

АСТРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА РОССИЙСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

© Е. А. Кузичева, Н. Б. Гонтарева, М. Б. Симаков

*Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург;
электронный адрес: ngontar@mail.cytspb.rssi.ru*

В условиях полетов орбитальных станций и спутников показана возможность пребиотического синтеза компонентов нуклеиновых кислот (нуклеотидов) под действием всего спектра космического излучения. Поскольку в космическом пространстве обнаружены некоторые компоненты нуклеиновых кислот, правомерно изучить возможность абиогенного синтеза более сложных соединений, таких как нуклеотиды. Целью настоящей работы является обобщение наших результатов по изучению абиогенного синтеза пуриновых и пиридиновых нуклеотидов, полученных на российских космических аппаратах. Установлено, что увеличение продолжительности пребывания экспонируемых образцов в твердом состоянии на орбите ведет к деградации образовавшихся нуклеотидов и исходных нуклеозидов. В лабораторных (наземных) экспериментах выявлена доминирующая роль тепловой энергии в реакциях абиогенеза. Найдено, что при воздействии различных источников энергии в наземных экспериментах и при воздействии суммы источников энергии открытого космоса образуется всегда один и тот же набор продуктов синтеза, при этом процесс образования 5'-мононуклеотидов является доминирующим. Все полученные данные обсуждаются в контексте экзобиологических исследований на околоземной орбите.

Ключевые слова: абиогенный синтез, вакуумное ультрафиолетовое и ультрафиолетовое излучение, нуклеотиды, нуклеозиды, биологически значимые соединения, орбитальная станция.

Принятые сокращения: БЗС — биологически значимые соединения, ВУФ — вакуумное ультрафиолетовое, УФ — ультрафиолетовое.

Астробиологические исследования на околоземной орбите имеют непосредственное отношение к проблеме происхождения жизни как на Земле, так и на других планетах Солнечной системы. Подобного рода эксперименты имеют принципиальное значение в связи с исследованиями, которые проводились на Луне и проведение которых планируется на Марсе и Титане. Поиск внеземной жизни непосредственно связан с изучением закономерностей возникновения биологически значимых соединений (БЗС) на различных космических объектах.

Исходными данными для разработки подобных исследований служит открытие в космическом пространстве многих важных БЗС. Последние могли возникнуть благодаря различным факторам — воздействию вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и ультрафиолетового (УФ) излучений, высокоэнергетических протонов солнечного ветра, гамма-радиации и других видов энергии. Так, в водных экстрактах метеорита Мерчисон были идентифицированы пурины, пиридины, H_2SO , дигидроксиацетон, фосфорная кислота и другие пребиотические соединения. В углистых хондритах были найдены аминокислоты, азотистые основания, углеводороды (Cooper et al., 1992; Cronin et al., 1997, 1998). Пылевые частицы кометы Галлея содержат 14 % органического углерода по массе (Delsemme, 1992; Greenberg, 1993).

В межзвездной среде показано присутствие HCN и его производных, необходимых для синтеза азотистых

оснований и аминокислот. Ранее (Хенох и др., 1979) нами было показано образование нуклеозидов и нуклеозидоподобных соединений в условиях полета орбитальной станции «Салют-6». Облучению в открытом космосе подвергали сухие пленки, содержащие смеси аденина с рибозой, аденина с дезоксирибозой и тимина с дезоксирибозой. Таким образом, процессы абиогенеза протекают и в условиях открытого космического пространства.

Несмотря на большое количество работ по синтезу БЗС под действием различных источников энергии в лабораторных условиях, роль естественных источников энергии в абиогенезе БЗС в условиях Космоса достаточно мало изучена. В настоящее время основным направлением астробиологических исследований является изучение эволюции, распределения и предназначения жизни во Вселенной. По-прежнему ключевой задачей является изучение процесса возникновения жизни. Для решения вопросов, связанных с этой проблемой, необходимо точно определить первичный источник БЗС, которые могли образоваться как в пределах Земли, так и вне ее (Hollis et al., 2000).

Околоземная орбита представляет уникальную возможность для исследования воздействия космической радиации на синтез БЗС вне Земли. Это особенно относится к УФ-радиации — самому мощному источнику энергии в открытом космосе, далеко превосходящему по величине все другие излучения (Кальвин, 1971). УФ-поток в разре-

женной межзвездной среде для фотонов с энергией более чем 6 эВ составляет величину 10^8 фотон/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Поэтому доза солнечного излучения на околоземной орбите за 2 нед равна межзвездному потоку излучения в течение $2 \cdot 10^6$ лет (Barbier et al., 1998). Таким образом, на околоземной орбите есть возможность смоделировать условия, существовавшие на первичной Земле или других планетах Солнечной системы, и экспериментально показать возможность абиотического синтеза органических соединений.

