоторые образцы помещались на 10 минут в камеру при давлении 0.01 торр и температуре -150°C. Для иммобилизации, 1 мл суспензии фага в среде LB был внесен в 2 г стерильного (прокаленного при 600°C) монтмориллонита. Затем монтмориллонит с внесенными в него фагами был тщательно перемешан стерильной стеклянной палочкой, высушен при 28°C, растерт стерильным пестиком и разделен на несколько навесок для последующего облучения при разных температурах и давлении 0.01 торр.

Подсчёт численности активных после облучения фагов проводили двухслойным методом. Культурой-хозяином бактериофага DT57C являлся штамм *Escherichia coli* HS 3-104. Посев выполнялся на среде LB. Общую численность фагов определяли с помощью эпифлуоресцентной микроскопии с красителем акридиновым оранжевым.

На основании полученных данных нами был рассчитан условный показатель вирулентности фагов как процентное отношение численности, определенной двухслойным методом, к общей численности, выявленной методом эпифлуоресцентной микроскопии (Рисунок 1). В градиенте температур от -50°C до -165°C при дозе облучения 5 кГр число вирулентных фагов в жидкой культуре составляло 125-69% от общего числа, то есть способность фагов к инфицированию клеток-хозяев понижалась как в зависимости от облучения, так и в зависимости от понижения температуры облучения. Для образцов, облученных дозой 10 кГр этот показатель – 2-5% от общего

числа для температур -50°C и -165°C. Это свидетельствует о том, что с увеличением дозы происходит не только снижение общей численности фаговых частиц, но и потеря вирулентности сохранивших нативную ДНК фагов. Стоит отметить, что в образцах, облученных дозой 10 кГр, при культивировании и подсчете численности методом эпифлуоресцентной микроскопии, наблюдалось возрастание численности фагов с понижением температуры. Максимум численности наблюдался при температуре -150°C. Более высокая устойчивость фаговых частиц с понижением температуры, при которой проводилось облучение, вероятно связано с торможением свободных радикалов при низких температурах.

В монтмориллоните вирулентность была ниже, чем в жидкой среде LB (Рисунок 2). В контрольных образцах численность вирулентных фагов составила 9-12% от общей численности, что в 5 раз ниже по сравнению с жидкой средой. После экспонирования при температурах -50°C и -165°C при дозе облучения 5 кГр число вирулентных фагов составляло 10 и 4% от общего количества вирусных частиц, что на порядок отличается от жидкой среды, однако мало отличается от контроля. Кроме того, так же, как и в жидкой среде, наблюдается сохранение более высокой численности фаговых частиц с понижением температуры облучения.

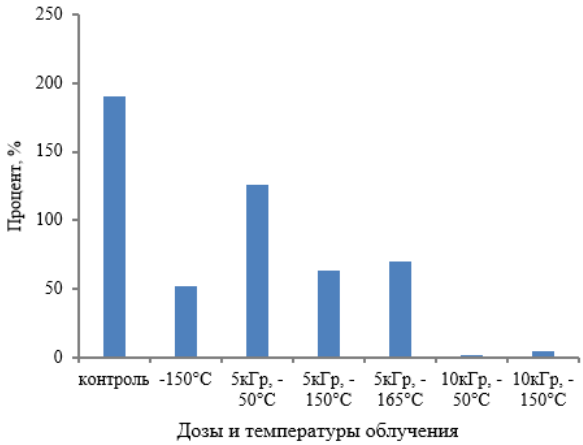


Рисунок 1. Показатель вирулентности фага в жидкой среде.

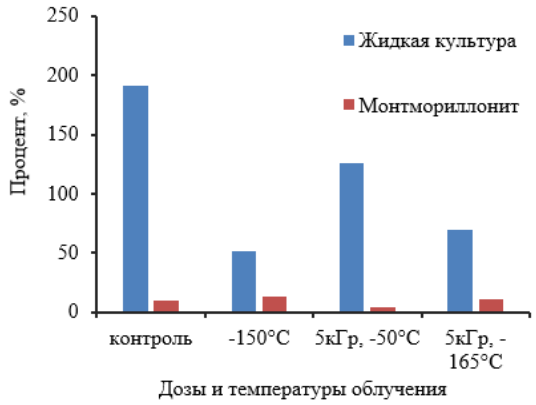


Рисунок 2. Сравнение показателей вирулентности фага после облучения в разных средах.

Полученные данные позволяют дать оценку, как долго фаг мог бы сохранить вирулентность в реголите Марса или во льду Европы при постоянном накоплении радиационных повреждений. Интенсивность ионизирующего излучения на поверхности современного Марса составляет около 0.076 Гр / год (Hassler et al., 2014). Доза радиации 10 кГр может накапливаться в поверхностном слое реголита за, примерно, 130000 лет. Это значит, что, по крайней мере, в течение такого периода времени в современных

холодных условиях Марса фаги могут потенциально сохранять вирулентность. На глубине 5 м интенсивность излучения составляет около 5 мГр / год, и доза в 10 кГр может быть накоплена в течение 2 миллионов лет. Рассуждая аналогично, можно предположить, что фаговые частицы могут сохраняться во льду Европы не менее 30 лет на глубине 10 см и не менее 1000 лет на глубине 1 м (Pavlov et al., 2019). Подсчитано, что большинство марсианских метеоритов достигают Земли после тысяч и миллионов лет полета в открытом космосе. Исходя из расчетных данных по интенсивности излучения внутри метеоритов в межпланетном пространстве в пределах Солнечной системы, которая составляет не более 0.25 Гр / год (в зависимости от размеров и состава) (Horneck et al., 2002), результаты исследования позволяют предположить потенциальное сохранение вирулентности фагами в течение не менее 40 тысяч лет в открытом космосе (т.е. накопление дозы 10 кГр за этот период).

В результате мы можем сказать, что фаг DT57C устойчив к облучению ускоренными электронами в высоких дозах при низких температурах и низком давлении. Фаг сохраняет высокую численность и вирулентность после облучения.

Иммобилизованная в монтмориллоните культура фага проявляет повышенную устойчивость к облучению, по сравнению с фагами в жидкой среде, что связано с отсутствием воды в образце. В исследованных средах устойчивость фага повышается при понижении температуры облучения.

Теоретический расчет позволяет предполагать длительное сохранение способных к переходу в вирулентное состояние фаговых частиц во внеземных условиях.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-02-00470.

Список литературы

1. Breitbart M., Rohwer F. Here a virus, there a virus, everywhere the same virus? //Trends in Microbiology. – 2005. – V. 13. – №. 6. – P. 278-284.
2. Hassler D. M. et al. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover //Science. – 2014. – V. 343. – №. 6169. – P. 1244797.
4. Hatfull G. F., Hendrix R. W. Bacteriophages and their genomes //Current Opinion in Virology. – 2011. – V. 1. – №. 4. – P. 298-303.
5. Horneck G.et al. Viable transfer of microorganisms in the Solar System and beyond // Astrobiology: The Quest for the Conditions of Life. Horneck G., Baumstark-Khan C. (Eds.). Berlin, Germany: Springer. 2002. P. 57–76.
6. Pavlov A. et al. Survival of radioresistant bacteria on Europa's surface after pulse ejection of subsurface ocean water //Geosciences. – 2019. – V. 9. – №. 1. – P. 9.

ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕННОЙ РАДИАЦИИ И ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ КУЛЬТИВИРОВАНИИ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ ВО ВНЕЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

Буряк А.А., Смолянина С.О., Очков О.А., Кривобок А.С., Беркович Ю.А.

ГНЦ РФ ИМБП РАН, Москва, Россия

Учитывая перспективу освоения дальнего космоса и выполнения космических экспедиций за пределами Земной орбиты, представляется целесообразным исследовать влияние параметров космической среды на рост и развитие высших растений.

Измерения на околоземных орбитальных космических аппаратах показали, что мощности дозы от галактических космических лучей варьируют в пределах 0,1 – 0,3 мГр/сут (Dachev et al., 2020). Оценка дозы радиации на поверхности Марса показывает, что биологические объекты на Марсе могут получить дозу ионизирующего излучения около 0,21 мЗв/сут (в 2,5 раза выше дозы на МКС) (Hassler et. al., 2014), а на поверхности Луны – от 4,8 до 8,22 мЗв/сут , в зависимости от активности Солнца и степени защиты На Земле растения получают всего 0,62 рад в год. Известно, что высшие растения обладают на порядок более высокой радиационной устойчивостью по сравнению с животными и человеком, но радиационная устойчивость растений может отличаться на 2 – 3 порядка в зависимости от вида и фазы развития: так, для вегетирующих растений капусты летальная доза на порядок ниже, чем для сухих семян (Гительзон и др., 1976; Беркович и др., 2005). Вместе с тем, в опытах с семенами томатов на околоземной орбитальной станции даже небольшие, 70 – 80 мГр, поглощённые дозы вызвали ряд морфогенетических отклонений у растений (Nechitailo, Mashinsky, 1993).

Другим малоизученным фактором воздействия на растения вне магнитосферы Земли являются гипомагнитные условия. Как известно, напряжённость межпланетного магнитного поля на 2 – 3 порядка и более ниже привычного геомагнитного поля. До настоящего времени известны лишь единичные работы по исследованию влияния гипомагнитных полей на на семена и проростки растений (Платова и др., 2019; Лебедев и др., 2020). Вместе с тем в литературе представлены данные, указывающие на зависимость активации криптохромов (фоторецепторов синего света) от величины магнитного поля. Экологическое значение этого феномена неочевидно, но нельзя исключить значительных изменений в морфогенезе и онтогенезе растений, в частности, изменения фототропических реакции растений вследствие нарушения транспорта ауксина, криптохром-индуцированных реакций корней и развития корневой системы в целом (Vanderstraeten et. al., 2018).

Важно отметить, что сочетанное влияние радиационного воздействия и гипомагнитных условий на растения может иметь как синергический, так и антагонистический характер (Платова и др., 2019). Данные о воздействии упомянутых факторов космического пространства необходимы для обоснования уровня защиты растений в оранжереях, проектируемых для космических кораблей и космических форпостных баз. В данной работе описаны наши эксперименты по воздействию повышенной радиации и гипомагнитных условий, выполненных на базе ФГБУН ГНЦ ИМБП РАН и НИИЯФ МГУ. Объектом опытов явились китайская капуста *Brassica chinensis* L., мягкая пшеница *Triticum aestivum* L., а также арабидопсис *Arabidopsis thaliana* L. В опытах использовали как проростки, так и взрослые растения. Проростки выращивали в стерильной культуре в чашках Петри на агаризированной питательной среде по стандартным методикам. Взрослые растения выращивали на вегетационных стендах в корневых модулях прямоугольной формы, снабженных гидрофильными запорными мембранами, поверх которых находился капиллярно-пористый субстрат и мульчирующие пластины с отверстиями для растений. Все вегетационное оборудование было выполнено из немагнитых материалов, что позволяло использовать его в гипомагнитных камерах. Повышенный радиационный фон создавали, периодически подвергая растения □-облучению источником ГОБО-60 по программе, разработанной для имитации радиационной нагрузки на человека, которую могут иметь космонавты в экспедиции к Марсу (Шафиркин, Коломенский, 2008). Растения подвергали периодическому, раз в 7 суток, облучению в дозе 5 или 4 сГр/час (для капусты и пшеницы, соответственно) так, чтобы поглощенная за сеанс доза составила 20 сГр. Опыты по изучению влияния на растения ослабленного геомагнитного поля проводили в гипомагнитной камере цилиндрической формы, в которой расположение объектов в поперечном сечении камеры соответствало однородному уровню магнитного поля.

Согласно результатам экспериментов, радиационное воздействие при суммарной поглощенной дозе, равной 80 сГр, не повлияло достоверно на рост растений китайской капусты. Вместе с тем, радиационное воздействие незначительно, на 13%, уменьшило концентрацию аскорбиновой кислоты и почти вдвое повысило концентрацию нитратов в листьях (747 и 1456 мг/кг сырой массы при естественном и повышенном радиационном фоне, соответственно). Эти результаты согласуются с данными других авторов, согласно которым радиационное воздействие в дозе порядка нескольких десятков сЗв может оказывать существенное влияние на биохимические показатели растений, в том числе через изменение активности ряда протеолитических ферментов (Дмитриев, 2004; Polovinkina et. al., 2006). В опытах с пшеницей не было

выявлено влияния радиационного воздействия на рост растений в течение примерно трех первых недель вегетации, но на четвертой неделе вегетации была отмечена тенденция к замедлению роста растений, растущих при повышенном радиационном фоне, а в возрасте 36 суток облучаемые растения на 36% отставали по сырой массе побегов от растений, выращиваемых на естественном радиационном фоне. При этом при естественном уровне радиации более половины растений в посеве имели 1 – 2 боковых побега, в то время как облучаемые растения боковых побегов не образовали. Следует отметить, что в начале вегетации при суммарной поглощенной дозе не более 60 сГр было отмечено стимулирующее влияние повышенного уровня радиации на формирование колоса, но при суммарной дозе поглощенной радиации, равной 100 сГр и выше, наблюдали замедление и/или нарушение характера цветения.

Опыты по исследованию гипомагнитных условий на рост и развитие растений арабидопсиса показали, что значительное, в 660 раз, уменьшение величины магнитного поля может угнетать развитие корневой системы: у проростков, выращиваемых в гипомагнитной камере, скорость роста главного корня снизились в среднем на 15%, а количество образовавшихся боковых корней – на 21%. Кроме того, ослабление магнитного поля усилило фототропический отклик корней при латеральном освещении синим светом (выраженный фототропический отклик в контрольном варианте продемонстрировали лишь 34% главных и 11% боковых корней, а в опытном варианте аналогичные величины составили 67% и 26%, соответственно). Экспонирование взрослых растений в гипомагнитной камере в течение 7 суток стимулировало интенсивное формирование цветоносов и цветение по сравнению с контролем.

Выводы.

1. Радиационное воздействие при суммарной поглощенной дозе не более 80 сГр не повлияло на рост растений, но привело к 13%-му уменьшению содержания аскорбиновой кислоты и двукратному увеличению содержания нитратов в листьях китайской капусты.
2. Радиационное воздействие при суммарной поглощенной дозе не менее 100 сГр привело к замедлению роста побегов, блокированию кущения и уменьшению интенсивности цветения у растений пшеницы.
3. Уменьшение величины магнитного поля в 660 раз привело замедлению формирования корневой системы и усилению фототропических реакций корней *Arabidopsis thaliana* L. при фотостимулировании синим светом.

Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований по тематике РАН в ФГБУН ГНЦ ИМБП РАН

Список литературы

1. Беркович Ю.А., Кривобок Н.М., Смолянина С.О., Ерохин А.Н. Космические оранжереи: настоящее и будущее. — М.: Фирма «Слово», 2005. — 368 с. URL: http://book.astroplant.ru/ (дата обращения: 07.09.2020).
2. Гительзон И.И., Терсков И.А., Ковров Б.Г. Проблемы создания биолого-технических систем жизнеобеспечения // Материалы IX Всесоюзного совещания по вопросу круговорота веществ в замкнутой системе на основе жизнедеятельности низших организмов. 1976. С.26-30.
3. Дмитриев А.П. Малые дозы облучения и иммунитет растений // Парадигми сучасної радіобіології. Радіаційний захист персоналу об'єктів атомної енергетики, Чорнобиль. 2004. С.19.
4. Лебедев В.М., Платова Н.Г., Спасский А.В., Труханов К.А., Загирдинова Э.Ф. Использование 120 см циклотрона для исследования совместного воздействия ионизирующего излучения и гипомагнитных условий на семена салата // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. №4. С. 487-491.
5. Платова Н.Г. Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В., Труханов К.А. Хромосомные аберрации в корневой меристеме проростков салата при облучении семян ускоренными ионами углерода и прорастании в гипомагнитных условиях //Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 4. С. 93 – 100.
6. Шафиркин А.В., Коломенский А.В. Радиационные условия и радиационный риск для космонавтов при полете на Марс с использованием электрореактивных двигателей малой тяги // Авиокосмическая и экологическая медицина, 2008, Т.42. №4, С. 55-62.
7. Hassler M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber F., et. al. Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // Science. 2014 Vol. 343, Issue 6169, 1244797
8. Nechitailo G.S., Mashinsky A.L Space biology.Studies at orbital stations // "Mir" Publishers. 1993. 503 p.
9. Dachev T., Tomov B., Matviichuk Yu., Dimitrova P., Semkovaa J., Kolevaa R., Jordanovaa M., Bankova N., Shurshakovb V., Benghinb V. Solar modulation of the GCR flux and dose rate, observed in space between 1991 and 2019 // Life Sciences in Space Research. 2020. V.26. P. 114-124.
10. Polovinkina E., Kurganova L., Sinitsina J., Veselov A., Chernishova M., Sinelschikov D. Effect of low dose irradiation on prooxidant-antioxidant balance in Pisum sativum chloroplasts // European Radiation Research, Kyiv. 2006. 220 p.
11. Vanderstraeten J., Gailly P., Malkemper E. Low-Light Dependence of the Magnetic Field Effect on Cryptochromes: Possible Relevance to Plant Ecology // Front. Plant Sci. 2018. V.9. №121.

АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ СОВРЕМЕННЫХ И ДРЕВНИХ ИНФУЗОРИЙ *COLPODA STEINII* В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Шатилович А.В., Ривкина Е.М.

ИФХиБПП РАН, Пущино, Московская обл., Россия

Исследования последних лет показали, что одноклеточные авто- и гетеротрофные протисты наравне с бактериями способны переживать длительный, десятки и сотни тысяч лет, криптобиоз в толщах многолетнемёрзлых отложений северной Сибири (Gilichinsky & Rivkina, 2011). Сообщества выживших в вечной

мерзлоте протистов формируются в результате длительной селекции при сочетании неблагоприятных факторов: отрицательных температур, отсутствия свободной воды, воздействия естественной радиации, источником которой являются минералы вмещающих пород. Устойчивость этих организмов обусловлена малоизученной адаптивной способностью к репарации повреждений клеточных структур и возобновлению метаболизма в благоприятных условиях. Эта способность делает их перспективным тестовым биологическим объектом для экспериментов, проводимых в условиях орбитального полёта и необходимых для понимания механизмов воздействия космоса на живые организмы. Целью настоящего исследования было изучение адаптивного ответа и устойчивости покоящихся стадий древних и современных почвенных инфузорий к действию повреждающих факторов (высушивания, перепада температур, космической радиации) в условиях орбитального полёта и в лабораторном эксперименте.

Эксперименты по изучению влияния условий открытого космоса на жизнеспособность цист протистов проводили на борту космических аппаратов Бион-М1 и Фотон-М4 в 2013 и 2014 годах. Цисты были предварительно высушены на мембранных фильтрах либо инкубировались в культуральной среде в PCR пробирках. Пробы помещали в герметичные контейнеры, закрытые сверху кварцевым стеклом для обеспечения проникновения космического излучения. Контейнеры с образцами крепились на внешней обшивке спутника. Полет спутников продолжался 30 и 42 суток на высоте 575 км. В лабораторных условиях исследовали влияние на устойчивость цист инфузорий неблагоприятных факторов космического полета: высушивания, низкотемпературного стресса и ионизирующего гамма-излучения.