Такая уникальная возможность была использована нами при проведении экспериментов на борту спутников «Космос-2044» и «Бион-11», продолжительность полета которых составляла 14 сут. Продолжительность эксперимента на борту орбитальной станции «Мир» составляла 113 сут. Задачей данных исследований было изучение радиохимического поведения биоорганических соединений — нуклеотидов и полипептидов — в условиях экспонирования на борту космических аппаратов в течение краткого и продолжительного полетов и сравнение этих данных с наземными экспериментами.

Материал и методика

Полетные эксперименты проводили на орбитальных станциях «Салют-7», «Мир» и на спутниках «Космос-2044» и «Бион-11». Поверхность станции рассматривали как приближенную модель верхнего слоя оболочки малых тел Солнечной системы, где могли бы протекать абиогенные реакции. Эксперименты на станции «Салют-7» проводили в разработанном нами приборе «Медуза» (рис. 1), на внутренней поверхности которого были размещены кварцевые часовые стекла с экспонируемыми пленками с пробами. Перед установкой этих стекол в прибор «Медуза» пробы закрывали фильтрами, пропускающими УФ-излучение с длиной волны больше 220 нм. Прибор «Медуза» доставляли на орбиту на грузовом корабле «Прогресс». При выходе в открытый космос космонавты закрепляли прибор на специальной платформе вблизи выходного люка. Демонтаж осуществляли во время второго выхода космонавта в открытое пространство. «Медуза» позволяла вычленять действие отдельных источников энергии, присутствующих на околоземной орбите. Контрольные образцы во время полета «Салют-7» находились внутри станции.

Полетные эксперименты на поверхности станции «Мир» проводили в специальном наружном устройстве «Персей» (рис. 2). Экспонируемые образцы размещали на дне экспериментальных ячеек, которое представляло собой стекло из MgF_2 . Данное стекло пропускало УФ-излучение с длиной волны больше 110 нм. Образцы попарно устанавливали в углублении контейнера. Верхний ряд подвергался воздействию космического излучения, а нижний служил контролем. В отдельные ячейки помещали датчики для измерения температуры и дозы УФ-излучения. Необходимо отметить, что показания бортового счетчика детектировали наличие УФ-излучения с длиной волны в интервале от 260 до 280 нм.

Эксперименты на спутниках осуществляли в специальном наружном контейнере, на внутренней поверхности которого также размещались аналогичные стекла с нанесенными на них сухими пленками образцов (Kuzicheva, Gontareva, 1999; Kuzicheva, Simakov, 1999). Наружный контейнер (рис. 3) крепился на внешней обшивке



Рис. 1. Кассетное устройство «Медуза» для проведения экспериментов по синтезу биологических молекул в условиях полета орбитальных станций и спутников.

спутника и в момент старта спутника с Земли находился в закрытом состоянии. После выведения спутника на орбиту наружный контейнер автоматически открывался и экспериментальные пленки, содержащие смесь нуклеозида и фосфата, подвергались воздействию всех видов энергетического воздействия космической среды.

Температурный датчик, находившийся на дне устройства «Медуза», фиксировал перепады температур от -50 до 65°C . Датчик для измерения температуры в устройстве «Персей» зафиксировал наибольшую положительную температуру 41°C . Колебания температуры на поверхности наружного контейнера за время полета спутника «Космос-2044» были от -13 до 67°C , для спутника «Бион-11» — от -30°C до 100°C . Контрольные лабораторные эксперименты показали, что при температурах от -10 до 65°C образования нуклеотидов не происходит.

Контрольные пробы образцов во время полетов находились внутри станций и спутников и подвергались воздействию невесомости. Отметим сразу, что невесомость и положительная температура (от 21 до 26°C), которая поддерживалась внутри космических аппаратов, не оказывали каких-либо воздействий на синтез нуклеотидов.