Для участия в лабораторных и орбитальных экспериментах были отобраны штаммы инфузорий *Colpoda steinii* и *Exocolpoda augustini* (Ciliophora, Colpodea), выделенные из многолетнемёрзлых отложений голоценового (штамм 7/91) и позднеплейстоценового (штаммы 1019, 1086, 1/01) возраста, а также из современных мерзлотных почв (штамм CC1). Эти почвенные и пресноводные инфузории обладают

высокой экологической пластичностью, способны формировать устойчивые к стрессовым воздействиям цисты покоя и просты в культивировании, что позволило использовать их как модельные организмы. В лабораторных исследованиях, моделирующих условия космоса, использовали также селективные варианты штаммов древней и современной *C.steinii*, полученные в результате орбитальных экспериментов (штаммы CCII и 1019II).

Исследования опытных и контрольных образцов цист инфузорий проводили с использованием методов культивирования на питательных средах, световой, флуоресцентной и сканирующей электронной микроскопии. Лабораторное культивирование цист проводили на жидкой минеральной среде PJ с добавлением *E.coli* в качестве пищевого объекта при 22°. Диагностическими критериями для оценки жизнеспособности клеток являлись: способность к эксцистированию, скорость роста культуры, изменение проницаемости мембран и морфологические признаки некроза клетки.

В результате экспериментов, проводимых на орбитальных спутниках Бион-М1 и Фотон-М4, показано, что цисты почвенных инфузорий способны сохранять жизнеспособность в условиях открытого космоса. Однако, прижизненное Live-Dead окрашивание с использованием флуоресцентных красителей AO и PI выявило в послеполетных пробах высокий процент цист с повреждённой мембраной - более 70% от контроля. Анализ морфологии цист, проведённый с использованием сканирующей электронной микроскопии, показал, что часть цист из послеполётных образцов имеет значительные повреждения оболочки, причина которых пока неясна. 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 полученных кривых роста показал, что в культурах, находившихся в сухом состоянии во время полета, увеличилась лаг-фаза, вдвое снизилась максимальная скорость роста, а также общая численность цилиат по сравнению с контролем. Напротив, эти параметры были выше контрольных для культур, суспензированных в жидкой среде. Таким образом, несмотря на то, что цисты инфузорий сохранили жизнеспособность во всех вариантах инкубирования в условиях открытого космоса, их устойчивость многократно возрастала при жидком инкубировании, что связано, вероятно, с возможностью задействовать внутриклеточные процессы репарации полученных во время полета повреждений. Установлено, что современные тундровые кольподы более устойчивы в условиях открытого космоса, чем

ископаемые, а штаммы *Colpoda steinii* - более устойчивы, чем штаммы *Exocolpoda augustini.* Анализ жизнеспособности цист селективных вариантов штаммов *C.steinii*, полученных после одно- и двукратного полетов на борту спутников Бион и Фотон (Рис.1), показал значительный рост устойчивости цист современных и особенно древних кольпод, как проявление адаптивной реакции популяций инфузорий при экстремальных воздействиях.

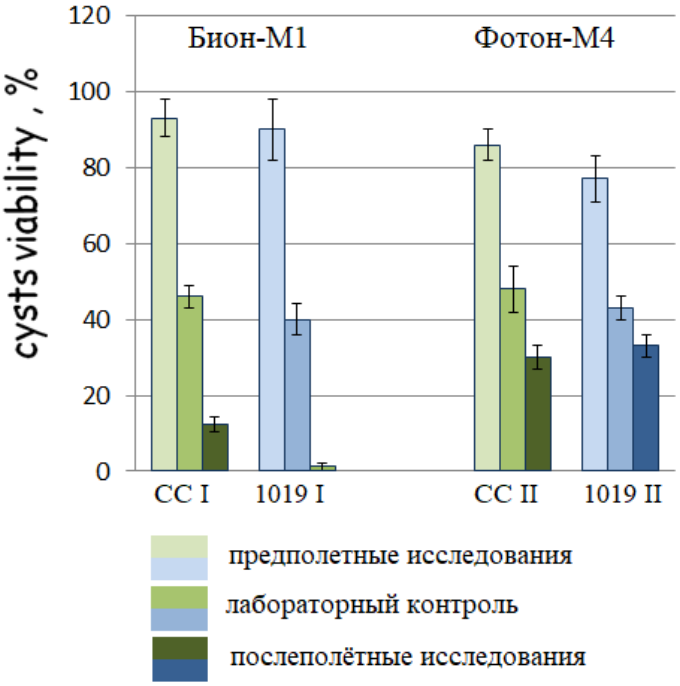


Рисунок 1. Жизнеспособность цист *Colpoda steinii* после одно- и двукратного полета на борту спутников Бион-М1 и Фотон-М4. Оценка дана в лабораторном контроле, пред- и послеполетных пробах современных (штамм СС) и позднеплейстоценовых инфузорий (штамм 1019) с использованием методов Live-Dead окрашивания.

В ходе исследований резистентности цист к ионизирующему гамма-излучению в лабораторных условиях обнаружены разные типы повреждений в зависимости от дозы (от 0.1 до 5 kGy). Эксцистирование прекращалось после дозы 1.5 kGy, при дозе 1 kGy регистрировали митотическую гибель инфузорий, при облучении меньшими дозами наблюдали значительное падение численности клеток и увеличение лаг-фазы. Флуоресцентное прижизненное окрашивание показало, что через сутки после облучения радиочувствительность цист «космических» вариантов штаммов кольпод была выше, чем лабораторных почти на 1 kGy и колебалась от 2.8 до 3.8 kGy. Однако после 7 суток ревитализации радиорезистентность цист всех штаммов увеличивалась и составляла от 4.5 до 5 kGy. Показано, что цисты древних кольпод более чувствительны к гамма-облучению, чем цисты современных кольпод. Сравнительный анализ устойчивости цист *C. steinii* к высушиванию и циклическому переохлаждению до -5° также показал, что цисты ископаемых цилиат хуже адаптированы к этим видам стрессовых воздействий. Установлено, что 42 цикла переохлаждения цист *C. steinii* с переходом через 0°C вызывает не только ожидаемую гибель части клеточной культуры,

но и активацию репаративных процессов. Комплекс этих реакций, проходящих в покоящихся клетках, обеспечивает адаптивный ответ и сохранение жизнеспособности части популяции инфузорий. Лимитирующим фактором для репаративной активности было содержание доступной воды.

Принято считать, что высокая устойчивость цист покоя обеспечивается посредством почти полного прекращения их метаболической активности. Однако, полученные данные позволяют предположить, что цисты покоя инфузорий обладают способностью репарировать внутриклеточные повреждения, полученные при экстремальных воздействиях в условиях открытого космоса или в лабораторном эксперименте. Изучение адаптивных реакций и механизмов восстановления цист покоя в экстремальных условиях поможет определить их метаболический статус, оценить возможность и длительность сохранения жизнеспособности в многолетнемерзлых отложениях и на космической орбите.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05003.

Список литературы:

Gilichinsky DA, EM Rivkina. Permafrost Microbiology (Reitner J, Thiel V, eds.) Encyclopedia of Geobiology, Springer-Verlag. 2011. P. 726-732.

«МИНИМАЛЬНАЯ» КЛЕТКА В КОСМОСЕ

Вишняков И.Е.[1], Шмакова Л.А.[2], Ривкина Е.М.[2], Борхсениус С.Н.[1]

[1]ИНЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
[2]ИФХиБПП РАН, Пущино, Московская обл., Россия

Микоплазмы (класс Mollicutes) – самые маленькие из известных микроорганизмов, способных к росту на искусственной питательной среде (Борхсениус и др., 2016). Геномы микоплазм в значительной степени редуцированы, их клетки обладают весьма ограниченным набором метаболических путей. Диаметр некоторых клеток микоплазм меньше теоретически рассчитанного инимального размера, который должна иметь клетка, чтобы системы её жизнеобеспечения функционировали стабильно. Считают, что клетки микоплазм наиболее просто устроены, а сохранившиеся в процессе редуктивной эволюции метаболические пути имеют фундаментальное значение для жизнеобеспечения любой клетки (Wong, Houry, 2004).

Микоплазмы в большинстве своём являются паразитами человека, животных и растений. Однако есть и «вездесущая» микоплазма, *Acholeplasma laidlawii*, которую

обнаруживают в различных почвах, сточных водах и тканях высших эукариот (Laidlaw, Elford, 1936; Razin et al., 1998). Кроме того, *A. laidlawii* входит в первую пятёрку контаминантов клеточных культур и может сохранять жизнеспособность в сухих порошкообразных компонентах питательных сред (Windsor et al., 2010). В жидкой питательной среде она способна вырастать до высоких титров даже при +4 °C, тогда как оптимальная температура роста *A. laidlawii* находится в пределах 30-37 °C. По-видимому, клетки *A. laidlawii* обладают механизмами, позволяющими переживать широкий спектр стрессовых воздействий. Среди микоплазм, геномы которых полностью секвенированы к настоящему времени (более 250 геномов) у *A. laidlawii* сохранился самый большой набор генов, кодирующих стрессовые белки, в том числе белок «скорой помощи» IbpA (Hsp20), предотвращающий необратимую денатурацию белков в условиях стресса (Vishnyakov et al., 2012; Vishnyakov, Borchsenius, 2013).

В качестве модельного объекта «минимальной» клетки микоплазмы привлекают внимание самых передовых исследовательских групп. Именно на микоплазмах был выполнен ряд революционных работ в области молекулярной и клеточной биологии: трансплантация генома микоплазмы *Mycoplasma mycoides* LC в клетку другого вида, *Mycoplasma capricolum* (Lartigue et al., 2007); химический синтез полноразмерного бактериального генома *Mycoplasma genitalium* (Gibson et al., 2008); синтез более крупного генома, *M. mycoides* JCVI-syn1.0, с последующим введением его в клетки *M. capricolum* и их превращением в «синтетические» клетки (Gibson et al., 2010).

Нам представляется, что микоплазмы вполне подходят в качестве модельных объектов и для астробиологических исследований, например, с целью проверки выживаемости «минимальной» клетки в экстремальных условиях, таких как воздействие сверхнизких температур, высокоэнергетических протонов солнечного ветра и т.п.

В настоящей работе в рамках экспериментов на борту КА «ФОТОН-М» (эксперимент «Экзобиофрост») в 2014 году было исследовано изучение отклика свободноживущей микоплазмы *A. laidlawii* на экспонирование в условиях открытого космоса. Микроорганизм *Acholeplasma laidlawii* PG-8a подвергали экспонированию в открытом космосе на внешней стороне спутника в микроцентрифужных пробирках в глицерине (жидкая питательная среда для культивирования микоплазм OXOID, UK + 20% глицерин), в виде суспензии в питательной среде (OXOID, UK), а также в виде суспензии, внесённой в почвогрунт (каждый вариант в трех повторах). Аналогичные варианты находились также внутри спутника, где поддерживалась постоянная

температура (21-22 °C). После приземления спутника и доставки образцов (на 72 сутки после посева) культуры высевали на свежую жидкую питательную среду (OXOID, UK) с добавлением 0.1% глюкозы. Через 6 суток (78 сутки) делали повторный посев.

Основным результатом данной работы является констатация факта, что клетки микоплазмы *A. laidlawii*, одной из «минимальных» бактерий, не защищенные клеточной стенкой и не образующие спор, способны выжить при экспонировании в околоземном космическом пространстве, в условиях многократных переходов температуры через 0°C, высокоэнергетических протонов солнечного ветра, ультрафиолетового излучения, гамма-радиации, вакуума. Этот факт можно рассматривать как свидетельство того, что даже наиболее «просто» организованные микроорганизмы, способные расти на синтетической питательной среде, обладают эффективными механизмами устойчивости к стрессам, и о фундаментальной способности живой материи к выживанию в экстремальных условиях. Кроме того, следует подчеркнуть, что жизнеспособные (культивируемые) формы первой микоплазмы-«космонавта» сохранились при экспонировании в условиях открытого космоса, только будучи помещёнными в почву. Таким образом, почва может служить в качестве эффективного «переносчика» жизни в межпланетном пространстве.

Список литературы

1. Борхсениус С.Н., Чернова О.А., Чернов В.М., Вишняков И.Е. Микоплазмы в биологии и медицине начала XXI века // Монография. СПб: Наука. 2016. 333 с.
2. Wong P., Houry W.A. Chaperone networks in bacteria: analysis of protein homeostasis in minimal cells // J Struct Biol. 2004. V. 146. P. 79–89.
3. Laidlaw P.P., Elford W.J. A new group of filterable organisms // Proc R Soc London Ser B. 1936. V. 120. P. 292–303.
4. Razin S., Yogev D., Naot Y. Molecular biology and pathogenicity of mycoplasmas //
1. MMBR. 1998. V. 62. № 4. P. 1094–1156.
5. Windsor H.M., Windsor G.D., Noordergraaf J.H. The growth and long term survival of *Acholeplasma laidlawii* in media products used in biopharmaceutical manufacturing // Biologicals. 2010. V. 38. № 2. P. 204–210.
6. Vishnyakov I.E., Levitskii S.A., Manuvera V.A., Lazarev V.N., Ayala J.A., Ivanov V.A., Snigirevskaya E.S., Komissarchik Y.Y., Borchsenius S.N. The identification and characterization of IbpA, a novel α-crystallin-type heat shock protein from mycoplasma // Cell Stress and Chaperones. 2012. V. 17. № 2. P. 171–180.
7. Vishnyakov I.E., Borchsenius S.N. Mycoplasma heat shock proteins and their genes // Microbiology (Mikrobiologija). 2013. V. 82. № 6. P. 653–667.
8. Lartigue C., Glass J.I., Alperovich N., Pieper R., Parmar P.P., Hutchison C.A. 3rd, Smith H.O., Venter J.C. Genome transplantation in bacteria: changing one species to another // Science. 2007. V. 317. P. 632–638.
9. Gibson D.G., Benders G.A., Andrews-Pfannkoch C., Denisova E.A., Baden-Tillson H., Zaveri J., Stockwell T.B., Brownley A., Thomas D.W., Algire M.A., Merryman C., Young L., Noskov V.N., Glass J.I., Venter J.C., Hutchison C.A. 3rd, Smith H.O.

Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *Mycoplasma genitalium* genome // Science. 2008. V. 319. P. 1215–1220.
10. Gibson D.G., Glass J.I., Lartigue C., Noskov V.N., Chuang R.Y., Algire M.A., Benders G.A., Montague M.G., Ma L., Moodie M.M., Merryman C., Vashee S., Krishnakumar R., Assad-Garcia N., Andrews-Pfannkoch C., Denisova E.A., Young L., Qi Z.Q., Segall-Shapiro T.H., Calvey C.H., Parmar P.P., Hutchison C.A. 3rd, Smith H.O., Venter J.C. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome // Science. 2010. V. 329. P. 52–56.

ВЫЖИВАЕМОСТЬ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ВНЕШНЕЙ СТОРОНЕ МКС

Дешевая Е.А.[1], Фиалкина С.В.[1], Гуридов А.А.[1],Щербакова В.А.[2], Цыганков О.С.[3], Шубралова Е.В.[4], Ильин В.К.[1]

[1] ГНЦ РФ-ИМБП РАН, Москва, Россия
[2] ИБФМ РАН, Пущино, Московская обл., России
[3] ПАО РКК «Энергия», Московская обл., Россия
[4] ФГУП ЦНИИмаш, Московская обл., Россия

На основании серии космических экспериментов было показано, что при разных условиях воздействия космических факторов на микроорганизмы выживание последних при экспонировании на внешней стороне Международной космической станции (МКС) зависит в первую очередь от защиты биологического организма от действия ультрафиолета. В космическом эксперименте «Тест» было установлено, что при нанесении биологических объектов на поверхность ватного тампона и последующем размещении экспоната вне станции у прокариотных и эукариотных культур отмечена одинаковая динамика к снижению численности биообъектов в открытом космосе.

В 1980-х годах биологи выявили, что микробная жизнь обладает удивительной гибкостью к выживанию в экстремальных местах обитания — например, в нишах, чрезвычайно горячих или кислотных, которые ранее не рассматривались для жизнедеятельности сложных организмов. Известны микроорганизмы очень устойчивы к радиации. Ученые обнаружили бактерии под толщей льда в Антарктиде, дне Марианской впадины, на глубине 1900 футов ниже морского дна. Микроорганизмы обладают достаточно быстрой адаптационной способностью. Считалось, что со скоростью изменения условий среды может изменяться и адаптационная способность микроорганизмов, а быстрый переход условий окружающий среды на неблагоприятные для организма может вызывать его гибель. Интересно, что со способностью к той или иной форме покоя, обеспечивающей выживание биообъекта в условиях несовместимых

с активной жизнедеятельностью, обладает широкий спектр организмов от бактерий до позвоночных. Проявляясь сходным образом у нередко эволюционно далеко отстоящих организмов, различные формы покоя, по-видимому, имеют в своей основе молекулярно-генетическую общность. Без особого преувеличения можно говорить о наличии практически у всех живых существ способности к периодическому затормаживанию жизнедеятельности, которая проявляется в зависимости от конкретных условий существования видов. В регуляции механизмов покоя, очевидно, участвуют особые сигналы и/или факторы внутренней природы (биологические часы), что позволяет ставить вопрос об управлении этими механизмами, как в рамках отдельных организмов, так и на уровне экосистем. С целью решения вопроса выживаемости микроорганизмов в открытом околоземном космическом пространстве, подвергающихся пагубному воздействию различных физических факторов, таких как вакуум, солнечное излучение, ионизирующее галактическое излучение, воздействие высокоэнергетических ионов и т.д., ряд стран проводили эксперименты на космических станциях и на Земле при имитации условий космоса.

В экспериментах НАСА на борту космического корабля при продолжительном полете миссии LDEF были получены данные для обсуждения вероятности возникновения "Панспермии". Споры *Bacillus subtilis* в монослоях (10^6/образец) или многослойных структурах (10^8/образец), защищенные от постоянного действия космического УФ излучения алюминиевым колпаком с отверстиями, подвергались воздействию космической среды в течение почти шести лет. Было показано, что при экранировке исследуемых образцов от солнечного ультрафиолетового излучения (алюминиевым фильтром, кристаллами солей) до 80% спор в многослойных системах выживали в космосе. Показано, что воздействие внеземного солнечного УФ-излучения является самым вредным фактором в пространстве. Причиной этому является высокая энергетика УФ-излучения и вакуумного действия, которые непосредственно влияют на ДНК и вызывают образование дополнительных фотопродуктов в ДНК, что в конечном итоге приводит к сильной мутагенности и летальности. Авторы, отмечали повреждающий эффект внеземного солнечного УФ излучения усугубляется, когда споры одновременно подвергаются воздействию солнечной ультрафиолетовой радиации и космического вакуума (Horneck G. et al. 1981,1994, Tauscher C. et al. 2006). Проведен ряд исследований по изучению воздействия УФ-излучения на микроорганизмы адекватного солнечному. Например, в эксперименте EXPOSE, было показано, что после 18 месяцев экспозиции в выставочном модуле Европейского космического агентства (ЕКА) на внешней стороне МКС при облучении споры

бактерии *Bacillus pumilus САФР-032* продемонстрировали меньшее снижение жизнеспособности по сравнению со спорами, находящимися в имитационном эксперименте (Vaishampayan P.A. et al., 2012).

Важные научные результаты были получены в российском эксперименте «Биориск» и в российской части эксперимента EXPOSE (Novikova N. et al., 2015). В эксперименте «Биориск» определяли влияние вакуума, радиации и невесомости на выживаемость культур микроорганизмов, защищенных от действия космического излучения металлическим чехлом. В этих условиях было показано, что бактерии и плесневые грибы способны выживать в течение не менее 31 месяца в условиях открытого космоса при защите от космического ультрафиолета. Однако, во всех ранее проводимых экспериментах между микроорганизмом и действием всех изучаемых космических факторов был барьер, который с одной стороны снижал или регулировал воздействие фактора, а с другой стороны удерживал споры микробов в ограниченном объеме.

Таким образом, в проведенных экспериментах были определены некоторые временные уровни выживаемости споровых микроорганизмов, частично или полностью защищенных от всего спектра космического излучения, проведена начальная оценка возможностей выживаемости микробов и определено направление отдельных откликов живой системы.

Уникальные данные получены в результате космического эксперимента «Тест».

В ноябре 2010 года, в процессе выхода в открытый космос, экипаж 25-й экспедиции выполнил отбор проб с внешней стороны РС МКС. Исследование доставленных на Землю проб принесло сенсационный результат: в одной из проб были обнаружены жизнеспособные спорообразующие бактерии вида *Bacillus licheniformis.* Впервые в истории науки и космонавтики в ионосфере, на высоте 400 км обнаружено живое вещество. Далее в результате 10-летних исследований, было установлено, что в космической пыли, на поверхностях модулей РС МКС содержатся жизнеспособные единицы микроорганизмы и грибов. Затем был проведен уникальный космический эксперимент «Тест-экспонат».

Для проведения космического эксперимента на поверхность стерильного ватного тампона наносили, предварительно выбранные по устойчивости к действию УФ-излучения и вакуума, штаммы следующих микроорганизмов: споровых бактерий вида *Bacillus amyloliquefaciens*, гриба вида *Aurebasidium pullulans* и архей вида *Methanosarcina mazei*. В течение 2 лет на внешней стороне МКС экспонировали данные культуры без

защиты от УФ-излучения, вакуума и всех других факторов открытого космического пространства. После окончания срока эксперимента образцы были возвращены в лабораторию, где проводились исследования.

Сравнительный анализ результатов экспонирования в течение 1 года и 2 лет позволил оценить динамику сохранения жизнеспособности микроорганизмов при экспонировании в открытом космическом пространстве (рисунок 1).

1. Выявлены тенденции снижения численности все микроорганизмов:

- за первый год численность КОЕ (колониеобразующих единиц) снизилась на 3 порядка;

-за второй год численность КОЕ снизилась на 2 порядка по сравнению с первым годом.

Проведен первый этап исследования доставленных образцов – определение численности жизнеспособных КОЕ после открытого экспонирования биообразцов.

.

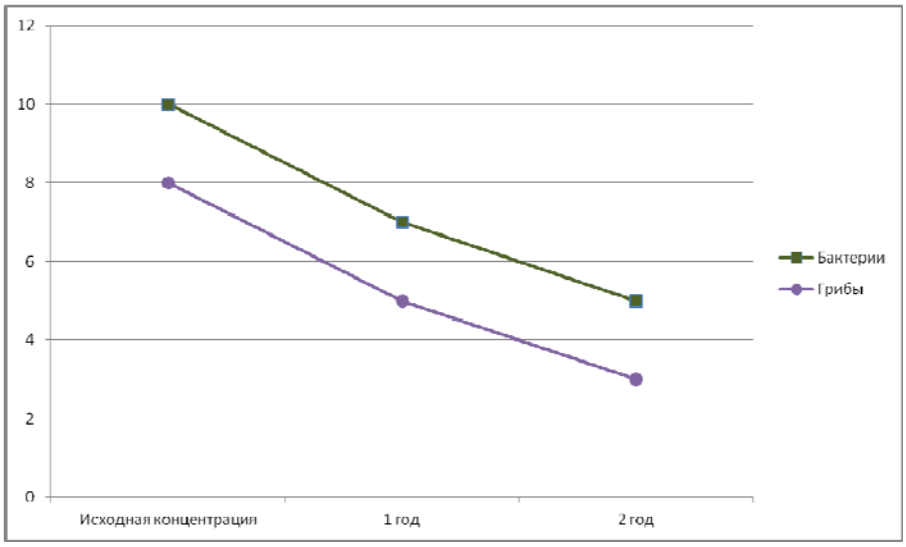


Рисунок 1. Динамика численности жизнеспособных КОЕ при открытом экспонировании на поверхности МКС.

Как видно из представленных данных, выявлено, что снижение численности сохранивших свою жизнеспособность организмов в условиях открытого космоса за 2 года произошло почти на 5 порядков у разных культур. Нити ватного тампона могли служить своеобразной защитой микроорганизмов от воздействия УФ-излучения.

Таким образом, в условиях действия одних и тех же факторах космического пространства снижение выживших биообъектов может быть одинаковым для разных таксономических групп микроорганизмов. Следовательно, источниками биообъектов в мелкодисперсном осадке на РС МКС могут быть организмы, сохранившиеся на поверхности при выведении с Земли, выделенные из обитаемых отсеков, а также возможен вклад межпланетного метеоритного и кометного вещества. Полученные

данные указывают на то, что в ионосфере живые организмы могут быть не случайными обитателями.

Таким образом, опровергается парадигма безжизненности космического пространства. Микроорганизмы из Биосферы Земли могут рассеиваться в межпланетном пространстве. Земля становится не только приёмником, но и источником живой материи. Не произойдёт ли контаминация космических аппаратов рассеянными в околоземном пространстве биообъектами различного происхождения?

Список литературы

1. Horneck G. Survival of microorganisms in space: a review // *Adv. Space Res.* -1981.- Vol. 1, p.P. 39-48.
2. Horneck G., H. Bucker and G. Reitz Long-term survival of bacterial spores in space // Adv. Space Res. 1994.- Vol. 14/- №. 10 – P.. 41-45.
3. Novikova N., Deshevaya E., Levinskikh M., Polikarpov N., Poddubko S., Gusev O., Sychev V. Study of the effect of the outer space environment on the dormant forms of microorganisms, fungi and plants in the “Expose - R” experiment // International Journal of Astrobiology.- 2015. - №14 (1). - P. 137-142.
4. Tauscher C., Schuerger Andrew C. and Nicholson Wayne L. Survival and Germinability of *Bacillus subtilis* Spores Exposed to Simulated Mars Solar Radiation: Implications for Life Detection and Planetary Protection // Astrobiology. - 2006.- V. 6. - №. 4. - P. 592-605.
5. Vaishampayan P.A., Rabbow, Horneck Gerda, and Kasthuri J. Venkateswaran Survival of Bacillus pumilus Spores Elke for a Prolonged Period of Time in Real Space Conditions // Astrobiology. – 2012. - V.12 - № 5. - P.487-497.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА ПЕРВИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОМ АППАРАТЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

Клементьев К.Е.[1], Максимов Е.Г.[1], Еланская И.В.[1], Лебедев В.М.[2], Спасский А.В. [2], Пащенко В.З.[1], Рубин А.Б.[1]

[1] МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
[2]НИЯФ имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Основными неблагоприятными факторами при космическом полете являются ионизирующее действие тяжелой компоненты ядер солнечных и космических лучей, обладающей крайне высоким значением линейной передачи энергии (ЛПЭ) до 500 кэВ/мкм (Case и др., 2013). Защита экипажа от этого воздействия представляет сложную техническую задачу, в которой остается нерешенным и ряд биомедицинских проблем. До сих пор механизм повреждения белков и пигмент-белковых комплексов под действием ионизирующего излучения остается невыясненным (Кудряшов, 2004).

Известно, что на ранних этапах истории Земли от 4,5 до 2,5 миллиардов лет назад,

из-за отсутствия озонового слоя уровень радиации на поверхности Земли превышал сегодняшний уровень, в 13,8 раз для УФ излучения и в 46,6 раз для ионизирующего излучения (Morozova и др., 2015). Чтобы выживать в подобных экстремальных условиях цианобактериям необходимо было выработать механизмы защиты от ионизирующего излучения. Приблизительно 2,3 миллиарда лет назад на границе архея и протерозоя (Rasmussen и др., 2008) цианобактерии (грамотрицательные прокариотические организмы), осуществляющие оксигенный фотосинтез, принимали участие в формировании кислородной атмосферы Земли. По современным представлениям начальное накопление кислорода в мелководных карманах океанов уже в эпоху Архея – 3,23 миллиардов лет назад, то есть до «Великого кислородного события», которое произошло 2,5 миллиарда лет назад (Satkoski и др., 2015). Концентрация кислорода в атмосфере Земли достигла и поддерживается на современном уровне именно благодаря простейшим фотосинтезирующим микроорганизмам – цианобактериям. Фотосинтетическая мембрана цианобактерий, как и у произошедших от них высших растений, содержит 2 типа взаимодействующих между собой фотосистем (ФС1, ФС2). Светосбор осуществляется мембранными пигмент-белковыми комплексами, содержащими реакционные центры (РЦ) фотосистем 1 и 2 с молекулами хлорофилла *a* в качестве пигментов специальных пар (П680, П700) и коровой антенны. Роль дополнительного светособирающего комплекса у цианобактерий выполняют гигантские пигмент-белковые комплексы фикобилисомы (ФБС), которые состоят из фикобилипротеинов – фикоцианина (ФЦ) и аллофикоцианина (АФЦ). В качестве хромофорной группы фикобилипротеины используют молекулы билинов. Цианобактерии имеют широкий ареал распространения на Земле, что говорит о высоком уровне надежности и эффективности организации их фотосинтетических мембран и регуляторных механизмов, позволяющих им адаптироваться к различным условиям окружающей среды, в том числе, переходить от автотрофного питания к гетеротрофному. Таким образом, цианобактерии могут рассматриваться как модельные объекты для изучения адаптационных механизмов, позволяющих живым организмам защищаться от ионизирующего излучения. Помимо этого, использование цианобактерии в качестве биотехнологических продуцентов молекулярного кислорода и ряда других веществ потенциально может решить ряд прикладных задач дальних космических миссий, связанных с регенерацией кислорода.

В данной работе проведен сравнительный анализ влияния космического полета во время миссии Фотон-М4 и облучения α-частицами с энергией около 30 МэВ, моделирующего воздействие тяжелыми ядрами частиц высоких релятивистских

энергий, которые могут входят в состав галактических космических лучей, на функциональную организацию фотосинтетического аппарата и первичные стадии фотосинтеза цианобактериального штамма *Synechocystis sp.* PCC6803 (Klementiev и др., 2019).

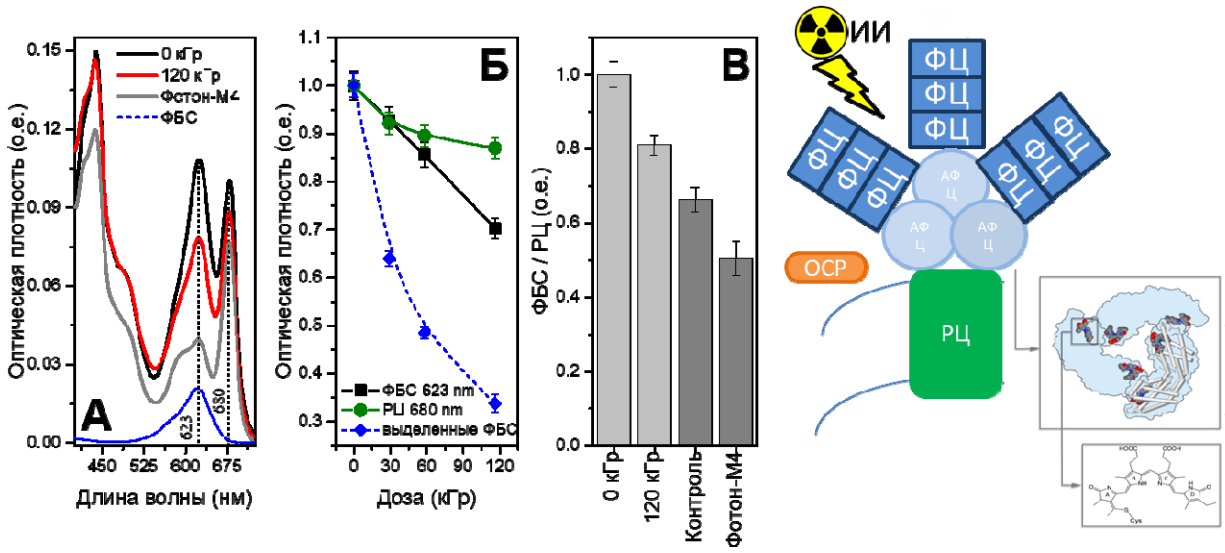


Рисунок 1. (А) - Спектры поглощения Synechocystis sp. до и после воздействия потоком α-частиц с дозой 120 кГр (черная и красная линии, соответственно), а также после космической миссии ФОТОН-М4 (серая кривая). Синяя пунктирная линия показывает поглощение выделенных ФБС. (Б) - зависимость от дозы оптической плотности Synechocystis sp. после облучения α-частицам на длине волны 623 нм (ФБС в клетке – черная кривая, изолированные ФБС – синяя пунктирная) и 680 нм (РЦ, зеленая кривая). Поглощение было нормировано на соответствующее значение при 0 кГр. (В) - отношения оптической плотности ФБС/РЦ после облучения с дозой с 120 кГр, после длительного хранения в темноте (Контроль), после полета в космос (Фотон-М4).

Прямое попадание α-частицы в белок или ДНК приводит к разрыву химических связей. Предотвратить такой разрыв невозможно. Цианобактерии *Synechocystis sp.* имеют 14 копий кольцевой ДНК, которые составляют 2-3% от сухой массы клетки (Zerulla и др., 2016). Учитывая размеры клетки и α-частицы, в масштабе клетки прямое попадание α-частицы маловероятно, поэтому эффект от пролета высокоэнергетической частицы через клетку, вероятно, обусловлен генерацией АФК, которые образуются в треках. При пролете α-частиц через водный раствор культуры клеток цианобактерий *Synechocystis sp.* в процессе радиолиза воды происходит генерация АФК, которые разрушают белки и хромофорные группы фотосинтетического аппарата. Воздействие ИИ приводит к отсоединению целых антенных комплексов ФБС от РЦ. Отсоединенные ФБС, которые состоят из фикобилипротеинов, обладающих антиоксидантной активностью и составляющие 80% сухой массы клетки, могут дезактивировать АФК, вступая в химическую реакцию с последующим окислением триптофанов, гистидинов,

фенилаланинов, тирозинов, цистеинов и других аминокислотных остатков. Это позволяет уменьшить количество продуктов радиолиза и сократить вероятность их взаимодействия с ДНК внутри клетки. Синтез же новых белков энергетически более выгоден по сравнению с репарацией ДНК, что характерно для ряда видов микроорганизмов, например *Deinococcus radiodurans*. С другой стороны, в отсутствие фотохимического тушения, возникающего под действием интенсивного света, сами по себе отсоединенные ФБС могут генерировать АФК (Rinalducci и др., 2008). Очевидно, для уменьшения вероятности этого процесса активируются защитные механизмы нефотохимического тушения. При этом OCP под действием света переходит в активное красное состояние, образуя комплекс с ядром фикобилисомы, в котором энергия электронного возбуждения пигментов ФБС мигрирует на молекулы каротиноидов с последующей диссипацией в тепло. Молекулы каротиноидов, и, в частности, OCP, могут дезактивировать АФК самостоятельно, через спин-спиновый обмен или вступая в химическую реакцию с последующим окислением молекул каротиноидов. АФК, в свою очередь, могут переводить OCP в красную форму, которая, вероятно, является активной и тушит ФБС. Таким образом, у цианобактерий существуют защитные механизмы, позволяющие, с одной стороны, предотвратить появление АФК, а с другой – инактивировать их за счет взаимодействия с белками, обладающими антиоксидантной активностью. После воздействия ИИ культура клеток цианобактерий остается способной к автотрофному росту за счет клеток с неповрежденной ДНК, которые способны к делению. Размер антенного комплекса ФБС сильно влияет на выживаемость культуры клеток. Так, у мутантов с малым размером антенны количество жизнеспособных клеток после облучения было меньше в 10 раз. Таким образом, большая антенна способна, с одной стороны, дезактивировать большее количество АФК, а с другой – уловить больший световой поток, что приводит к увеличению эффективности фотосинтетических реакций и процессов биосинтеза, что, как следствие, увеличивает жизнеспособность культуры клеток в целом. Таким образом, функциональное состояние фотосинтетического аппарата напрямую связано с жизнеспособностью клеток цианобактерий.

После космического полета или воздействия высоких доз ИИ клетки *Synechocystis sp.* PCC6803 оставались способны к автотрофному росту и смогли восстановить культуру клеток со спектральными и функциональными характеристиками, неотличимыми от контрольных образцов. Культура клеток *Synechocystis sp.*, вернувшаяся на Землю после космического полета, была внесена в коллекцию микроорганизмов биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) / Учебник. Физматлит Москва, 2004.
2. Case A.W., Kasper J.C., Spence H.E., Zeitlin C.J., Looper M.D., Golightly M.J., Schwadron N.A., Townsend L.W., Mazur J.E., Blake J.B., Iwata Y. The deep space galactic cosmic ray lineal energy spectrum at solar minimum // Sp. Weather. 2013. Vol. 11, № 6. P. 361–368.
3. Klementiev K.E., Maksimov E.G., Gvozdev D.A., Tsoraev G.V., Protopopov F.F., Elanskaya I.V., Abramov S.M., Dyakov M.Yu., Ilyin V.K., Nikolaeva N.A., Moisenovich M.M., Moisenovich A.M., Slonimskiy Y.B., Sluchanko N.N., Lebedev V.M., Spassky A.V., Thomas F., Maksimov G.V., Paschenko V.Z., and Rubin A.B. Radioprotective role of cyanobacterial phycobilisomes // Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg. 2019. Vol. 1860, № 2.
4. Morozova D., Moeller R., Rettberg P., Wagner D. Enhanced Radiation Resistance of Methanosarcina soligelidi SMA-21, a New Methanogenic Archaeon Isolated from a Siberian Permafrost-Affected Soil in Direct Comparison to Methanosarcina barkeri // Astrobiology. 2015.
5. Rasmussen B., Fletcher I.R., Brocks J.J., Kilburn M.R. Reassessing the first appearance of eukaryotes and cyanobacteria // Nature. 2008. Vol. 455, № 7216. P. 1101–1104.
6. Rinalducci S., Pedersen J.Z., Zolla L. Generation of reactive oxygen species upon strong visible light irradiation of isolated phycobilisomes from Synechocystis PCC 6803 // Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg. 2008. Vol. 1777, № 5. P. 417–424.
7. Satkoski A.M., Beukes N.J., Li W., Beard B.L., Johnson C.M. A redox-stratified ocean 3.2 billion years ago // Earth Planet. Sci. Lett. Elsevier B.V., 2015. Vol. 430. P. 43–53.
8. Zerulla K., Ludt K., Soppa J. The ploidy level of Synechocystis sp. PCC 6803 is highly variable and is influenced by growth phase and by chemical and physical external parameters // Microbiology. Microbiology Society, 2016. Vol. 162, № 5. P. 730–739.