Во время полета спутников (14 сут) доза гамма-радиации составляла от 2000 до $10\,000$ рад. Согласно данным работы Хорнек с сотрудниками (Horneck, 1999), во время полета спутника «Биопан» УФ-радиация составляла $10^7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

В лабораторных экспериментах для генерирования излучения с длиной волны 145 нм использовали водород-

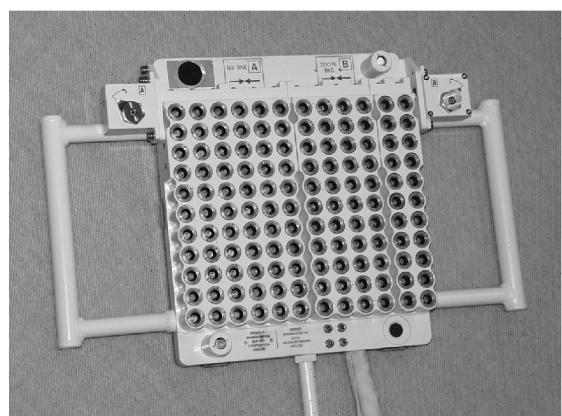


Рис. 2. Общий вид экспериментального устройства «Персей», предназначенного для проведения экзобиологических экспериментов на поверхности орбитальной станции «Мир».

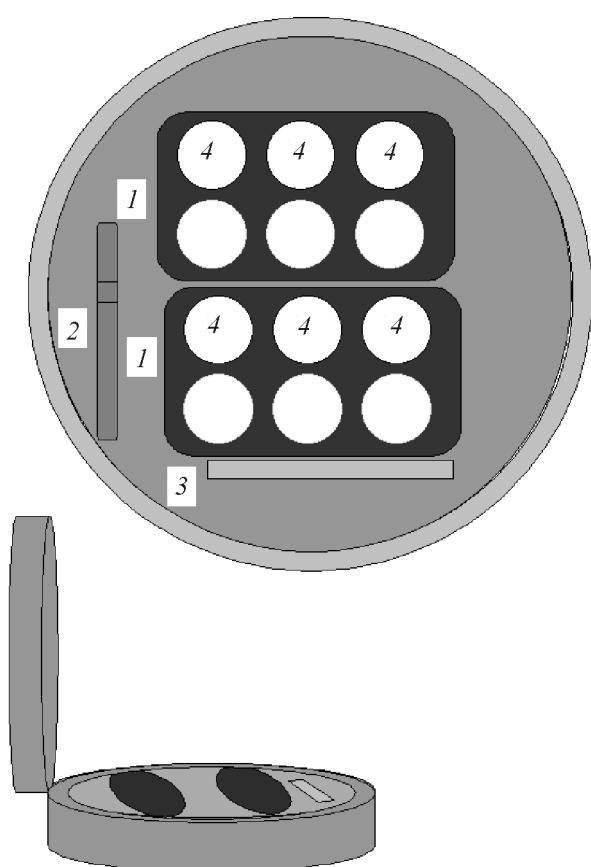


Рис. 3. Схема наружного контейнера.

1 — металлические платы для установки кварцевых стекол с образцами, 2 — термопара для измерения перепадов температур, 3 — радиометрический датчик, 4 — обезвоженные образцы, содержащие нуклеозид и неорганический фосфат, нанесенные на кварцевые стекла.

ные лампы с окном из MgF_2 и лампу с барьерным разрядом в криптоне. Интенсивность облучения составляла 6 мВт/см², или $5 \cdot 10^{15}$ квант/см² · с. В качестве источника радиации с длиной волны 254 нм использовали ртутную лампу ЛБ-30 с мощностью излучения 0.96 мВт/см², или $8 \cdot 10^{14}$ квант/см² · с, которое полностью поглощалось образцом и регистрировалось с помощью радиометра UVX-digital.

В каждом образце содержалось 534 мкг аденоцина (Ado), 502 мкг дезоксиаденоцина (dAdo), 488 мкг уридина (Urd), 484 мкг тимицина (Thd), 452.2 мкг дезокситимицина (dTdh) и 312 мкг NaH_2PO_4 . Водные растворы смесей исходных компонентов наносили на часовые стекла или на дно экспериментальных ячеек и высушивали на воздухе.

Качественный и количественный анализ продуктов абиогенного синтеза нуклеотидов и олигопептидов проводили при помощи метода высокоеффективной жидкостной хроматографии. Идентификацию осуществляли на основании совпадения времен удерживания пиков на хроматограммах анализируемого и стандартного растворов с точностью не менее 98 %.