СООБЩЕСТВА ПОЧВООБИТАЮЩИХ ГРИБОВ КАК ОБЪЕКТ АСТРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Крючкова М.О.[1,2], Иванова А.Е.[1,3], Воробьева Е.А.[1,4], Чепцов В.С.[1,4], Павлов А.К.[5], Ломасов В.Н.[6]

[1] МГУ, Москва, Россия
[2] ИБФМ РАН, ВКМ, Москва, Россия
[3] ИПЭЭ РАН, Москва, Россия
[4] ИКИ РАН, Москва, Россия
[5] ФТИ РАН, Санкт-Петербург, Россия
[6] СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Для изучения возможности сохранения и возникновения жизни на малых и больших телах Солнечной системы нужно представлять пределы выживаемости микроорганизмов, их устойчивость к крайне суровым воздействиям космического пространства. Чаще всего в подобных исследованиях модельными системами являются земные экстремальные местообитания, формирующиеся в условиях вечной мерзлоты

Антарктиды, в жарких и сухих условиях пустынь, в термофильных источниках и проч. Исследуют выживаемость разных организмов – бактерий, грибов. «Микроскопические грибы обладают высоким потенциалом выживания в экстремальных условиях существования, включая субстратное голодание, изменение влажности, температуры, осмотический стресс, ионизирующее излучение» (Иванова и др., 2005). Воздействие радиации может выступать основным лимитирующим фактором, определяющим жизнеспособность организмов в экстремальных инопланетных условиях, так как, воздействуя на молекулярном и внутриклеточном уровне, может вызывать необратимые изменения в живых клетках (Павлов и др., 2012). Пределы устойчивости сообществ микроорганизмов в естественных условиях, а именно в почвах и грунтах плохо изучены.

Цель данной работы – оценить реакцию почвообитающей микобиоты (на примере пустынных почв) на физические воздействия, моделирующие длительное нахождение в инопланетных условиях.

Объектами исследования послужили образцы верхних гумусовых горизонтов пустынных почв: серозема (пустыня Негев, Израиль, Aridic Calcisols) и серо-коричневой (горная пустыня Марокко, Xerosols).

В работе изучалось воздействие двух типов облучения, встречающихся в космическом пространстве, в частности, на поверхности Марса: γ и ускоренные электроны. Облучение проводили в специальной климатической камере, позволяющей сохранять заданное давление и температуру в течение всего эксперимента, на базе Физико-технического института им. А.Ф. Йоффе (Санкт-Петербург) (Pavlov et al., 2010). Облучение γ-лучами проводили в режиме низких температур (-50°С) и давления (1 торр). Образец серозема получил суммарную дозу 100 кГр, а образец серо-коричневой почвы - 1 МГр. Перед облучением образцы активировали увлажнением и инкубировали 10 суток при 28°С, затем высушивали до воздушно-сухого состояния. После облучения образцы хранили при -18°С.

Облучение ускоренными электронами проводили в режиме низких температур (-130°С) и давления ($8\text{-}9 \cdot 10^{-3}$ торр) на образцах серозема. Почвенные образцы получили следующие дозы: 0,05; 1; 2, 3, 4 и 5 МГр. Один образец был подвержен воздействию только температуры и давления, без облучения, другой облучали при комнатной температуре и давлении 1 атм (760 торр) дозой в 0,05МГр.

Далее проводили сравнительный анализ состава сообществ культивируемых микроскопических грибов и разнообразия грибных структур в составе грибной биомассы в облученных и исходных образцах почв.

Для выделения грибов использовали метод посева почвенных суспензий, предварительно прогретых (52°С, 2 мин, Кочкина и др.,2001) с целью активизации спор и повышения выявляемого разнообразия микромицетов. Посевы осуществляли на твердые питательные среды – Чапека (Методы…,1991) и щелочной агар (Биланенко, Георгиева, 2005). Содержание биомассы грибов и ее биоморфологическую структуру оценивали методом прямой люминесцентной микроскопии при окрашивании калькофлюором белым и акридином оранжевым (Методы…, 1991). Идентификацию штаммов проводили по культурально-морфологическим признакам и молекулярным методом.

Облучение серозема γ- лучами дозой в 100 кГр оказало активирующее воздействие на микобиоту: отмечено возрастание на два порядка численности жизнеспособных грибных колониеобразующих единиц (КОЕ), увеличение в 1,5 раза выделяемого видового разнообразия грибов, возрастание содержания биомассы грибных спор и мицелия.

Облучение горной почвы γ-лучами более высокой дозой в 1 МГр привело к уменьшению содержания грибной биомассы, к сокращению разнообразия грибных сообществ, подавлению роста многих видов.

Таким образом, изначально разные по структуре и видовому разнообразию сообщества двух пустынных почв после γ-облучения разными дозами становились сходными: доминировали всего несколько видов, которые в исходных образцах были редкими или типичными, именно численность КОЕ этих видов после облучения, как правило, резко возрастала.

Облучение серозёма ускоренными электронами также привело к изменению численности КОЕ, видового разнообразия и структуры грибных сообществ. Численность грибных пропагул увеличилась после воздействия дозами в 0,05 и 1 МГр и уменьшилась после облучения дозами в 3, 4 и 5 МГр. Видовое разнообразие снизилось после воздействия любыми из исследуемых доз ускоренных электронов. После воздействии дозой в 1 и 2 МГр выделяли много дрожжей. Наиболее устойчивыми к высоким дозам облучения ускоренными электронами были представители мелкоспоровых видов, которые были редки или вовсе не выделялись из контрольного образца.

Облучение ускоренными электронами дозой в 0,05 МГр при комнатных температуре и давлении 1 атм (760 торр) имело наибольший стерилизующий эффект, который проявлялся в значительном сокращении численности КОЕ и числа видов. Так, при низких температуре и давлении стресс от облучения электронами оказался даже не

столь существенен, чем облучение даже в минимальной дозе, но при температуре и давлении, свойственным условиям Земли.

В результате данного исследования было показано, что при воздействии крайне высоких доз ионизирующего излучения (γ- лучи и ускоренные электроны) при низких температуре и давлении, имитирующем условия существования на Марсе, жизнеспособность почвенных грибных сообществ, сформировавшихся в экстремальных условиях Земных пустынных почв, сохраняется. Однако в результате кардинально изменяются биоразнообразие и структура сообществ. После облучения выживают наиболее устойчивые виды микроскопических грибов, происходит активация развития ряда редких или покоящихся видов грибов.

Список литературы

1. Биланенко Е.Н., Георгиева М.Л. Микромицеты солончаков Южной Сибири (Кулундинская степь) // Микология и фитопатология. 2005. Т. 39. № 4. С. 6–13.
2. Иванова А. Е., Асланиди К. Б., Карпенко Ю. В., Белозерская Т. А. Влияние перекиси водорода на рост мицелиальных микроскопических грибов из местообитаний с разным уровнем радиоактивного загрязнения // Микробиология. 2005. Т. 74. № 6. С. 756–765.
3. Кочкина Г.А., Иванушкина Н.Е., Карасев С.Г. и др. Выживание микромицетов и актинобактерий в условиях длительной природной криоконсервации // Микробиология. 2001. Т. 70. № 3. С. 412-420.
4. Методы почвенной микробиологии и биохимии: Учеб. пособие / Под ред. Д. Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ. 1991. 304 с.
5. Павлов А.К. и др. Лабораторное моделирование современных условий в грунте Марса: "выживаемость" земных микроорганизмов и "следов" возможной жизни на раннем Марсе // Сборник тезисов. 2012. С. 100
6. Pavlov A. K., Shelegedin V. N., Vdovina M. A. et al. Growth of microorganisms in Marian-like shallow subsurface conditions: laboratory modeling // International Journal of Astrobiology. 2010. V. 9. № 1. P. 51–58.

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ВЫЖИВАЕМОСТЬ МЕТАНОГЕННЫХ АРХЕЙ

Ошуркова В.И.[1], Дешевая Е.А.[2], Сузина Н.Е.[1], Шубралова Е.В.[3], Щербакова В.А.[1]

[1]ИБФМ РАН, Пущино, Московская обл., Россия
[2]ИМБП РАН, Москва, Россия
[3]ЦНИИмаш, г. Королёв, Московская обл., Россия

С самого начала освоения космоса вопрос о выживаемости земной жизни в условиях космического пространства привлекал огромное внимание. Космические технологии позволили разработать передовые аппараты, которые, в том числе, позволяют исследовать реакции микроорганизмов на стрессовые условия космоса во время орбитальных полетов. Был достигнут значительный прогресс в понимании

воздействия факторов космической среды, например микрогравитации, вакуума и радиации, на микроорганизмы, подвергающиеся действию реальных и смоделированных космических условий. Чрезвычайно важным является не только знание потенциала выживания микроорганизмов, подвергшихся воздействию космического пространства, но также определение механизмов выживания и адаптации преобладающих видов к экстремальной космической среде, в том числе и на молекулярном уровне. Анализ проведенных исследований показывает, что у микроорганизмов, пребывавших в космической среде, наблюдались глобальные изменения метаболических функций и экспрессии генов на транскрипционном и трансляционном уровнях (Milojevic et al., 2020).

Эксперименты с экспонированием микроорганизмов различных таксономических групп в открытом космосе на спутниках, начиная с пионерских работ (Hotchin et al., 1968) и до современных (Баранов и др., 2009; Satoh et al., 20011; Berger et al., 2012), показали необычайную многомесячную устойчивость живого вещества к поражающим радиационным факторам околоземного космического пространства (ОКП). Способность наземной биоты сохранять жизнеспособность в отрытом космосе ставит проблему переноса жизни из стратосферы в ОКП (Smith et al., 2013), а также затрагивает вопросы экологической безопасности космической техники и планетарного карантина.

Так в ходе эксперимента «Тест», проводимого с 2010 года (Сыроежкин и др., 2013) и направленного на изучение состояния внешней поверхности модулей Российского сегмента Международной космической станции (МКС), в пробах с поверхности МКС были обнаружены жизнеспособные споры и фрагменты ДНК и биологических структур, устойчивых к неблагоприятным факторам космоса. Впервые в мировой практике космических исследований благодаря этому эксперименту реализована регулярная доставка проб мелкодисперсного загрязнения с внешней поверхности МКС в естественном состоянии, что позволяет многократного и оперативного получать уточняющие данные, в том числе о биологическом составе космической пыли.

Мы участвовали в новом этапе эксперимента «Тест» (2018-2019), который был направлен на изучение влияния факторов космического пространства на выживаемость метаногенных архей, размещенных на внешней поверхности МКС, при их длительной экспозиции. Уже было показано в ряде исследований по моделированию различных неблагоприятных условий на выживаемость метаногенов, что это уникальные

микрооранизмы, которые могут противостоять низкому давлению, высушиванию (Kral et al., 2011), а также способны приспосабливаться и привлекать для метаболизма дополнительные источники энергии (Chastain and Kral, 2010).

Эксперимент «Тест» включал две стадии. В ходе наземной мы изучили влияние УФ-облучения и вакуумирования на жизнеспособность трех автотрофных метаногенов рода *Methanobacterium* - *M. veterum* MK4^T VKM B-2440^T, *M. articum* M2^T VKM B-2372^T, *M. bryantii* M.o.H^T VKM B-1629^T, и двух близкородственных видов рода *Methanosarcina* - *Methanosarcina mazei* S6^T VKM B-1636^T и *Methanosarcina mazei* JL01 VKM B-2370. Орбитальная стадия предполагала открытое экспонирование на внешней стороне МКС метаногенного штамма, более устойчивого к действию вышеупомянутых факторов космического пространства, выбранного в ходе наземной стадии. В результате предварительных исследований *M. mazei* S-6^T был отобран для участия в орбитальной стадии эксперимента. В результате 24-месячной экспозиции сохранилась жизнеспособная популяция клеток *M. mazei*, однако, по сравнению с популяцией, экспонируемой и выжившей по истечению 12 месяцев, мы наблюдали ее количественное снижение на три порядка.

Разная выживаемость представителей родов *Methanobacterium* и *Methanosarcina* может быть связана с различиями в составе клеточных стенок и морфологии клеток. В отличие от *M. arcticum* M2^T, имеющего плотную клеточную стенку и способного образовывать цистоподобные клетки, как нами было обнаружено ранее (Shcherbakova et al., 2011), виды рода *Methanosarcina* являются единственными метаногенами, которые образуют многоклеточные агрегаты, окруженные внеклеточным полисахаридом, который помогает защититься от воздействия кислорода и высыхания (Anderson et al., 2012). В этом исследовании мы показали, что метаногены рода *Methanosarcina* способны формировать в условиях космоса специализированную трехслойную сложноорганизованную оболочку с электронно-плотным протопластом полигональной формы, что, вероятно, и позволило пережить экстремальные условия космоса.

Кроме того, представители рода *Methanosarcina* известны своими большими геномами, включающими большое количество избыточных кодирующих последовательностей (Anderson et al., 2012). Считается, что такие последовательности ответственны за способность метаносарцин приспосабливаться к более широкому диапазону сред, благодаря возможности использовать несколько субстратов для метаболизма (H_2/CO_2, монооксид углерода, метанол, метилированные соединения,

ацетат), а также за образование сложных структур, которые могут помочь в защите от стрессовых условий.

Работа поддержана грантом РФФИ №18-34-00334 мол_а.

Список литературы

1. Milojevic T., Weckwerth W. Molecular mechanisms of microbial survivability in outer space: a systems biology approach // Frontiers in Microbiology. 2020. V. 11. P. 923.
2. Hotchin J., Lorenz P., Hemenway C. L. The survival of terrestrial microorganisms in space at orbital altitudes during Gemini satellite experiments // Life sciences and space research. 1968. V. 6. P. 108-114.
3. Баранов В.М., Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Сычёв В.Н., Левинских М.А., Алексеев В.Р., Окуда Т., Сугимото М., Гусев О.А., Григорьев А.И. // ДАН. 2009. Т. 426. № 5. С. 706-709.
4. Satoh K., Nishiyama Y., Yamazaki T., Sugita T., Tsukii Y., Takatori K., Benno Y., Makimura K. Microbe‐I: fungal biota analyses of the Japanese experimental module KIBO of the International Space Station before launch and after being in orbit for about 460 days // Microbiology and immunology.2011. V. 55. №. 12. P. 823-829.
5. Berger, T., Hajek, M., Bilski, P., Körner, C., Vanhavere, F., & Reitz, G. Cosmic radiation exposure of biological test systems during the EXPOSE-E mission // Astrobiology. 2012. V. 12. №. 5. P. 387-392.
6. Сыроешкин А. В., Гребенникова Т. В., Лапшин В. Б., Южаков А. Г., Садыкова Г. В., Цыганков О. С., Шубралова Е. В., Шувалов В. А., Морозова М. А., Чичаева М. А., Головко А. В. Бактерии мирового океана и суши земли в космической пыли на международной космической станции: панспермия или ионосферный лифт? Гелиогеофизические исследования. 2013. № 5 (5). С. 124-132
7. Kral, T. A., Altheide, T. S., Lueders, A. E., Schuerger, A. C. Low pressure and desiccation effects on methanogens: implications for life on Mars // Planetary and Space Science. 2011. V. 59. №2-3. P. 264-270.
8. Chastain B. K., Kral T. A. Approaching Mars-like geochemical conditions in the laboratory: omission of artificial buffers and reductants in a study of biogenic methane production on a smectite clay //Astrobiology. 2010. V. 10. №. 9. P. 889-897.
9. Shcherbakova V., Rivkina E., Pecheritsyna S., Laurinavichius K., Suzina N., Gilichinsky D. Methanobacterium arcticum sp. nov., a methanogenic archaeon from Holocene Arctic permafrost // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2011. № 61. P. 144-147.
10. Anderson K. L., Apolinario E. E., Sowers K. R. Desiccation as a long-term survival mechanism for the archaeon Methanosarcina barkeri // Applied and Environmental Microbiology. 2012. V. 78. №. 5. P. 1473-1479.

ОСОБЕННОСТИ ПАНДЕМИИ COVID-19 В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Рагульская М.В.

ИЗМИРАН, Москва, Россия

Протекание пандемий происходит по законам эпидемиологии. Однако на ранних этапах существуют дополнительные факторы внешней среды и особенностей генетики населения в каждом конкретном регионе, которые могут ускорить развитие локальной эпидемии, а также увеличить тяжесть ее протекания и уровень летальности. В докладе рассматриваются три основные модулирующие фактора, на начальном этапе обеспечивающие дифференцирование тяжести пандемии COVID -19. А именно: динамика солнечной активности и галактических космических лучей, гено - географическое распределение населения (характерные для данной местности гаплогруппы), и температурный режим окружающей среды.

Солнечная активность и интенсивность УФ-излучения имеют периоды различной длительности, из которых наибольшее эпидемиологическое значение имеют около 11-летний цикл и около-100 летний цикл динамики. Такая же цикличность характерна для космических лучей. Статистика инфекционных заболеваний внутри 11-летнего цикла показывает почти двукратное увеличение числа заболевших в максимуме солнечной активности (Рисунок 1).

Рисунок 1. Число инфекционных заболеваний в России по годам (млн человек) и динамика солнечной активности за 1998 -2011 годы (Рагульская М. В., 2019)

В России в 2001 году, являющемся максимумом 23 цикла солнечной активности (Max 23) число заболевших инфекционными заболеваниями составило 53 миллиона человек (данные Федеральной службы государственной статистики России). В затянувшемся минимуме СА между 23 и 24 циклами (min 24) в 2006-2010 годах количество заболевших держалось на уровне 27-30 миллионов человек. На Рисунке 1

видно практически точное временное совпадение динамики обоих процессов. По-видимому, в России, в стране с плохим климатом, постоянная зависимость числа инфекционных заболеваний от фазы цикла солнечной активности проявляется особенно ярко. При пандемиях, когда инфекционной заболевание стремительно распространяется по всему миру, также наблюдается выраженная связь между динамикой солнечной активности и временем возникновения пандемий. Особенности климата и источник заражения при этом играют роль на начальном этапе, а дальше процесс становится самоподдерживающимся.

В 20 веке все пандемии гриппа происходили в максимумах солнечной активности, в 19 и 21 веке – только в максимумах и минимумах солнечной активности. В Таблице 1 (Рагульская М. В. , 2020) приведены данные по пандемиям гриппа и соответствующим экстремумам солнечной активности за последние 130 лет.

Table 1: Influenza pandemics of the 19-21 centuries and the corresponding extremes of solar activity. Designations: maximum cycle number 23 - Max 23; minimum between 23 and 24 SA cycles - min 24.

Years	Disease	Phase Cycle SA
1889-1890	Flu	min13
1918-1920	Spanish Flu, H1N1	Max15
1957-1958	Asian Flu, H2N2	Max19
1968-1970	Hong Kong Flu	Max20
1995-1996	Influenza	min23
2002-2003	SARS, SARS-CoV	Max23
2004-2005	Flu	Max23
since 2004	Avian influenza, H5N1	Max23
2009-2010	Sw	
ine Flu, H1N1	min24	
2019-2020	COVID-19, SARS-CoV-2	min25

Текущая пандемия вируса SARS-CoV-2 происходит одновременно в минимуме 25-го цикла 11-летней солнечной активности (СА) при общем низком уровне квазистолетнего цикла СА. Ее особенностью является значительная вариабельность числа летальных исходов на 1 млн населения в разных странах, причем максимальные значения летальности наблюдаются в достаточно благополучных странах с высоким уровнем развития и организации медицины (Рисунок 2). При этом самые строгие карантинные меры оказываются неэффективными. Более того, относительная летальность, в Иране в 5 -8 раз меньше, чем в Швейцарии и Бельгии. Парадоксальная разница в летальности (более чем в 5-15 раз) требует поиска факторов, не связанных с эпидемиологическими мерами и медицинским обслуживанием в конкретной стране.

Рисунок 2. Развитие пандемии COVID -19 в различных странах в расчете на 1 миллион населения: слева – заболеваемость, по центру – число смертей, справа – количество проведенных тестов (из открытых источников Яндекс.статистика на базе данных Johns Hopkins University).

Наиболее тяжело заболевание протекает на территориях Северной Италии, Испании, Франции, Великобритании, и США, т.е. в странах с высоким уровнем медицины. Все эти страны объединяют генетические особенности населения - доминантная гаплогруппа R1b.

На европейской территории России доминантной гаплогруппой является R1a, для которой оказалось характерно быстрое развитие эпидемии при низкой летальности и большом количестве бессимптомных больных. В северных областях России удельный вес R1a сокращается почти вдвое, уступая место гаплогруппе Nc1. Различия в генетическом составе населения может объяснить существенную разницу развития эпидемии в Москве и Санкт-Петербурге, и ее более мягкое течение в северной столице.

Генетические вариации объясняют различия в силе иммунных реакций лейкоцитарных антигенов. Данная концепция находит свое подтверждение в статье (A. Nguyen с соавт. 2020). Гаплотип и индивидуальная генетическая изменчивость влияет на иммунные реакции и на способность населения реагировать на вирус SARS-CoV-2. Исследовался потенциал защитного иммунитета человеческих лейкоцитарных антигенов (ЧЛА – в русской транскрипции, и HLA – в английской), соответствующего различным гаплогруппам в комплексном анализе in vitro эффективности связывания 145 генотипов HLA: -A, -B и -C для всех пептидов SARS-CoV-2. Выявлено, что HLA-B * 46: 01 (соответствующий одной из ветвей гаплогруппы R1b) имел наименьшее связывание пептидов для SARS-CoV-2, как и для SARS-CoV в ходе эпидемии, протекавшей в 2003 году. Эта группа может быть особенно уязвима для COVID-19.

Обнаружено, что аллели HLA-B * 15: 03; HLA-A * 02: 02; HLA-C * 12: 03 (гаплогруппа R1a) показали наибольшую способность связывать пептиды SARS-CoV-2, а значит - большую устойчивость к вирусу.

Таким образом, в условиях глобального минимума СА развитие пандемии во многом определяется геногеографическим распределением населения, а не медицинскими и карантинными мерами. Текущая пандемия COVID -19 наиболее тяжело протекает в странах с доминантной гаплогруппой *R1b.* На европейской территории России доминантной гаплогруппой является R1a, для которой оказалось характерно быстрое развитие эпидемии при низкой летальности и большом количестве бессимптомных больных. Погодный режим местности оказывает влияние на локализацию очагов коронавируса и длительность периода активного заражения населения. Однако он является менее значимым фактором, чем генетический состав населения, который определяет скорость распространения, тяжесть протекания заболевания и летальность в локальных очагах пандемии COVID – 19.

В ближайшие 30 лет предполагается сохранение крайне низкой солнечной активности. В этих условиях можно ожидать двукратное увеличение числа пандемий (каждые 5-6 лет вместо 10-11 лет) с выраженными геногеографическими отличиями в развитии локальных эпидемий.

Список литературы:

1. Рагульская М. В. Солнце и биосфера: миллиарды лет вместе. М.: Радиофизика, 2019, 147 с. http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Ragulskaya-Sun-2019.pdf
2. Ragulskaya M.V. Space weather and COVID-19 pandemic genogeography. 2020, J Nov Physiother Phys Rehabil 7(1): 031-032
3. Austin Nguyen, Julianne K. David, Sean K. Maden, Mary A. Wood, Benjamin R. Weeder, Abhinav Nellore, Reid F. Thompson. Human leukocyte antigen susceptibility map for SARS-CoV 2, 2020 - DOI: 10.1128/JVI.00510-20

РАЗМНОЖЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ПОЗВОНОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ В КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ: ПРОБЛЕМЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ВОЗМОЖНОСТИ

Прощина А.Е., Гулимова В.И., Харламова А.С., Савельев С.В.

ФГБНУ НИИМЧ, Москва, Россия

Возможность размножения в космосе имеет принципиальное значение для планов по реализации освоения космического пространства. Однако условия в космосе сильно отличаются от земных: гравитация является лишь одним из факторов, которые оказывают влияние на формирование сложных организмов. Необходимо также учитывать такие факторы, как геомагнитное поле Земли, различные циклы

освещенности в течение суток и года, а также фоновое излучение планеты. Их влияние на размножение млекопитающих в значительной степени неизвестно. На данный момент ни одно млекопитающие (или даже позвоночное) животное не провело жизненный цикл от зачатия до полового созревания в условиях космического полета. Появились лишь первые результаты исследований того, как космическая среда влияет на критические фазы размножения и развития: оплодотворение, эмбриогенез, беременность, роды, послеродовое созревание и родительскую заботу. Были проведены эксперименты с рыбами, амфибиями, птицами и грызунами, которые летали в разные фазы своего развития. Показано, что некоторые его этапы могут проходит и в космосе. Например, были представлены доказательства спаривания, оплодотворения и вылупления рыб в космосе (Ijiri, 1995). У самок шпорцевой лягушки (*Xenopus laevis)* в условиях микрогравитации была индуцирована овуляция и их яйца дали личинок (Souza et al., 1995).

Наша лаборатория участвовала в 11.5-суточном эксперименте по развитию головастиков шпорцевой лягушки со стадии 25 на борту спутника «Биокосмос» (Proshchina, Saveliev, 2006). Показано, что в условиях космического полета развитие головного мозга и периферических анализаторов изменяется. Объем белого вещества в полетной группе был на 22% больше, чем в контрольной. По-видимому, он увеличился за счет более активного формирования отростков нейронов в невесомости. При этом объемы сетчатки, ганглия VIII нерва и обонятельных плакод в невесомости уменьшились на 62, 18 и 16% соответственно по сравнению с контрольной группой. Различия по объему ганглия VIII нерва объяснимы: поскольку он связан с вестибулярной и отолитной системой внутреннего уха, изменение афферентных сигналов в невесомости не могло не сказаться на его морфологическом становлении. Однако ясного понимания причин значительной задержки развития глаз и обонятельных плакод до настоящего времени нет.

Рептилии – один из наименее изученных объектов космической биологии. В 2005 году впервые осуществлён успешный 16-суточный орбитальный эксперимент с 5-ю хрящепалыми гекконами (*Chondrodactylus turneri*, 4 самки и 1 самец) на борту непилотируемого космического аппарата (НКА) «Фотон-М2» (Gulimova et al., 2006). Видеозапись не велась, но после приземления на внутренней облицовке контейнера с гекконами обнаружены отложенные самками неоплодотворённые яйца. В дальнейшем они же или следы их поедания гекконами были найдены на стенках контейнеров после орбитальных экспериментов с хрящепалыми гекконами на НКА «Фотон-М3» (12 суток, 2007 г) и «Бион-М1» (30 суток, 2010 г) в которых участвовали только самки.

Единственной попыткой осуществить размножение рептилий в невесомости был предпринятый нашей группой эксперимент с 5-ю фельзумами украшенными (*Phelsuma ornata*, 4 самки и 1 самец) на борту НКА «Фотон-М4», получившего в зарубежной прессе название «Sex-Explorer». Он стартовал 19 июля 2014 года и оставался в космосе всего 44.5 суток вместо запланированных 60. Все гекконы погибли до приземления, отложенные неоплодотворённые яйца были обнаружены только в наземном контрольном эксперименте. Причиной гибели могли быть как низкая температура, так и постепенное падение парциального давления O2 и увеличение концентрации CO2. Тем не менее, на видеозаписях сохранились элементы полового поведения, указывающие на то, что при более благоприятных условиях результат этого полёта мог быть иным (Gulimova et al., 2016).

Также нами был запланирована и начата подготовка орбитального эксперимента по развитию в космосе эмбрионов йеменского хамелеона (*Chamaeleo calyptratus*). Комплекс научной аппаратуры (НА БИОКОНТ-ФЭГ) должен был обеспечить инкубацию 9-и единиц биоматериала на протяжении 60 дней при tº +27±2ºC и влажности 80-100% в субстрате, состоящем из вермикулита, с прижимной сеткой, исключающей флотацию и смещение. Предполагалось, что НА будет обеспечивать также необходимый газообмен посредством вентиляции в непрерывном режиме и поддержание параметров среды благодаря не только подогреву, но и охлаждению инкубатора в случае нештатных ситуаций с помощью элементов Пельтье.

Преимуществом эксперимента на хамелеонах является автономность развития зародышей от материнского организма, который может быть дополнительным источником артефактов в стрессовых условиях. Относительно низкий уровень обмена и продолжительный онтогенез выбранного вида позволяет адаптировать данный объект к продолжительному экспонированию в невесомости и оценить её влияние на нормальное развитие позвоночных. Дополнительным преимуществом хамелеонов как объекта для эмбрионального эксперимента в космосе является чувствительность эмбрионов к гравитации, что позволило бы оценить влияние силы тяжести на ранний онтогенез амниотического организма – прежде всего, на формирование нервной системы и органов чувств. Нами были начаты отработочные эксперименты, однако проект остался неосуществлённым по финансовым и организационным причинам.

Для изучения развития непосредственного влияния невесомости сложно использовать зародышей млекопитающих, в связи с внутриутробным развитием. Влияние организма матери трудно отделить от непосредственных воздействий на зародыш со стороны невесомости. Из-за сложности жизнеобеспечения млекопитающих

исследования их размножения в космосе не продвинулись так далеко, как у других животных. В основном это эксперименты на крысах, протекание беременности у мышей было исследовано только в одном полете. Серова и Денисова (1982) сообщили о результатах 18,5-дневного космического полета (Космос 1129), в котором были отправлены пять самок и два самца крыс. После этого полета не удалось получить крысят, хотя лапаротомия, проведенная самкам, показала, что овуляция имела место. Сообщалось, что две самки забеременели, но не было однозначного доказательства рассасывания эмбрионов. В другом эксперименте (Neurolab) изучали оплодотворения мышей в условиях космического полета. После возвращения к нормальной гравитации родились здоровые мышата, но исследователи отметили, что в невесомости успешных оплодотворений было меньше.

В 1983 г. на биоспутнике "Космос-1514" был проведен эмбриологический эксперимент с млекопитающими, впервые решивший принципиальный вопрос о возможности развития плода при действии невесомости на материнский организм. Животные провели в космосе 13-18 дни беременности, что составляет примерно 1/4 внутриутробного развития крысы. Это время активного роста плода, формирования его нервной и эндокринной систем, скелета, мышц, внутренних органов. Во время полета плоды крыс, начавшие свое развитие на Земле, продолжали расти и развиваться, лишь немного отставая от контроля; после возвращения на Землю они достигли половой зрелости и дали потомство. Однако, результаты эмбриологического эксперимента на биоспутнике "Космос-1514" и сопутствовавших ему наземных модельных опытов выявили как возможность нормального развития плода млекопитающих под действием невесомости, так и серьезные изменения у отдельных особей. Большая часть животных переносила условия полета без необратимых патологических изменений и осложнений в реадаптационном периоде, но у отдельных особей отмечено рождение мертвого помета или ослабленных крысят, погибавших в первые дни жизни (Serova, 2004).

Наша группа участвовала в изучении новорожденных крысят, прошедших половину периода пренатального развития в условиях действия невесомости на материнский организм (в эмбриологическом эксперименте NIH-R1 на космическом корабле “Шатл”) и родившихся на Земле через двое суток после завершения космического полета (Proshchina, Saveliev, 2006). В эксперименте использовали крыс, экспонировавшихся в условиях космического полета на 9-20-й дни беременности. Гистологический и морфометрический анализ головного мозга и периферических анализаторов у полётных крысят выявил пролиферативно-миграционные аномалии развития мозга и дифференцировки нейронов. У 7 из 10 исследованных нами полётных

эмбрионов крыс обнаружены очаги дегенерации нейронов во всех отделах головного мозга. Общий объем медиальных ядер уздечки уменьшился в полётной группе крысят на 21 %.

В совокупности полученные результаты свидетельствуют о сильной потребности в новых исследованиях размножения и раннего развития позвоночных в условиях продолжительного космического полёта. Использование эволюционно и таксономически различных модельных объектах может заметно продвинуть наше понимание проблем и механизмов размножения млекопитающих в невесомости, приблизив его успешное осуществление.

Список литературы

1. Ijiri K. Fish mating experiment in Space-What it aimed at and how it was prepared. // Biological Sciences in Space. 1995. V. 9. № 1. P. 3–16.
2. Souza K.A., Black S.D., Wassersug R.J. Amphibian development in the virtual absence of gravity. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1995. V. 92. № 6. P. 1975-1978.
3. Proshchina A., Saveliev S. Development of Vertebrate Brain Asymmetry under Normal and Space Flight Conditions. // In: Malashichev E.B., Deckel A.W. (Eds.), Behavioral and Morphological Asymmetries in Vertebrates. Landes Biosciences, Georgetown, Texas, USA. 2006. P. 24-32.
4. Gulimova V.I. , Nikitin V.B., Asadchikov V.E., Buzmakov A.V., Okshtein I.L., Almeida E.A.C., Ilyin E.A., Tairbekov M.G., Saveliev S.V. Effect of 16-day spaceflight on the morphology of thick-toed geckos (Pachydactylus turnery Gray, 1846). //Journal of Gravitational Physiology. 2006. V. 13. № 1. P. 197-200.
5. Gulimova V.I., Berdiev R.C., Barabanov V.M., Saveliev S.V. The first experience of behavior investigation of Ornate day geckos (Phelsuma ornata) in a long orbital experiment. // ESA / ISGP / CNES Joint Life Sciences Meeting 'Life in Space for Life on Earth' Programme & Abstract Book. 2016. P.265-266.
6. Serova L.V. Ontogenesis of mammals and gravity. Journal of Gravitational Physiology. 2004. V. 11. № 2. P. 161-4.

Секция 5: ВНЕЗЕМНЫЕ МЕСТООБИТАНИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРЯМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ (ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУНЫ, МАРСА, КОМЕТ, МЕТЕОРИТОВ, МЕЖЗВЕЗДНОЙ И МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЫЛИ И ДРУГИХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ)

РАЗНООБРАЗИЕ ИСКОПАЕМЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В УГЛИСТЫХ ХОНДРИТАХ

Рюмин А.К.

ОИЯИ, Дубна, Московская обл., Россия

Первые работы по фоссильным остаткам микроорганизмов в метеоритах были опубликованы 1960-х годах (Claus, Nagy, 1961; Nagy et al., 1961; Palik, 1962; Timofejev,

1963 и др.). Вторая половина 1990-х 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 в секторе астробиологии ЛРБ ОИЯИ, а также из литературных источников (Розанов, 1996; Жмур и др., 1997; Hoover, 1997, 2007, 2008a,b, 2009, 2010, 2014; Hoover et al., 1998, 2003, 2004a,b, 2005, 2018; Герасименко и др., 1999; Hoover, Rozanov, 2002; Астафьева и др., 2011 и др.), микрофоссилии в этих метеоритах 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 празинофиты, спороподобные формы, пеннатные диатомеи, диатомоподобные фрагменты, раковинные амебы и альвеоляты) (см. табл. 1). Кроме того, в метеорите Оргей и, возможно, Ногойя были обнаружены магнитотактические бактерии.

Таблица 1. Распространение основных групп микрофоссилий в углистых хондритах

Углистые хондриты		Микрофоссилии																	
Тип	Название	Хемо- или биогенные структуры			Прокариоты								Эукариоты						
		Фрамбоиды пирита	Фрамбоиды магнетита	Сферические формы, глобулы	Кокковидные формы	Тороидальные формы	Палочковидные формы (бациллы)	Спириллы	Нитевидные цианобактерии или серобактерии	Псевдонитевидные формы	Полу- и субсферические формы	Гифы актиномицет	Акритархи и акритархоподобные формы	Празинофиты одиночные	Празинофиты колониальные	Диатомеи или диатомоподобные формы	Спороподобные формы	Раковинные амебы	Альвеоляты
CI2	Алаис	+							+										
	Ивуна			+				+	+				+						
	Оргей	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

	Тагиш Лейк	+	+		+				+			+	+						
CM 2	Агуас Заркас			+					+										
	Беллз								+										
	Джбилет Винсельван								+										
	Колд Боккевельд								+										
	Мигеи				+				+				+						
	Ногойя				+		+												
	Мурчисон	+		+	+		+		+		+	+	+	+		+			+
	Мюррей				+				+				+						
	Сюттерз Милл								+										
CO3	Дараль Гани								+				+						
	Каинсаз	+																	
	Рейнбоу				+				+										
CR3	Акфер 324								+										
CV3	Альенде			+	+				+										
	Ефремовка				+				+			+							

Список литературы:

1. Астафьева М. М., Гептнер А. Р., Герасименко Л. М., Жегалло Е. А., Жмур С. И., Карпов Г. А., Орлеанский В. К., Пономаренко А. Г., Розанов А. Ю., Сумина Е. Л., Ушатинская Г. Т., Хувер Р., Школьник Э. Л. 2011. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Научные редакторы: А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. – М.: ПИН РАН. 2011. С. 1-172.
2. Герасименко, Л. М., Жегалло, Е. А., Жмур, С. И., Розанов, А. Ю., Хувер, Р. Бактериальная палеонтология и исследования углистых хондритов // Палеонтологический журнал. 1999. №4. С. 103-125.
3. Жмур, С. И., Розанов, А. Ю., Горленко, В. М. Следы древнейшей жизни в космических телах Солнечной системы // Природа. 1997. №8. С. 3-10.
4. Розанов А. Ю. Цианобактерии и, возможно, низшие грибы в метеоритах. Соросовский образовательный журнал. 1996. №11. С 61–65.
5. Claus G., Nagy, B. A microbiological examination of some carbonaceous meteorites // Nature. 1961. V. 192. P.594-596.
6. Hoover R. B. Meteorites, Microfossils and Exobiology // Proc. SPIE. 1997. V. 3111. P. 115-136.
7. Hoover R. B. Microfossils of cyanobacteria in carbonaceous meteorites // Proc. SPIE. 2007. V. 6694. P. 669408-1-18.