Реактивы: ацетонитрил и спирт метиловый для ВЭЖХ, калий фосфорнокислый монозамещенный сверхчистый (Merck, Германия); тетраэтиламмоний гидросульфат и вода квалификации «для ВЭЖХ»; все основания (нуклеозиды и нуклеотиды) были от фирмы Sigma (США) и использовались без дальнейшей модификации.

Применили хроматографическую систему «Альянс» (Waters, США), снабженную спектрофотометрическим детектором, термостатом, компьютером и автосamplerом. Использовали колонку Symmetry C18 размером 3.9 × 150.0 мм (Waters, США). Использовали подвижные фазы следующих составов: 1) для определения соединений аденинового ряда — элюент А (0.005 М раствор KH_2PO_4 , pH 2.5) и элюент В (0.05 М раствор KH_2PO_4 , pH 2.5, и метанол в соотношении 95 : 5 по объему); 2) для определения соединений уридинового ряда — водный раствор, содержащий 0.02 М гидросульфата тетраэтиламмония и 0.025 М дигидрофосфата калия, pH 2.5; 3) для определения соединений тимицинового ряда — смесь водного раствора, содержащего 0.02 М гидросульфата тетраэтиламмония и 0.025 М дигидрофосфата калия, pH 2.5, с ацетонитрилом в объемном соотношении 97.5 : 2.5.

Условия проведения анализа: скорость потока подвижной фазы — 1 мл/мин, температура анализа — 25 °C, длина волны детектирования — 254 нм, объем анализируемой пробы — 25 мкл, режим элюирования для производных аденина — линейный градиент от 100 % элюента А до 100 % элюента В за 10 мин, далее 100 % элюента В в течение 2 мин, для производных уридина и тимицина — изократическое элюирование.

Результаты

Первый эксперимент по синтезу компонентов нуклеиновых кислот на околоземной орбите с помощью устройства «Медуза» был осуществлен на станции «Салют-6» в 1978 г. Экспозиции подвергали сухие пленки, состоящие из смеси основания и углевода (300 сут, температура от -50 до 50 °C). Было показано формирование нуклеозидов аденоцина, дезоксиаденоцина, тимицина и нуклеозидоподобных соединений (Хенох и др., 1979). Следующие наши исследования на орбите были посвящены синтезу более сложных биомолекул — нуклеотидов (Kuzicheva, Tsupkina, 1986).

В результате экспонирования сухих пленок «нуклеозид плюс фосфат» в условиях открытого космоса были обнаружены 5'-, 2'- и 3'-мононуклеотиды и циклические фосфаты. Доминирующим процессом реакций фосфорилирования всех нуклеозидов было образование 5'-мононуклеотидов как в случае пуриновых, так и в случае пиридиновых производных (табл. 1). Как видно из данных табл. 1, суммарные выходы анализируемых продуктов на спутниках выше, чем на орбитальных станциях. Величина суммарного выхода продуктов на поверхности спутников составляет от 2.06 % (для дезокситимицина) до 5.8 % (для аденоцина). На орбитальных станциях эта величина составляет от 0.33 для аденоцина («Салют-7») до 0.042 % для тимицина («Мир»), т. е. выходы на спутниках больше, чем на орбитальных станциях. Это можно объяснить большей продолжительностью (300 и 113 сут) экспонирования пленок на станциях. Полагаем, что длительность пребывания образцов на орбите ведет к деструкции синтезированных соединений. Поскольку процессы синтеза и распада идут одновременно, реакции деградации с увеличением времени полета начинают доминировать над процессами синтеза. Второй причиной низкого выхода синтезированных нуклеотидов в условиях полетов орбитальных станций является невысокая положительная температура в устройствах «Медуза» (50 и 65 °C) и «Персей» (41 °C).

Таблица 1

Количественный выход нуклеотидов, синтезированных в ходе экспериментов на околоземной орбите

Исходный нуклеозид	Космические аппараты	Нуклеотиды, % от количества исходного нуклеозида						
		5'	2'3'ц	2'	3'	3'5'ц	общий выход	распад исходного нуклеозида
Ado	«Салют-7» (390 сут)	0.12	0.06	0.09	0.05	0.01	0.33	51
	«Салют-7» (480 сут)	0.10	0.04	0.07	0.03	0.01	0.25	58
	«Мир» (113 сут)	0.10	0.05	0.01	0.03	0.08	0.27	50
	«Космос-2044», «Бион-11» (14 сут)	3.23	1.12	0.82	0.71	0.01	5.8	51
dAdo	«Салют-7» (390 сут)	0.07	НО	НО	0.06	0.03	0.16	79
	«Салют-7» (480 сут)	0.05			0.03	0.02	0.10	80
	«Мир» (113 сут)	0.01			0.008	Следы	0.018	80
	«Космос-2044», «Бион-11» (14 сут)	1.87			0.48	»	2.35	46
Cyt	«Салют-7» (390 сут)	0.14	0.10	0.04	0.02	»	0.30	64
	«Салют-7» (480 сут)	0.11	0.10	0.03	0.01	»	0.25	76
	«Космос-2044», «Бион-11» (14 сут)	2.68	0.94	0.61	0.55	»	4.78	66
Urd	«Салют-7» (390 сут)	0.08	Следы	0.05	0.03	»	0.16	20
	«Салют-7» (480 сут)	0.10	0.001	0.030	0.020	»	0.15	24
	«Мир» (113 сут)	0.07	Следы	0.030	0.01	»	0.11	20
	«Космос-2044», «Бион-11» (14 сут)	1.20	0.05	0.08	0.05	»	2.10	25

Примечание. Ado — аденоzin, dAdo — дезоксиаденоzin, Cyt — цитидин, Urd — уридин, Thd — тимидин, dThd — дезоксицитидин; НО — не определялись.

В наших ранних работах показана доминирующая роль тепловой энергии в образовании природных нуклеотидов. Мы показали, что при повышенных температурах (около 160 °C, 3 ч), характерных для районов с повышенной вулканической деятельностью, образуются только используемые живыми организмами 4 нуклеотида, причем их выход из соответствующих предшественников достигает 2—6 % (Kuzicheva et al., 1992). Очевидно, что при тепловом синтезе данных нуклеотидов реакция происходит с минимальной затратой свободной энергии по сравнению с другими нуклеотидами, поэтому их выбор земной жизнью неслучен.

Третья причина состоит в том, что в обоих устройствах для проведения экспериментов в открытом космосе было отрезано короткое ВУФ-излучение. Минимальная длина волны, зафиксированная датчиком на устройствах, составляла 260 нм. Как показали наши лабораторные исследования, именно это излучение является самым малоэффективным источником энергии при синтезе нуклеотидов (табл. 2). ВУФ-излучение (145 нм) является вторым по эффективности источником энергии после нагревания. В случае цитидина максимальный выход составлял даже 10 %. Эффективность ВУФ-излучения объясняется тем, что в данной спектральной области происходит возбуждение электронных состояний основания, углевода и фосфатных групп. Наоборот, синтез нуклеотидов под действием УФ-излучения (254 нм) является малоэффективной реакцией. При действии последнего источника энергии механизм синтеза нуклеотидов связан только с возбуждением основания в составе нуклеозида (Kuzicheva et al., 1997).

Из данных табл. 1 видно, что порядок величины суммарных выходов адениновых нуклеотидов на всех трех орбитальных станциях один и тот же: от 0.33 % («Са-

лют-7») до 0.27 % («Мир»). Порядок фосфорилирования уридуна на всех трех станциях также практически одинаков: от 0.16 % («Салют-7») до 0.11 % («Мир»), хотя время пребывания экспонируемых образцов существенно различалось (13 мес в первом случае и 3.7 мес — во втором).

Выход продуктов фосфорилирования существенно зависит от типа углеводного остатка (например, фосфорилирование дезоксиаденоzина по сравнению с аденоzином приблизительно в 2 раза меньше), а выход 5'-AMP равен 3.23 %, в то время как выход 5'-dAMP составлял 1.87 % (данные для «Бион-11»).

Пуриновые нуклеозиды давали больший выход нуклеотидов, чем пиримидиновые. Например, суммарный выход анализируемых продуктов на станции «Мир» для пуриновых производных составлял 0.27 % (аденоzin), а для пиримидиновых — 0.11 % (уридин) и 0.042 % (тимидин) (табл. 1).

Из сравнения нуклеозидов пуринового и пиримидинового рядов видно, что двойное пуриновое кольцо устойчивее к разрушающему действию источников энергии открытого космоса, чем пиримидиновое. В условиях полета станции «Мир» больше всего распадались тимидин (80 %) и уридин (70 %), а в условиях полета «Бион-11» — цитидин (66 %).

Параллельно процессам деградации углеводного остатка и соответствующего основания с образованием веществ, которые не поглощают в области 254 нм, протекали процессы разрыва N-гликозидной связи с освобождением свободных оснований (аденин, урацил, цитозин, тимин). Во всех экспериментах зафиксировано освобождение около 20 % соответствующего основания.