8. Hoover R. B. Comets, Carbonaceous Meteorites and the Origin of the Biosphere // Biosphere Origin and Evolution / N. Dobretsov, N. Kolchanov A. Rozanov, G. Zavarzin (Eds.). Springer US. New York. 2008a. P. 55-68.
9. Hoover R. B. Microfossils of filamentous prokaryotes in CI1 and CM2 meteorites // Proc. SPIE. 2008b. V. 7097. P. 709703.
10. Hoover R. B. Microfossils in Carbonaceous meteorites // Proc. SPIE. 2009. V. 7441. P. 744103_1-19.
11. Hoover R.B. Chiral Biomarkers and Microfossils in Carbonaceous Meteorites // Proc. SPIE. 2010. V. 7819. 7819_03-15.
12. Hoover R.B. Microfossils and biomolecules in carbonaceous meteorites: implications to the possibility of life in water-bearing asteroids and comets // Proc. SPIE 2014. V. 9226. P. 922602.
13. Hoover R. B., Rozanov A. Yu., Zhmur S. I., Gorlenko V. M. Further evidence of Microfossils in Carbonaceous Chondrites // Proc. SPIE. 1998. V. 3441. P. 203-216.
14. Hoover R. B., Rozanov A. Y. Chemical biomarkers and microfossils in carbonaceous meteorites. In Instruments // Proc. SPIE. 2002. V. 4495. P. 1-18.
15. Hoover R. B., Jerman G., Rozanov A. Yu., Davies P. C. W. Biomarkers and Microfossils in the Murchison, Rainbow, and Tagish Lake meteorites // Proc. SPIE. 2003. V. 4859. P. 15-31.
16. Hoover R. B., Jerman G., Rozanov A. Yu., Sipiera P. P. Indigenous microfossils in carbonaceous meteorites // Proc. SPIE. 2004a. V. 5555, P.1-17.
17. Hoover R. B., Rozanov A. Yu., Jerman G., Costen J. Microfossils in CI and CO Carbonaceous Meteorites // Proc. SPIE. 2004b. V. 5163. P. 7-22.
18. Hoover R. B., Rozanov A. Yu. Microfossils, Biominerals and Chemical Biomarkers in Meteorites // Perspectives in Astrobiology. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences / R. B. Hoover, R. R. Paepe, A. Yu. Rozanov (Eds.). IOS Press. Amsterdam. 2005. V. 366. P. 1-240.
19. Hoover R. B., Rozanov, A. Yu., Krasavin, E.A., Ryumin, A. K., Kapralov, M. I. Diatoms in the Orgueil Meteorite // Paleontological Journal. 2018. V. 52. №13. P. 1647–1650.
20. McKay D. S., Gibson E. K. Jr., Thomas-Keprta, K. L., Vali H., Romanek C. S., Clemett S. J., Chillier X. D., Maechling C. R., Zare R. N. Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001 // Science. 1996. V. 273. Issue 5277. P. 924-029.
21. 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. P.25-35.
22. Palik P. Further life-forms in the Orgueil meteorite // Nature. 1962. V. 194. P.1065.
23. Timofejev B. V. Lebensspuren in Meteoriten: Resultate einer microphytologischen analyse // Grana. Palynol. 1963. V. 4. P. 92-99.

ЭКЗОБИОЛОГИЯ ВЕНЕРИАНСКИХ ОБЛАКОВ: ВОЗМОЖНЫЕ МИКРОБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И МИКРООРГАНИЗМЫ

Коцюрбенко О.Р.

Югорский Государственный Университет, Ханты-Мансийск, Россия

Совместная российско-американская космическая программа по изучению Венеры Venera-D включает астробиологические исследования, объектом которых является облачный слой планеты на высоте от 50 до 65 км, содержащий аэрозоли,

состоящие из водного раствора серной кислоты, где по оценкам ученых должны существовать физико-химические условия, приемлемые для развития живых форм, аналогичных земным экстремофильным микроорганизмам. Эти условия характеризуются высокими температурами (до 80^{o}C), чрезвычайно низким pH (-1,5 – +0,5) и вероятным присутствием соединений серы и железа, которые могут выступать в качестве основных акцепторов электронов в микробных окислительно-восстановительных реакциях.

Среди земных микроорганизмов, которые по своим физиологических свойствам могут рассматриваться в качестве аналогов гипотетических венерианских организмов находятся представитель протеобактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* и представители кренархеот *Acidianus* и *Stygiolobus*. Все вышеупомянутые организмы являются ацидо-термофилами и осуществляют хемотрофный тип питания, восстанавливая Fe^{3+} и серу с получением энергии.

К микробным процессам, которые могут быть вовлечены в цикл элементов в предполагаемой обитаемой зоне облачного слоя Венеры могут относится сульфат-и железо-редукция, диспропорционирование серы, диссимиляционное восстановление нитрата до аммония (DNRA), восстановление нитрата, совмещенное с окислением Fe^{2+} (NRFO) и аноксигенный фотосинтез.

По аналогии с земными экстремофилами венерианские организмы могут обладать широким спектром механизмов противостояния различных стрессорным факторам окружающей среды, например, таким как продукция осмо- и термопротекторов, различных внеклеточных полимерных соединений (EPS), увеличивающих гидрофильность клеточной поверхности. Некоторые из таких веществ могут быть важными биомаркерами при поиске проявлений биологической активности в астробиологических исследованиях в космических миссиях на Венеру.

Исходя из специфики обсуждаемой экосистемы, можно предположить, что венерианские микроорганизмы должны быть тесно связаны с геохимическим процессами, протекающими в облачном слое и зависеть от стабильности и физико-химических свойств аэрозолей как их единственно-возможной среды обитания и, таким образом, осуществлять аэрогеохимически зависимый хемолитотрофный способ существования.

КРИТИЧЕСКОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ И ВЫМИРАНИЕ ДИНОЗАВРОВ

Сергеев В.Н., Печерникова Г.В.

ИДГ РАН, Москва, Россия

Критическое замедление – это уменьшение скорости восстановления состояния системы после какого-либо воздействия в преддверии критического перехода (Scheffer, et al., 2009). Это явление имеет универсальный характер и присуще различным по природе системам. Оно встречается в физике, геофизике, медицине и физиологии, экологии, климатологии и др. – везде, где есть критические явления (Scheffer, et al., 2012).

Если основываться на возможности существования критического поведения для эволюционных процессов живой природы (Bak, Sneppen, 1993; Sznajd-Weron, Weron, 2001; Лихошвай и др., 2017; Лихошвай, Хлебодарова, 2019), то использование методов исследования критических явлений полезно и для изучения массовых вымираний.

Массовые вымирания видов живых существ на протяжении истории Земли случались неоднократно. Свидетельством этого являются палеонтологические данные. Причинами таких событий могло быть быстрое изменение среды обитания, вызванное внешними воздействиями, такими как столкновения астероидов и комет с Землей, извержения вулканов и т.д. В тоже время не каждое такое крупное катастрофическое событие в истории Земли сопровождалось массовыми вымираниями (Archibald et al., 2010).

Массовое вымирание на границе мелового и палеогенового периода, около 66 миллионов лет назад, как считается, было вызвано столкновением с Землей астероида (Gulick, et al., 2019; Hull, et al., 2020). В результате падения этого астероида образовался кратер Чиксулуб на полуострове Юкатан в Мексике диаметром 180 км, являющийся третьим по величине из известных в настоящее время ударных кратеров. Одними из жертв этого события были нептичьи динозавры.

Во времена существования динозавров (динозавры существовали около 165 миллионов лет), около 200 миллионов лет назад случилось триасово-юрское вымирание, однако динозавры не только пережили это событие, но и смогли занять

освободившиеся экологические ниши. Мел-палеогеновое и триасово-юрское вымирания относятся к крупнейшим массовым вымираниям в истории Земли и сопоставимы по масштабам. Это обстоятельство может указывать на уменьшение способности динозавров приспосабливаться к меняющимся условиям обитания к моменту их исчезновения.

За несколько миллионов лет до гибели динозавров палеонтологические данные их видообразования показывают увеличение времени восстановления до прежних значений числа новых видов после их уменьшения (Starrfelt, Liow, 2016). Это свидетельствует в пользу гипотезы, говорящей о том, что динозавры ко времени своего исчезновения уже приближались к своей гибели (Sakamoto, et al., 2016; Sakamoto, et al., 2019), а внешние воздействия, вызвавшие мел-палеогеновое массовое вымирание видов живых существ, являлись триггером вымирания динозавров.

Список литературы:

1. Лихошвай В.А. и др. Стазис и периодичность в эволюции глобальной экосистемы: минимальная логистическая модель // Матем. биология и биоинформ. 2017. Т.12. №1. С.120–136.
2. Лихошвай В.А., Хлебодарова Т.М. Феномен прерывистой эволюции: математическая модель / Тезисы Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики». 2019. С.156.
3. Archibald J.D., et al. Cretaceous extinctions: multiple causes. Science. 2010. V.328. N.5981. P.973.
4. Bak, P., Sneppen, K. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution // Phys. Rev. Lett. 1993. 71(24). P.4083–4086.
5. Gulick S.P.S., et al. The first day of the Cenozoic // PNAS. 2019. 116 (39). P.19342–19351.
6. Hull P.M., et al. On impact and volcanism across the Cretaceous-Paleogene boundary // Science. 2020. V.367. P.266–272.
7. Sakamoto M., et al. Dinosaurs in decline tens of millions of years before their final extinction // PNAS. 2016. V.113. P.5036–5040.
8. Sakamoto M., et al. Dinosaurs still in long-term net speciation decline before the K-Pg boundary // PaleorXiv. 2019. March 22. Doi:10.31233/osf.io/zwg2j.
9. Scheffer M., at al. Early-warning signals for critical transitions // Nature. 2009. V. 461. P. 53–59.
10. Scheffer M., et al. Anticipating critical transitions // Science. 2012. V. 338. P. 344–348.
11. Starrfelt J, Liow LH. How many dinosaur species were there? Fossil bias and true richness estimated using a Poisson sampling model. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 2016. 371. 20150219.
12. Sznajd-Weron K., Weron R.L. A new model of mass extinctions // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2001. V.293. N.3–4. P.559–565.

ГОМОЛОГИЧЕСКИЕ РЯДЫ В НЕЖИВОМ И ЖИВОМ.

Суслов В. В., Пономаренко М. П.

ИЦиГ СО РАН, Новосибирск, Россия

Если вавиловский центр – обилие контрастных условий на небольшой площади, то его разнообразие делимо на глобальное (устойчивое *везде и всегда* сочетание поднабора из набора факторов) и локальное (неустойчивое сочетание факторов *здесь и сейчас*)[1]. Прокариоты – мир больших сообществ и малых, краткоживущих особей. Эти сообщества по принципу доминанты[2] стабилизируют набор условий, чье долгое существование делает возможным отбор на оптимизацию. *В пределе связь с центром теряется[3], а с ней и биологическая специфика ГР: 1-4 нет[4]; и в живом, и в неживом ГР равно заданы через перебор ограниченного числа внешних (члены ряда неспособны на них влиять) факторов.* Эукариоты – мир малых сообществ, но больших долгоживущих особей, специализированных не столько на потреблении, сколько на поиске немногих (из-за бедной биохимии) субстратов, черпая для этого энергию из трех, но наиболее эффективных типов энергообмена (фотосинтез, брожение, O_2-дыхание). *Поскольку время приложения отбора ограничено временем поиска, постольку возможен отбор на ФП, а не на оптимизацию, задолго до неё цель поиска будет или достигнута, или сменена.* Популяция же обязана во избежание стравливания стаций перемещаться по центру, что рвет однозначную связь СТЭ “чем меньше адаптивных мутаций, тем больше нейтральных”. Какая-то часть мутаций не сможет быть тестирована в данном поколении, но это не значит, что они не будут тестированы в одном из следующих, когда популяция наткнется на нужную стацию. Такие *отложенные мутации* дают пул, стохастически обменивающийся с пулом адаптивных мутаций, а многократность различных миграций по центру стратифицирует по витальности и доминантности (как у Вавилова) оба пула в общие ГР. Тогда *в каждый момент времени* под отбором будет мало мутаций (как требует дилемма Холдейна). *Темпоральный аспект* делает необязательным ороrельеф: поскольку организмы своей деятельностью разнообразят стации[5], постольку они создают центр, существующий пока есть они[6]. *Отсюда, критичным для возникновения жизни стало появление поисковой, а затем и прогностичной способности[7], подчинившей борьбу за свободную энергию (такую же как при отборе матричных неживых систем) в ветви, приведшей к эвкариотам и подчинившейся ей в ветвях прокариот.*

[1]Т.к. в обоих случаях могут меняться значения факторов, здесь они не рассматриваются.
[2] Подобной принципу Ухтомского в нейробиологии: особь здесь или покоится или участвует в доминирующих в сообществе процессах. Противодействие бесперспективно по малости особи.
[3] По мере нивелирования локального разнообразия указанный устойчивый поднабор становится предзадан, например, биохимической несовместимостью реакций по Заварзину, или любой несовместимостью признаков (по Старку-Заварзину). Предзаданность Вавилов в 1935г вывел из ЗГР.
[4] В частности, компенсация субпризнаков определяется не ФП, а экстремальным законом.
[5] Впервые описано как кондиционирование стаций Беклемишевым после гибели Вавилова. Позже многократно переоткрыто, но не связано с ЗГР. Географический центр Вавилова – один из возможных.
[6] Отсюда редкость центров на островах, где биота гибнет, если не отбирается на экономию. Нео- и палеобиогеография говорят о низкой в сравнении с континенталами/океанистами экспансивности и адаптивности (вопреки изощренности адаптаций) биот островов/изолированных водоемов. То же у дестабилизантов в природе (данные Ростана-Вершинина, Чадова, канцерогенез) и опыте Беляева: дестабилизация не хуже стабилизации запирает филум в комфортной, т.е. часто близкой к предковой, среде, *делая его чувствительным к отбору на оптимизацию.*
[7] См. Суслов В.В. Смысл организма – систематичность экспансии//2-ая Всероссийская конференция по астробиологии. Пущино, 2016.

СЕКЦИЯ 4.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДОБЛУЧЕНИЯ, ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ТИПА МИНЕРАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ НА РАДИОРЕЗИСТЕНТНОСТЬ МИКРООРГАНИЗМОВ

Чепцов В.С.[1 2], Белов А.А. [1], Воробьева Е.А. [1], Павлов А.К. [3], Ломасов В.Н. [4]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]ИКИ РАН, Москва, Россия
[3]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[4]СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

Воздействие ионизирующей радиации рассматривается в качестве основного фактора, лимитирующего сохранение микроорганизмов и биомаркеров на криогенных космических телах и в межпланетном пространстве (Cheptsov et al., 2018). Устойчивость к облучению и количество радиационных повреждений зависят от условий облучения, влияющих на количество и активность свободных радикалов, являющихся основным источником (до 90%) радиационных повреждений. В частности, среди важнейших факторов рассматриваются температура и давление (Dartnell et al., 2010; Cheptsov et al., 2018). Вероятно, на устойчивость к воздействию внеземных факторов также существенно влияет состав минеральной матрицы. Минералы различны по адсорбционным свойствам, что влияет на физиологическое состояние микроорганизмов (Deo et al., 2001). Кроме того, минералы могут выступать в роли источников и акцепторов свободных радикалов при воздействии ионизирующей радиации. Влияние состава минеральной матрицы на радиорезистентность микроорганизмов к настоящему времени практически не исследовано.

Существенным ограничением в радиобиологических исследованиях является их длительность . В ходе экспериментов высокие дозы радиации накапливаются в

течение относительно кратких промежутков времени (от минут до дней), в то время как во внеземном пространстве аналогичные дозы накапливаются в течение геологического времени (от тысяч до миллионов лет). В связи с этим возникает вопрос о влиянии интенсивность излучения на выживаемость микроорганизмов (при наборе одинаковых доз). Известно, что при облучении микроорганизмов в условиях нормальной температуры, нормального давления и при наличии доступной воды, с уменьшением интенсивности излучения радиорезистентность возрастает благодаря репарации повреждений во время облучения (Dartnell et al., 2010). Однако неясно, влияет ли интенсивность излучения на выживаемость микроорганизмов при облучении в условиях вакуума и/или низких температур, т. е. в условиях, при которых репарация повреждений невозможна или замедлена.

Предполагается, что на Марсе микроорганизмы могут существовать в эфемерном виде (Westall et al., 2013; Cheptsov et al., 2018), метаболизируя и размножаясь лишь в редкие периоды наступления благоприятных условий. В этом случае между такими периодами они должны накапливать радиационные повреждения. Известно, что возможно увеличение радиорезистентности микроорганизмов при многократном накоплении популяцией сублетальных доз радиации и последующем создании условий для размножения (Harris et al., 2009; Tesfai et al., 2011). Однако следует отметить, что подобные исследования немногочисленны и проводились лишь для *Escherichia coli* и *Bacillus spp*., а также не включали воздействие каких-либо других астробиологических факторов.

Нами проведено облучение бактерий *Arthrobacter polychromogenes* SN_T61, *Kocuria rosea* SN_T60 и *Xanthomonas sp.* DP3 гамма-излучением дозой 1 кГр в условиях низкого давления (1 торр) и низкой температуры (-50°C) при различной интенсивности излучения (4 кГр/ч и 0.8 кГр/ч), иммобилизованных на различных минеральных носителях (монтмориллонит и аналог лунной пыли). При этом облучены штаммы, ранее не подвергавшиеся воздействию радиации, и предварительно облученные (предоблученные) гамма-излучением штаммы и прошедшие 10 пассажей на плотных питательных средах (модель кратковременного наступления благоприятных условий между длительными периодами криоконсервации). Оценено влияние интенсивности излучения (4 кГр/ч *vs* 0.8 кГр/ч), минерального носителя (монтмориллонит *vs* аналог лунной пыли) и предоблучения на выживаемость микроорганизмов.

Исследованные штаммы бактерий были выделены ранее из аридной почвы пустыни Негев (Cheptsov et al., 2018) и дерново-подзолистой почвы Московской области (Cheptsov et al., 2019). Для облучения микроорганизмы были иммобилизованы

в монтмориллоните и в аналоге лунной пыли, представляющего собой смесь стеклянных микросфер диаметром до 50 мкм. Для облучения образцы помещались в ранее описанную климатическую камеру (Pavlov et al., 2010), позволяющую поддерживать низкое давление (1 торр) и низкую температуру (-50°C) при облучении. Облучение проводили на гамма-установке К-120000 с источниками ^{60}Co при интенсивностях излучения 0.8 кГр/ч и 4 кГр/ч. Доза радиации составляла 1 кГр. Контролем служили необлученные образцы иммобилизованных на соответствующих минеральных носителях микроорганизмов. Численность жизнеспособных бактерий (число колониеобразующих единиц, КОЕ) в образцах определяли методом посева на плотную питательную глюкозо-пептонно-дрожжевую среду (Cheptsov et al., 2018). Культивирование проводили при +28°C.

Таблица 1. Зависимость радиорезистентности бактерий от условий облучения.

Штамм	Интенсивность излучения, кГр/ч	Минеральная матрица	Предоблучение	Число КОЕ относительно контроля
Kocuria rosea SN_T60	4	Монтмориллонит	Не предоблученный	9.40%
	4	Аналог пыли	Не предоблученный	8.09%
	4	Монтмориллонит	Предоблученный	27.01%
	4	Аналог пыли	Предоблученный	12.54%
	0.8	Монтмориллонит	Не предоблученный	28.08%
	0.8	Аналог пыли	Не предоблученный	21.92%
	0.8	Монтмориллонит	Предоблученный	80.12%
	0.8	Аналог пыли	Предоблученный	26.50%
Arthrobacter polychromogenes SN_T61	4	Монтмориллонит	Не предоблученный	39.14%
	4	Аналог пыли	Не предоблученный	12.96%
	4	Монтмориллонит	Предоблученный	63.93%
	4	Аналог пыли	Предоблученный	16.63%
	0.8	Монтмориллонит	Не предоблученный	44.76%
	0.8	Аналог пыли	Не предоблученный	36.50%
	0.8	Монтмориллонит	Предоблученный	92.62%
	0.8	Аналог пыли	Предоблученный	42.40%
Xanthomonas sp. DP3	4	Монтмориллонит	Не предоблученный	0.31%
	4	Аналог пыли	Не предоблученный	0.002%
	0.8	Монтмориллонит	Не предоблученный	10.99%
	0.8	Аналог пыли	Не предоблученный	0.19%

Для всех исследованных штаммов бактерий, иммобилизованных на обоих минеральных носителях, при обеих интенсивностях излучения наблюдалось большее снижение числа КОЕ штаммов, не подвергавшихся предоблучению, по сравнению с предоблученными штаммами (Таблица 1). При облучении в монтмориллоните сохранялась более высокая доля живых бактерий в сравнении с облучением в аналоге лунной пыли, причем эта закономерность в большинстве случаев была лучше выражена

у предоблученных штаммов. Для всех штаммов наблюдалась более высокая численность жизнеспособных клеток при понижении интенсивности излучения. Для штаммов *A. polychromogenes* SN_T61 и *K. rosea* SN_T60 доля жизнеспособных клеток после облучения при интенсивности 0.8 кГр/ч в 1.2-3 раза превышала таковую при 4 кГр/ч. Наиболее выражено влияние интенсивности излучения наблюдалось для штамма *Xanthomonas sp.* DP3: доля выживших микроорганизмов возрастала в 30-100 раз при понижении интенсивности излучения.