На примере синтеза 5'-AMP как главного продукта фосфорилирования всех нуклеозидов на орбите приводим результаты по синтезу этого нуклеотида под действием

Таблица 2

Выход нуклеотидов, синтезированных под действием различных источников энергии в ходе лабораторных экспериментов

Условия облучения	Нуклеотид	Общий выход анализируемых продуктов	Производные нуклеозидов, % от количества исходного нуклеозида				
			5'	2'3'с	2'	3'	3'5'
ВУФ-облучение (145 нм), $3.8 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$	Ado	0.818	0.760	0.05	0.004	0.002	0.002
	dAdo	0.520	0.150			0.130	0.240
	Cyt	10.040	3.750	2.46	1.320	1.670	0.840
	Urd	3.700	2.600	0.06	1.000	0.040	Traces
	Thd	0.300	0.150			0.100	0.050
	dThd	5.450	2.590			2.00	0.860
УФ-облучение (254 нм), $4.4 \cdot 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$	Ado	0.770	0.090	0.05	0.020	0.050	0.560
	dAdo						
	Cyt						
	Urd	0.270	0.120	0.05	0.060	0.030	0.010
	Thd	0.019	0.014			0.004	0.001
	dThd						
Нагревание 160 °C, 3 ч	Ado	6.340	1.610	3.45	0.670	0.290	0.160
Гамма-радиация, Cs ¹³⁷ $3.0 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$	»	0.624	0.410	0.12	0.080	0.014	
	dAdo	0.870	0.580			0.280	0.010
	Urd	2.200	1.500	0.06	0.600	0.040	Следы

различных источников энергии (рис. 4). На рис. 4 видно, что наименьший выход 5'-АМФ (0.09 %) наблюдается при экспозиции пленок «аденозин + NaH₂PO₄» при УФ-облучении, а наибольший (3.23 %) — при воздействии всей суммы источников энергии открытого космоса («Бион-11»). Незначительный выход (0.1 %) 5'-АМФ нуклеотида отмечается в условиях полета станции «Мир». Это можно объяснить невысокой положительной температурой (41 °C), зафиксированной в устройстве «Персей». Само нагревание (160 °C, 3 ч) давало величину выхода 5'-АМФ 1.6 %. Гамма-радиация и ВУФ-излучение (высокоэнергетические источники энергии) дают значения выходов 5'-АМФ 0.41 и 0.76 % соответственно. Нужно заметить, что в случае гамма-излучения данная величина вы-

хода 5'-АМФ регистрируется при дозе на три порядка ниже, чем для ВУФ-излучения. В связи с присутствием в открытом космическом пространстве большого количества различных энергетических источников задача идентификации самого эффективного из них является достаточно сложной.

В табл. 2 приведены значения выходов всех нуклеотидов, которые мы смогли зарегистрировать в результате синтеза под действием различных источников энергии в лабораторных экспериментах. В отличие от рис. 4 в табл. 2 даны выходы всех зафиксированных продуктов. Как видно из данных табл. 2, в лабораторных экспериментах показано, что ВУФ-излучение и нагревание являются самыми эффективными источниками энергии в ходе синтеза нуклеотидов. Суммарные выходы достигают 10.04 % (Cyt, ВУФ-излучение) и 6.34 % (Ado, нагревание до 160 °C).

Наоборот, малоэффективными источниками, по нашим данным, являются УФ-излучение и гамма-радиация. Излучению с длинами волн менее 200 нм соответствует поглощение с возбуждением S₀-состояний пуринового кольца аденоцина. В данной спектральной области также дополнительно происходит возбуждение электронных состояний углеводных и фосфатных групп. Первый процесс приводит к деструкции с разрывом N-гликозидной связи, а два последних — к синтезу нуклеотидов. В этом заключается основное различие в механизмах действия двух видов излучения — ВУФ и биологически активного УФ. При действии мягкого УФ-излучения (254 нм) механизм синтеза нуклеотидов связан с возбуждением только основания в составе нуклеозида (электронный переход S₀ → S₁). По этой причине синтез нуклеотидов под действием мягкого УФ-излучения является малоэффективной реакцией и выходы нуклеотидов на порядок ниже, чем при ВУФ-облучении (Kuzicheva, Gontareva, 1999; Kuzicheva, Simakov, 1999).