В результате исследования продемонстрировано, что свойства минерального носителя оказывают существенное влияние на радиорезистентность микроорганизмов, что подтверждает необходимость детального изучения механизмов такого влияния и выявления минералов, обладающих наилучшими протекторными свойствами. Решение подобной задачи позволило бы определить наиболее перспективные типы пород для исследования астробиологическими космическими миссиями. Данные о влиянии интенсивности излучения на выживаемость микроорганизмов свидетельствуют о том, что существующие оценки возможной длительности сохранения микроорганизмов во внеземных условиях значительно занижены. Полученные результаты указывают на возможность быстрого возрастания радиорезистентности гипотетических микроорганизмов в реголите Марса при их существовании в эфемерном виде даже после одного цикла криоконсервации и наступления благоприятных для роста и размножения условий.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-02-00470.

Список литературы

1. Cheptsov V., Vorobyova E., Belov A., et al. Survivability of soil and permafrost microbial communities after irradiation with accelerated electrons under simulated Martian and open space conditions // Geosciences. 2018. V. 8. № 8. P. 298.
2. Cheptsov V., Belov A., Vorobyova E., et al. Viability of the soddy–podzolic soil microbial community after 148–1250 kGy gamma irradiation // Planetary and Space Science. 2019. V. 172. P. 8-13.
3. Dartnell L.R., Hunter S.J., Lovell K.V., et al. Low-temperature ionizing radiation resistance of *Deinococcus radiodurans* and Antarctic Dry Valley bacteria // Astrobiology. 2010. V. 10. P. 717–732.
4. Deo N., Natarajan K.A., Somasundaran P. Mechanisms of adhesion of *Paenibacillus polymyxa* onto hematite, corundum and quartz // International Journal of Mineral Processing. 2001. V. 62. № 1-4. P. 27-39.
5. Harris D.R., Pollock S.V., Wood E.A., et al. Directed evolution of ionizing radiation resistance in *Escherichia coli* // Journal of Bacteriology. 2009. V. 191. № 16. P. 5240-5252.
6. Pavlov A.K., Shelegedin V.N., Vdovina M.A., Pavlov A.A. Growth of microorganisms in Martian-like shallow subsurface conditions: laboratory modeling // International Journal of Astrobiology. 2010. V. 9. P. 51–58.

7. Tesfai A.T., Beamer S.K., Matak K.E., Jaczynski J. Radioresistance development of DNA repair deficient *Escherichia coli* DH5α in ground beef subjected to electron beam at sub-lethal doses // International Journal of Radiation Biology. 2011. V. 87. № 6. P. 571-578.
8. Westall F., Loizeau D., Foucher F., et al. Habitability on Mars from a microbial point of view // Astrobiology. 2013. V. 13. № 9. P. 887-897.

МЕТАБОЛИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВЛАГИ

Белов А.А.[1], Чепцов В.С.[1,2]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]ИКИ РАН, Москва, Россия

Микробные сообщества экосистем, являющихся аналогами реголитов инопланетных тел, являются ценными модельными объектами для изучения потенциальной обитаемости внеземного пространства (Moissl-Eichinger et al., 2016). Такими аналогами являются различные экстремальные экотопы, в частности, многие криоаридные и аридные пустыни (Oarga, 2009; Saxena et al., 2016). Проведенные исследования показали высокие значения численности и разнообразия прокариот, существующих в этих условиях (Chanal et al., 2006; Rampelotto, 2010; Saxena et al., 2016), а также их высокую стресс-толерантность, в том числе к условиям внеземного пространства (Belov et al., 2020; Cheptsov et al., 2018). В большинстве подобных экосистем, как и во внеземном пространстве, наблюдается дефицит доступной для микроорганизмов влаги (Stevenson et al., 2015). Однако исследования метаболической активности микробных сообществ в условиях недостатка воды немногочисленны.

Нами проведена оценка способности прокариотных сообществ сохранять метаболическую активность *in situ* и *in vitro* в градиенте активности воды (A_w). Объектами исследования служили прокариотные сообщества, приуроченные к древней мерзлой осадочной породе, отобранной в районе Колымской низменности, и песчаным поверхностным осадочным породам, отобранным в Воронежской области и в пустыне Сахара (Алжир). Для оценки потенциальной метаболической активности *in situ* к исследуемым породам воздушно-сухой влажности добавляли в сухом виде источники углерода (глюкоза и дрожжевой экстракт 0.1%) и противогрибной антибиотик (циклогексемид 100 мкг/г). Далее навески пород массой 200 мг в пятикратной повторности помещали в микрокосмы, содержащие раствор с постоянным давлением паров воды, таким образом, чтобы непосредственного контакта между породами и раствором не было (Рисунок 2б). Через 180 суток инкубации измеряли концентрацию

углекислого газа в микрокосмах. Для выявления способности микроорганизмов репродуцировать на питательных средах был осуществлен микробиологический посев из нативного образца породы пустыни Сахара на питательную среду R2A (van der Linde et al., 1999) с добавлением глицерина для снижения активности воды (Marcolli & Peter, 2005).

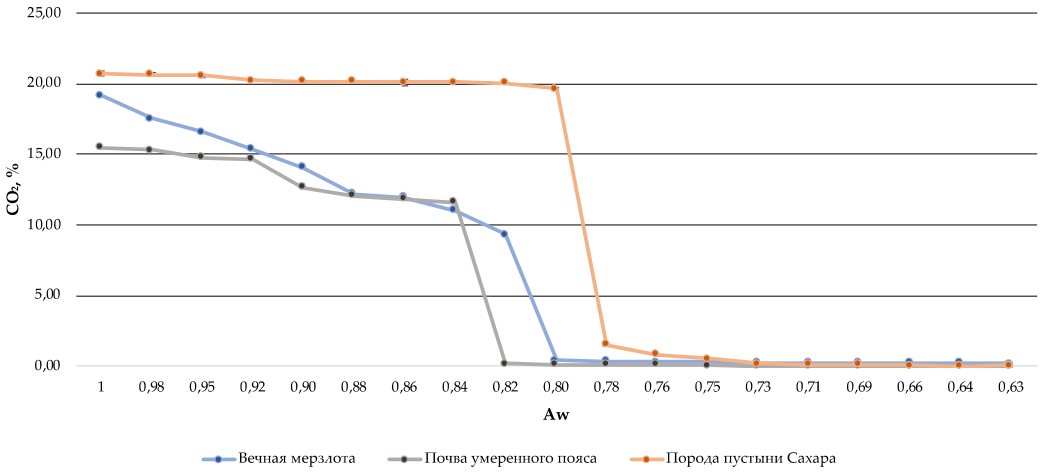


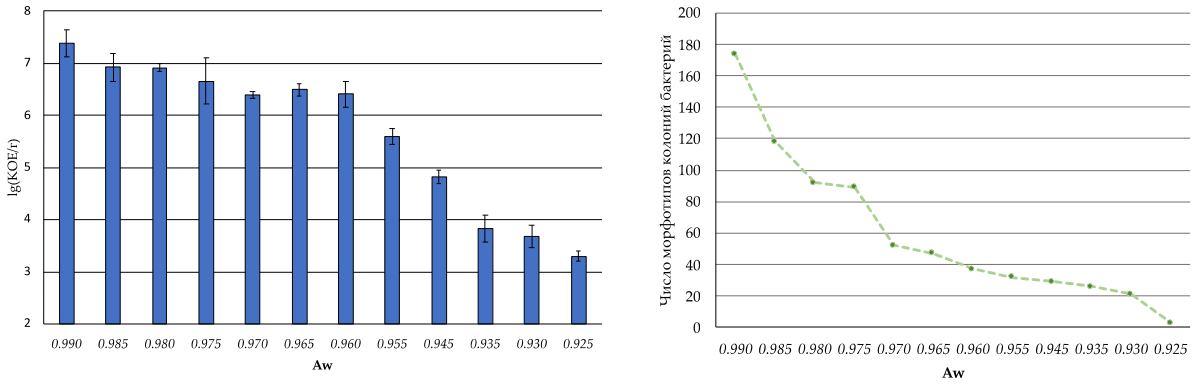
Рисунок 1. Показатели эмиссии углекислого газа прокариотными сообществами при различных значениях активности воды.

Среди исследованных сообществ наиболее толерантным к низкой доступности влаги являлось сообщество, приуроченное к поверхностной осадочной породе пустыни Сахара – дыхательная активность регистрировалась при A_w равной 0.75 (Рисунок 1). Снижение эмиссии CO_2 имело резкий характер при A_w 0.8 – 0.78. В диапазоне A_w от 1 до 0.8 интенсивность эмиссии CO_2 мало отличалась. Наименее толерантным являлось прокариотное сообщество, приуроченное к породе, отобранной в не экстремальной экосистеме (Воронежская область).

а **б**

Рисунок 2. Культивируемое бактериальное сообщество, выделенное из поверхностной породы пустыни Сахара при A_w=0.980 (а) и микрокосмы для выявления метаболической активности in situ (б).

В ходе культивирования бактерий из образца породы пустыни Сахара (Рисунок 2а) выявлен рост на питательных средах с A_w вплоть до значения 0.925. Образование колоний при более низких значениях активности воды не наблюдалось. Снижение численности культивируемых бактерий носило резкий характер в диапазоне A_w 0.960 – 0.955 единиц (Рисунок 3а). В то же время, разнообразие культивируемых сообществ (Рис. 3б) резко сокращалось при значении A_w равном 0.985; при A_w равной 0.925 единиц сообщество было представлено тремя видами бактерий, представителями филума *Actinobacteria*.



а **б**

Рисунок 3. Показатели численности (а) и морфологического разнообразия (б) культивируемых бактериальных сообществ, выделенных из поверхностной породы пустыни Сахара на питательных средах с градиентом активности воды.

Полученные результаты свидетельствуют о способности прокаротных сообществ аридных и криоаридных пустынь *in situ* к сохранению метаболической активности при снижении доступности влаги. *In vitro* развитие сообществ наблюдалось в намного более узком диапазоне высоких активностей воды, что может быть обусловлено условиями культивирования и наличием некультивируемых прокариот.

В дальнейших исследованиях планируется изучение численности и структуры метаболически активных *in situ* прокариот в условиях дефицита влаги и изучение структуры *in situ* прокариотных сообществ при разных активностях воды.

Список литературы

1. Belov, A. A., Cheptsov, V. S., Manucharova, N. A., & Ezhelev, Z. S. (2020). Bacterial Communities of Novaya Zemlya Archipelago Ice and Permafrost. *Geosciences*, 10(2), 67. Doi: 10.3390/geosciences10020067
2. Chanal, A., Chapon, V., Benzerara, K., Barakat, M., Christen, R., Achouak, W., ... & Heulin, T. (2006). The desert of Tataouine: an extreme environment that hosts a wide diversity of microorganisms and radiotolerant bacteria. *Environmental Microbiology*, 8(3), 514-525. Doi: 10.1111/j.1462-2920.2005.00921.x
3. Cheptsov, V., Vorobyova, E., Belov, A., Pavlov, A., Tsurkov, D., Lomasov, V., & Bulat, S. (2018). Survivability of soil and permafrost microbial communities after

irradiation with accelerated electrons under simulated Martian and open space conditions. *Geosciences*, 8(8), 298. Doi: 10.3390/geosciences8080298
4. Marcolli, C., & Peter, T. (2005). Water activity in polyol/water systems: new UNIFAC parameterization. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5
5. Moissl-Eichinger, C., Cockell, C., & Rettberg, P. (2016). Venturing into new realms? Microorganisms in space. *FEMS microbiology reviews*, 40(5), 722-737. Doi: 10.1093/femsre/fuw015
6. Oarga, A. (2009). Life in extreme environments. *Revista de Biologia e ciencias da Terra*, 9(1), 1-10.
7. Rampelotto, P. H. (2010). Resistance of microorganisms to extreme environmental conditions and its contribution to astrobiology. *Sustainability* 2(6), 1602-1623. Doi: 10.3390/su2061602
8. Saxena, A., Yadav, A. N., Rajawat, M., Kaushik, R., Kumar, R., Kumar, M., Prasanna, R., & Shukla, L. (2016). Microbial Diversity of Extreme Regions: An Unseen Heritage and Wealth. *Indian Journal of Plant Genetic Resources*, 29(3), 246. Doi: 10.5958/0976-1926.2016.00036.x
9. Stevenson, A., Burkhardt, J., Cockell, C. S., Cray, J. A., Dijksterhuis, J., Fox-Powell, M., Kee, T. P., Kminek, G., Mcgenity, T. J., Timmis, K. N., Timson, D. J., Voytek, M. A., Westall, F., Yakimov, M. M., & Hallsworth, J. E. (2015). Multiplication of microbes below 0.690 water activity: Implications for terrestrial and extraterrestrial life. *Environmental Microbiology* 17(2),. 257-277 Doi: 10.1111/1462-2920.12598
10. van der Linde, K., Lim, B. T., Rondeel, J. M., Antonissen, L. P., & de Jong, G. M. T. (1999). Improved bacteriological surveillance of haemodialysis fluids: a comparison between Tryptic soy agar and Reasoner's 2A media. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 14(10), 2433-2437.

Секция 5.

ВЕНЕРА – ВОЗМОЖНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЖИЗНИ В ЕЁ ИСТОРИИ

Печерникова Г.В., Сергеев В.Н.

Институт динамики геосфер РАН

Венера – утренняя звезда. Венера занимает третье место по яркости в Солнечной системе после Солнца и Луны. Венера – одна из четырех планет земной группы, в которую входят еще Меркурий, Земля и Марс. Все планеты земной группы твердые и относительно малы. Их состав определяется в основном силикатами, железом и его соединениями. Венера – вторая от Солнца планета Солнечной системы, ближайшая планета к Земле.

По физическим параметрам Венера является сестрой-близнецом планеты Земля. Масса Венеры составляет 0.815 от массы Земли, диаметр её 0.949 от земного. Средние плотности вещества так же близки – 5240 кг/м^3 у Венеры и 5520 кг/м^3 у Земли. Дальше начинаются различия: период вращения Венеры составляет 243 суток, а у

Земли 23 ч 56 мин. Атмосферное давление на поверхности Венеры 95 атм, у Земли – 1 атм. Состав атмосферы также различен: у Венеры 96.5% CO_2, 3.5% N_2 и др., у Земли 78% N_2, 21% O_2 и др. Температура поверхности +480°C у Венеры и от +60°C до +17°C днём, до -80°C ночью у Земли. У Венеры спутников нет, а у Земли довольно массивная Луна – около 0.0123 массы Земли.

Высокие значения давления и температуры связывают с парниковым эффектом (Taylor, Hunten, 2014) и практически исключают возможность существование жизни земного типа (на основе углерода и жидкой воды) на поверхности Венеры. В настоящее время обсуждается возможность существования жизни в венерианских облаках (Seager, et al., 2021) и жизни на другой, отличной от земной основе (Ксанфомалити и др., 2019). Мы же рассмотрим возможность существования жизни земного типа на Венере в прошлом.

Поверхность Венеры скрыта сплошным облачным покровом от наблюдения с Земли обычными телескопами в оптическом диапазоне. Все данные о ней получены наблюдениями радиотелескопами и с космических аппаратов. Согласно этим данным возраст поверхности Венеры составляет около 300 – 800 миллионов лет (Smrekar, et al., 2014). Время обновления поверхности планеты составляет около 700 миллионов лет (Smrekar, et al., 2014). Оценки сделаны на основе подсчета количества ударных кратеров на поверхности планеты.

Венера, как и Земля, подразделяется на металлическое ядро и силикатные мантию и кору. О расположении границ этих структурных элементов существуют только основанные на землеподобных моделях оценки. Сейсмологические исследования на Венере не проводились из-за экстремальных условий на ее поверхности. В настоящее время разрабатывается совместный проект Роскосмоса и NASA по реализации космической мисси Венера-Д со спускаемым модулем (оснащенным, в частности, и сейсмометром), который должен проработать на поверхности планеты около двух месяцев. Венера не обладает значительным магнитным полем генерируемым процессами в ее ядре. Из-за отсутствия необходимых данных не установлено в каком состоянии находится ядро планеты: жидкое оно или твердое, или жидкое с твердым внутренним ядром (Гудкова, Жарков, 2020).

Тектонический режим Венеры и других планет земной группы отличается от плейт-тектонического. Следовательно, Луна, Меркурий, Венера и Марс должны иметь значительно более толстую кору, чем Земля. Толщина лунной коры ~50 км. Толщина коры других планет земной группы, вероятно, имеет такую же величину (Жарков, Гудкова, 2019). В этой же работе утверждается, что Венера является самой

неравновесной планетой в Солнечной системе. Этот факт, по-видимому, не является случайным и связан с тем, что вращение Венеры в прошлом было сильно замедлено приливным трением.

Структура поверхности Венеры указывает на отсутствие тектоники плит, по крайней мере, в последние 700 миллионов лет. Тектоника плит является важнейшим механизмом охлаждения планеты, поскольку включает в себя погружение холодной коры глубоко в мантию. Согласно моделям тепловой истории Венеры планета могла эволюционировать по схожему с Землей сценарию в прошлом. Условия на Венере могли быть схожи с земными. Она имела достаточно сильное магнитное поле, на ней была тектоника плит до тех пор пока энергетические источники могли поддерживать ее.

Согласно современной трехмерной климатологической модели Венеры период благоприятных условий для возникновения и поддержания жизни на поверхности планеты составлял около 3 миллиардов лет (Way, et al., 2016; Way, Del Genio, 2019). Однако это было возможно при ограничении на скорость вращения Венеры вокруг своей оси. Период обращения должен был быть не менее 16 современных земных звездных суток (сейчас он – 243 земные сутки).

Молодая Венера в раннюю эпоху – когда ее вращение еще не было замедлено приливным трением – вращалась намного быстрее чем сейчас (Жарков, 2013). Оценки значения палеопериода вращения Венеры дают около 16.9 современных земных звездных суток (Жарков, 2013). Таким образом, можно полагать, что молодая Венера еще более была похожа на Землю.

Отсюда следует вывод: на молодой Венере могла возникнуть жизнь, которая позднее погибла в результате катастрофического изменения условий на планете.

Список литературы

1. Гудкова Т.В., Жарков В.Н. Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // Астроном. Вестник. 2020. Т. 54. №1. С. 24–32.
2. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М: Наука и образование. 2013. 413 с.
3. Жарков В.Н., Гудкова Т.В. О параметрах землеподобной модели Венеры // Астроном. Вестник. 2019. Т. 53. № 1. С. 3–6.
4. Ксанфомалити Л.В. и др. Гипотетические признаки жизни на планете Венера: ревизия телевизионных экспериментов 1975–1982 гг. // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 4. С.403–432.

5. Seager S., et al. The Venusian Lower Atmosphere Haze as a Depot for Desiccated Microbial Life: A Proposed Life Cycle for Persistence of the Venusian Aerial Biosphere // Astrobiology. 2021. V. 21. N. 2.
6. Smrekar S. E., et al. Venus: Surface and Interior // Encyclopedia of the Solar System / T. Spohn, D. Breuer, T. Johnson. Elsevier, 2014. P. 323–342.
7. Taylor F.W., Hunten D.M. Venus: atmosphere // Encyclopedia of the Solar System / T. Spohn, D. Breuer, T. Johnson. Elsevier, 2014. P. 305–322.
8. Way M.J., et al. Was Venus the First Habitable World of our Solar System? // Geophys. Res. Lett. 2016. 43(16). P. 8376–8383.
9. Way M.J., Del Genio A.D. A view to the possible habitability of ancient Venus over three billion years // EPSC Abstracts. Vol. 13, EPSC-DPS2019-1846-1, 2019.

АКТИНОМИЦЕТЫ В МЕТЕОРИТЕ ОРГЕЙ

Афанасьева А.Н.

ОИЯИ, Дубна, Московская обл., Россия

В метеорите Оргей много раз находили микрофассилии похожие на мицелий актиномицетов. В результате было решено провести тест на чистоту воздуха в наших помещениях и сделать эксперимент с образцом метеорита на выявления возможных контаминаций.

В рабочем помещении с электронным микроскопом и в помещении с образцами метеоритов был проведён учет бактерий в воздухе при помощи метода Коха. Были оставлены чаши Петри с питательными средами (LB и YPD) примерно на 2 часа, в дальнейшем они были помещены в термостат с температурой 37С. В одной из чаш при осмотре спустя 4 дня были найдены 3 небольшие (диаметр 4мм) колонии серого цвета. При дальнейшем исследовании под оптическим микроскопом с 20 кратным увеличением было установлено что одна из колоний принадлежала стафилококкам, а две другие бациллам. При 20 кратном увеличении определить видовую принадлежность не удалось.

Провели эксперемент с образцом метеорита Оргей. Он был мелко покрошен в чашу Петри с питательной средой типа LB и помещен в термостат. Через 4 дня при осмотре, колоний обнаружено не было. Далее решили продолжить эксперимент. Из питательной среды были извлечены осколки метеорита их мы растворили в дистиллированной воде, от центрифугировали и осадок разместили в две чаши Петри с

разными типами питательных сред: LB Лурия бертани и YPD. Далее одна из чаш была помещена в термостат с термическими условиями 28 С, а другая 37 С. Через 4 дня после осмотра, колоний мы не обнаружили. Исходя из этого можно сделать вывод, что нитевидные микрофоссилии не являются контаминацией актиномицетами.

Список литературы

1. Актиномицеты как продуценты биологически активных веществ А.Г. Сергеева, Н.Г. Куимова
2. Е.А. Иванцова, Н. В. Герман, А. А. Тихонова МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ПОИСК ВНЕЗЕМНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ НА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ И ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВЫЖИВАНИЯ ЗЕМНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПО СИГНАЛАМ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ МИКРООРГАНИЗМОВ

Гарипов Г.К. [1], Панасюк М.И. [1,2], Конюхов И.В. [3], Погосян С.И. [3], Рубин А.Б.[3], Андреев Д.Е.[4]

[1]НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[3]Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[4]ИИ физико-химической биологии имени Н.Белозерского, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Обнаружение микроорганизмов на космических телах Солнечной системы имеет большое значение для понимания проблемы происхождения жизни. Эксперименты на спускаемых аппаратах, а также на планетоходах или геликоптерах позволяют проводить поиск микроорганизмов на поверхности планет и их спутников, но в ограниченном пространстве вблизи места посадки. При этом, учитывая, что редкие формы жизни, как правило, образуют колонии, существующие в ограниченном пространстве в труднодоступных местах, задача поиска микроорганизмов существенно усложняется.

В данной презентации рассматривается метод дистанционного зондирования поверхности космического объекта вспышками света для поиска микроорганизмов. Признаком существования биоактивности является обнаружение специфической флюоресценции микроорганизмов, когда объект исследования освещается светом, возбуждающим излучение флюоресценции.

Показано, что такие исследования могут проводиться непосредственно из космоса на площадях поверхности соизмеримых с размерами космического тела как на

траекториях полета космического аппарата вблизи космического объекта, так и с орбиты спутника космического тела, или на его поверхности после посадки спускаемого аппарата, а также исследовать микроорганизмы внутри космического аппарата. При этом колонии микроорганизмов могут быть обнаружены на расстоянии сотен километров от поверхности космического тела, а на расстоянии десятков метров единичные микроорганизмы. При вспышках света микроорганизмы не разрушаются, что позволяет в случае необходимости проводить повторные дополнительные исследования.

Задачей исследований является не только обнаружение микроорганизмов на космических объектах, но и исследование их происхождения. Одним из источников возникновения микроорганизмов может быть панспермия, которая предполагает появление микроорганизмов на Земле из космоса. В данной работе предлагается искать микроорганизмы на космических телах в околоземном космическом пространстве, которые могли бы появиться в космосе с Земли. В этом случае источником панспермии является Земля. В связи с этим возникает вопрос о выживании наземных микроорганизмов в космических условиях. Для решения этой задачи предлагается дистанционно изучать микроорганизмы с помощью автоматических биологических лабораторий, установленных на микроспутниках. В этом случае для изучения динамики выживаемости микроорганизмов, помещенных в микрокапсулы с изменяющейся средой обитания в реальном времени, предлагается также использовать свойства флюоресценции возникающей при воздействии на микроорганизмы световых вспышек. В случае активных фотосинтезирующих организмов, запасающих энергию квантов света в продуктах фотосинтеза, интенсивность сигнала флюоресценции, зависит от их состояния и меняется во времени по сложному закону (т.н. индукционная кривая флюоресценции) в отличие от мертвых клеток или свободных пигментов и минералов.

Рассмотрены возможности детектора, с фотосенсором, имеющего площадь линзы Френеля Š = 100 см^2, апертурой обзора 5^o, расстояние до объекта H = 100 км, длительность зондирующей вспышки 1 сек.

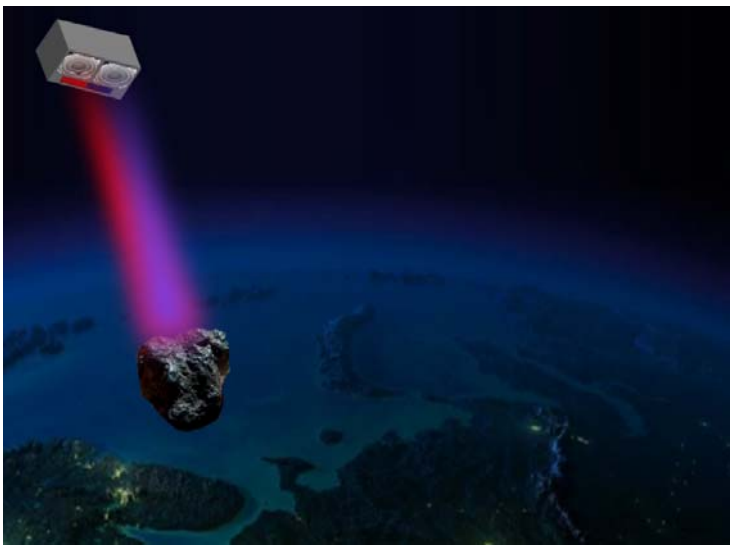


Рисунок 1. Детектор дистанционного зондирования микроорганизмов на борту спутника. Зондирующее синее излучение 460нм, флюоресцентное красное свечение 680нм. Вес научной аппаратуры спутника менее 1 кг, средняя мощность потребления менее 3Вт.

В этом случае для одного зондирующего импульса отношение сигнал / шум составит $\acute{S}/\acute{N} \approx 15\sigma$ в красной области оптического спектра при сплошном покрытии микроорганизмами поверхности. Соотношение быстро возрастает при уменьшении расстояния до объекта и увеличении числа зондирующих импульсов.

Детектор позволяет с расстояния десятков метров обнаружить и одиночные микроорганизмы, например, на астероидах. При этом, соотношение сигнал шум будет увеличиваться пропорционально числу микроорганизмов в поле зрения детектора.

Флюоресцентное излучение можно зарегистрировать и при красном зондирующем излучении, длина волны которого должна быть короче, чем излучение флюоресценции. Совпадение, с которым повышает достоверность обнаружения.

Сигнал флюоресценции содержит информацию о состоянии микроорганизмов и может использоваться для изучения микроорганизмов в автоматических биологических лабораториях на космических аппаратах.

Метод позволяет проводить исследования земных микроорганизмов находящихся в микрокапсулах, освещая их зондирующими вспышками света и регистрируя сигналы флюоресценции на борту космического аппарата на всем временном интервале его активного существования на орбите. На одном космическом аппарате может быть установлено несколько микрокапсул с различной изменяющейся средой обитания микроорганизмов, которые последовательно освещаются зондирующими вспышками света, флюоресценция которых, регистрируются с помощью одного фотоприемника. При этом для достижения необходимой

чувствительности достаточно нескольких десятков милливатт мощности источника зондирующего излучения.

В эксперименте исключается контакт и загрязнение микроорганизмов, используемых на космическом аппарате, земными микроорганизмами, поскольку не требуется их возвращение для исследований на Землю. С помощью предложенного метода измерения параметров, характеризующих состояние микроорганизмов возможно сеансами с временным интервалом не хуже нескольких секунд, что позволяет изучать динамику выживания микроорганизмов при быстром изменении среды обитания.

Список литературы

1. The Fourth COSPAR Symposium “Small Satellites for Sustainable Science and Development”, November 4 - 8, 2019 Daniel Hotel, Herzliya.
2. Космические исследования, Т.58, #4, с.276-283, 2020.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ МИКРОСПУТНИКОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПО ФЛЮОРЕСЦЕНТНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Гарипов Г.К.[1], Панасюк М.И.[1,2], Конюхов И.В.[3], Погосян С.И.[3], Рубин А.Б.[3], Андреев Д.Е.[4]

[1]НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[3]Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[4]ИИ физико-химической биологии имени Н.Белозерского, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Одним из источников возникновения жизни на Земле может быть панспермия, которая предполагает появление микроорганизмов на Земле из космоса. Но источником панспермии может быть и Земля. Микроорганизмы с Земли, например, могут попасть в околоземное космическое пространство на космических аппаратах. В связи с этим возникает вопрос о выживании наземных микроорганизмов в космических условиях. Для решения этой задачи предлагается дистанционно изучать микроорганизмы с помощью автоматических биологических лабораторий, установленных на микроспутниках в околоземном космическом пространстве. В этом случае для изучения динамики выживаемости микроорганизмов, помещенных в микрокапсулы с изменяющейся средой обитания в реальном времени, предлагается использовать

свойства флюоресценции, возникающей при воздействии на микроорганизмы вспышек света либо некоторых реагентов, вызывающих флюоресценцию. В случае активных фотосинтезирующих организмов, интенсивность сигнала флюоресценции, зависит от их состояния, так что при воздействии импульсных вспышек света, флюоресценция меняется в соответствии с индукционной кривой флюоресценции, сигнал которой содержит информацию о процессах, происходящих в структуре фотосинтезирующего аппарата клетки, которые в случае мертвых клеток отсутствуют. Сигналы флюоресценции позволяют проследить динамику выживания микроорганизмов на всех этапах их существования, находящихся в различных средах обитания, в том числе в условиях, космического вакуума, низких температур и радиации, поскольку от воздействия зондирующего излучения в видимой области спектра микроорганизмы не изменяются.

В презентации рассмотрена малогабаритная биологическая лаборатория, состоящая из герметичной монтажной платформы, обеспечивающая заданную изменяемую среду обитания, на которой устанавливаются микрокапсулы с микроорганизмами, а также микрокапсулы с различными датчиками и реагентами.

Показано, что на одном микроспутнике может быть установлено несколько микрокапсул с различной изменяющейся средой обитания микроорганизмов, которые последовательно освещаются зондирующими вспышками света, флюоресценция которых, регистрируются с помощью одного фотоприемника. При этом может изменяться среда обитания, параметрами которой можно управлять и измерять с помощью телеметрии. В этом случае в эксперименте полностью исключаются возможные загрязнения микроорганизмов, используемых на космическом аппарате земными микроорганизмами или реагентами, поскольку не требуется возвращение, экспонированных в космических условиях микроорганизмов, для изучения на Землю сигналы флюоресценции которых, передаются по телеметрии.

С помощью предложенного метода измерения параметров, характеризующих состояние микроорганизмов возможно сеансами с временным интервалом не хуже нескольких секунд, что позволяет изучать динамику их выживания при быстром изменении среды обитания в течение всего времени активного существования космического аппарата.

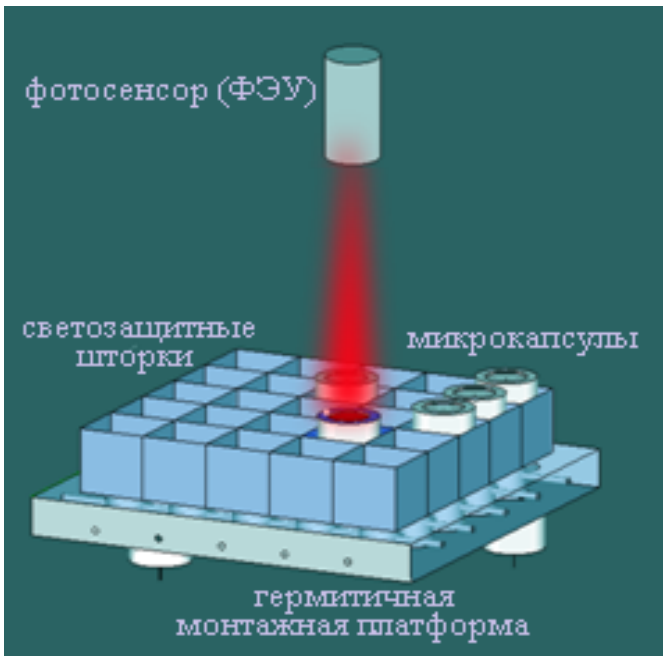


Рисунок 1. Общий вид эскизного варианта автоматической биологической лаборатории. Видны: герметичная монтажная платформа с каналами сообщения между микрокапсулами общей площадью 60×60мм^2; несколько микрокапсул, включающими микрокапсулы инкубаторов для микроорганизмов, источников воды, газовой среды и т.д.; датчиков давления, температуры и т.д.; клапанов сброса давления; фотосенсора. На этом рисунке также показан луч красного флюоресцентного излучения микроорганизмов из инкубатора.

На рисунке представлен один из эскизных предварительных вариантов разрабатываемой автоматической биологической лаборатории. Как видно из рисунка максимальное число микрокапсул различного назначения на микроспутнике с одной герметичной монтажной платформой может достигать 50, минимально можно установить одну микрокапсулу.

С помощью рассмотренной биологической лаборатории можно также исследовать генетические изменения и мутации микроорганизмов, возникающих при смене поколений в космических условиях как в среде аналогичной земной, так и в специально созданной среде, в которых можно изучать и динамику выживания микроорганизмов одного поколения с высоким временным разрешением. Полученные данные могут представлять интерес для развития космонавтики.

Важным достоинством метода является и то, что флюоресцентное излучение из микрокапсулы с микроорганизмами, установленной на монтажной платформе, находящейся в экстремальных изменяющихся условиях, может регистрироваться с помощью аппаратуры расположенной в изолированном отсеке, который обеспечивает благоприятные условия работы электроники.

Список литературы

1. The Fourth COSPAR Symposium “Small Satellites for Sustainable Science and Development”, November 4 - 8, 2019 Daniel Hotel, Herzliya.
3. Космические исследования, Т.58, #4, с.276-283, 2020.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Almatari A.L. 80
Pfiffner S.M. 80
Satoshi Kodaira 82
Williams D.E. 80
Wu X. 80
Александрова А.В. 60
Алехова Т.А. 60
Алчинова И.Б. 82
Андреев Д.Е. 140, 143
Астафьева М.М. 40, 139
Афанасьева А.Н. 47, 138
Белов А.А. 85, 129, 133
Беркович Ю.А. 89
Борхсениус С.Н. 96
Булат С.А. 67
Буряк А.А. 89
Вишнивецкая Т.А. 80
Вишняков И.Е. 96
Воробьёва Е.А. 85, 107, 129
Гарипов Г.К. 140, 143
Гулимова В.И. 117
Гуридов А.А. 99
Дешевая Е.А. 99, 110
Доронин М.В. 67
Еланская И.В. 103
Захарюк А.Г. 72
Зимин А.А. 48
Иванов А.А. 44
Иванова А.Е. 107
Ильин В.К. 99
Иноземцев К.О. 82
Капралов М.И. 47
Карганов М.Ю. 82
Каюшина Е.О. 44
Клементьев К.Е. 103
Компаниченко В.Н. 53
Конюхов И.В. 140, 143
Коцюрбенко О.Р. 124
Кривобок А.С. 89
Крючкова М.О. 107
Лауринавичус К.С. 44
Лебедев В.М. 103
Ломасов В.Н. 107, 129
Максимов А.Ю. 56
Максимов Е.Г. 103
Максимова Ю.Г. 56
Малявин С.А. 78
Мергелов Н.С. 74
Обридко В.Н. 32
Очков О.А. 89
Ошуркова В.А. 63, 110
Павлов А.К. 85, 107, 129
Панасюк М.И. 29, 140, 143
Пащенко В.З. 103
Печерникова Г.В. 126, 136
Погосян С.И. 140, 143
Полякова М.В. 82
Пономаренко М.П. 51, 128
Пронина И.В. 82
Прощина А.Е. 117
Рагульская М.В. 32, 114
Рассказов Д.А. 51
Ривкина Е.М. 92, 96
Розанов А.Ю. 17
Рубин А.Б. 103, 140, 143
Рюмин А.К. 47,121
Савельев С.В. 117
Сапрыкин Е.А. 47
Сергеев В.Н. 126, 136
Сидоров Д.А. 66
Симаков М. Б. 69
Складнев Д.А. 85
Скобликов Н.Э. 48
Смолянина С.О. 89
Соина В.С. 74
Спасский А.В. 103
Спирина Е.В. 80
Сузина Н.Е. 110
Сумбатян Д.А. 67
Суслов В.В. 51, 128
Сухова Е.И. 85
Твердислов В.А. 30
Трубицын В.Э. 63
Федоров-Давыдов Д.Г. 74
Фиалкина С.В. 99
Харламова А.С. 117
Храмова Е.Г. 32, 36
Цыганков О.С. 99
Чепцов В.С. 85, 107, 129, 133
Шатилович А.В. 92
Шилова А.В. 56
Шмакова Л.А. 78, 96
Шноль С.Э. 32
Шубралова Е.В. 99, 110
Щербакова В.А. 72, 99, 110
Якушев А.В. 74