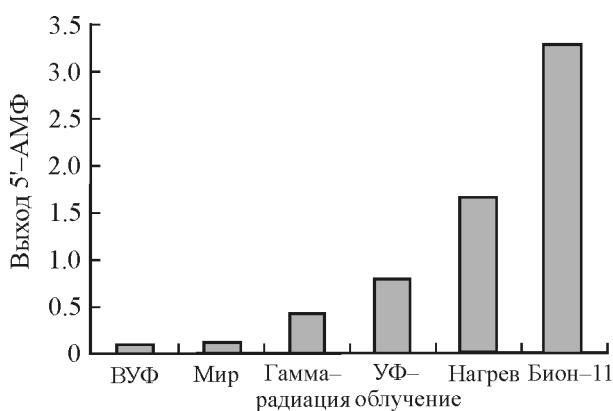


Рис. 4. Сравнительный выход 5'-аденозинмонофосфата (5'-АМФ) в различных экспериментальных условиях: ВУФ-облучение, полетные эксперименты на станции «Мир», гамма-облучение, УФ-облучение, нагревание, полетные эксперименты на биоспутнике «Бион».

Из приведенных в табл. 2 данных можно сделать вывод о том, что источник энергии в реакциях фосфорилирования нуклеозидов не имеет особого значения. В любом случае, используется ли сумма источников энергии открытого космоса (табл. 1), тепловая энергия, УФ-излучение разной длины волн или гамма-излучение (табл. 2), в результате обнаруживаются одни и те же мононуклеотиды с различными количественными выходами.

Обсуждение

Данные, полученные нами в процессе синтеза нуклеотидов на орбите, позволяют предполагать, что в космическом пространстве может протекать синтез компонентов нукleinовых кислот. Синтезированные подобным образом БЗС вполне могли достигать поверхности первобытной Земли и способствовать зарождению первых живых организмов.

Вначале мы отметили, что главным продуктом реакции фосфорилирования нуклеозидов во всех случаях доминировал процесс синтеза 5'-производных. Преимущественное возникновение 5'-монофосфатов говорит о том, что гидроксильная группа в пятом положении углеводного остатка нуклеозида наиболее реакционноспособна. Это объясняется более благоприятным расположением 5'-гидроксильной группы в остатке углевода по сравнению с 2'- и 3'-гидроксильными группами.

В связи с этим при обсуждении роли различных источников энергии в процессе абиогенеза, вероятно, следует исходить не из суммарного количества энергии, в котором превалирует гамма-излучение, а из эффективности действия источника энергии.

Основываясь на представленных данных, можно предположить, что в условиях открытого космоса на поверхности космических тел может протекать абиогенный синтез достаточно сложных органических соединений — мономерных звеньев нукleinовых кислот, почти все необходимые компоненты которых обнаружены при исследовании различных космических тел. При этом продолжительность пребывания данного тела в космическом пространстве не является ключевым фактором, влияющим на абиогенный синтез. Необходимо учитывать весь комплекс условий, влияющих на данный космический объект.

Рассмотренные в данной работе предбиологические реакции не исчерпывают всего имеющегося экспериментального материала, однако они иллюстрируют возможные пути химической эволюции с участием источников энергии открытого космоса в абиогенезе биологически значимых соединений.

На основании результатов проведенного исследования можно сделать следующее общее заключение. В экспериментах во время полетов обнаружено образование довольно сложных в биологическом отношении соединений — компонентов нукleinовых кислот (нуклеотидов). Подтверждением этих результатов служат лабораторные исследования. Под действием отдельных источников энергии (ВУФ-излучение, УФ-излучение, гамма-радиация, нагревание) формируются те же продукты реакции,

что и в условиях полета. Разница состоит лишь в их количественном отношении.

На основании обнаружения одних и тех же продуктов как в полетных, так и в лабораторных экспериментах можно заключить, что характер источника энергии не влияет на качественный состав образовавшихся веществ. При этом количественные выходы зависят от типа энергетического воздействия, а промежуточные стадии синтеза могут отличаться друг от друга.

Список литературы

- Xeno M. A., Kuzicheva E. A., Tsupkina N. V. 1984. Пребиотический синтез предбиологических исследований под действием факторов космического полета. В кн.: Биологические исследования на орбитальных станциях «Салют». М.: Наука. 21—25.
- Xeno M. A., Kuzicheva E. A., Tsupkina N. V., Конышин Н. И., Машинский А. Л., Нечитайлло Г. С. 1979. Пребиотический синтез нуклеозидоподобных соединений под действием экстремальных факторов. ДАН СССР. 249 (3) : 749—752.
- Barbier B., Chabin A., Chaput D., Brack A. 1998. Photochemical processing of amino acids in Earth orbit. Planet. Space Sci. 46 : 391—398.
- Cooper G. W., Onwo W. M., Cronin J. R. 1992. Alkyl phosphonic acids in murchinson meteorite. Geochim. cosmochim. acta. 56 : 4109—4115.
- Cronin J. R., Pizzarello S. 1997. Enantiomeric excesses in meteoritic amino acids. Science. 275 : 951—955.
- Cronin J. R., Pizzarello S., Cruikshank D. P. 1988. Organic matter in carbonaceous chondrites, planetary satellites, asteroids and comets. In: Meteorites and the early solar system. Tuscon, AZ: Univ. of Arizona Press. 819—857.
- Delsemme A. H. 1992. Cometary origin of carbon, nitrogen and water on the earth. Origin Life Evol. Biosphere. 21 : 279—298.
- Greenberg J. M. 1978. Interstellar dust. In: Cosmic dust. New York: Wiley. 187—294.
- Hollis J. M., Lovas F. J., Jewell P. R. 2000. Interstellar glycolaldehyde: the first sugar. Astrophys. J. 540 : L107—L110.
- Horneck G. 1999. European activities in exobiology in earth orbit: results and perspectives. Adv. Space Res. 23 : 381—386.
- Kuzicheva E. A., Chernova V. F., Veselkina O. S. 1992. Model of the adenine nucleotides' prebiotic synthesis in presence of lunar soil. J. Evol. Biochem. Physiol. 28 : 281—286.
- Kuzicheva E. A., Gontareva N. B. 2001. Study of the peptide prebiotic synthesis in context of exobiological investigations on Earth orbit. Adv. Space Res. 23 : 393—396.
- Kuzicheva E. A., Simakov M. B. 1999. Abiogenic synthesis of nucleotides in conditions of space flight of biosputnik «Bion-11». Adv. Space Res. 23 : 387—391.
- Kuzicheva E. A., Simakov M. B., Dodonova N. Ya., Antropov A. E. 1997. Formation of oligopeptides on surface of small bodies in the solar system by cosmic radiation. Adv. Space Res. 19 : 1063—1066.
- Kuzicheva E. A., Tsupkina N. V. 1986. Non-biological formation of uridine nucleotides in the condition of the flight of the orbital station «Салют-7». J. Evol. Biochem. Physiol. 22 : 17—23.
- Kuzicheva E. A., Tsupkina N. V., Potapova N. G. 1988. The effect of separate factors of cosmic environment on abiogenic synthesis of nucleotides. J. Evol. Biochem. Physiol. 24 : 3—7.
- Miller S. L. 1984. The prebiotic synthesis of organic molecular and polymers. In: Aspects of chemical evolution. New York: John Wiley Son. 85—107.
- Nicolet M. 1989. Solar spectral irradiances and their diversity between 120 and 900 nm. Planet. Space Sci. 37 : 1249—1289.

Поступила 25 IX 2008

ASTROBIOLOGICAL INVESTIGATIONS ON BOARD RUSSIAN SPACE KRAFTS

*E. A. Kuzicheva, N. B. Gontareva, M. B. Simakov*Institute of Cytology RAS, St. Petersburg;
e-mail: ngontar@mail.cytspb.rssi.ru

The possibility of prebiotic synthesis of nucleic acids components (nucleotides) has been demonstrated under condition of the space orbital stations and satellites under effect of all space radiation spectra. Since a lot of different nucleic acids components are known to be present within small space bodies, we have to investigate their chemical complication in respect with such components as nucleotides. The goal of this work is to review our results in the field of prebiotic synthesis of purine and pyrimidine nucleotides on the board of Russian space crafts. The increase in the solid reaction mixtures exposure time leads to degradation of both initial components (nucleosides) and the reaction products (nucleotides). The dominating role of heat energy in the abiogenic reactions has been revealed in laboratory (ground) experiments. Similar set of natural nucleotides has been synthesized under effect of different open space energy sources in both flight and ground experiments. The formation of 5'-nucleotides is a dominating process. All the data are discussed in the context of exobiological investigations on the Earth's orbit.

Key words: abiogenic synthesis, vacuum ultraviolet and ultraviolet radiation, nucleotides, nucleoside, biologically important compounds, orbital space station.