

## МАРСИАНСКАЯ МИССИЯ ДУБНЫ

*В январе 2014 года Российское космическое агентство сообщило, что достигнута договоренность с NASA о заброске на стационарную орбиту модулей типа МКС и сборке из них межпланетного корабля, предназначенного для полета к Марсу. Старт предварительно намечен на 2022-2024 годы - через каких-то десять лет.*

*Это сообщение не вызвало особенного интереса общественности, что мировой, что российской – к активности земной цивилизации в ближнем космосе все давно привыкли. А ведь оно явилось лишним подтверждением того, что визит на Красную планету из мечты, утопии, «прожекта» – называйте, как хотите – превращается в будничную рабочую программу. А это, в свою очередь, означает следующее: что бы ни происходило на планете, как бы ни складывалось международное положение, в какие бы виражи не входила мировая политика, в недрах нашей цивилизации вызревает миссия высшего уровня – миссия на Марс. Миссия неизбежная и неотвратимая, ибо космическую ступень развития человечеству не обойти: оно накопило много вопросов к мирозданию, ответить на которые без выхода в пространство нельзя – именно там могут лежать разгадки главных тайн. Наконец, всем причастным к этому уже не столь отдаленному предприятию сообщение РКА напомнило о том, что «марсианская миссия» фактически вышла из стадии обсуждения и что на решении многочисленных, разнообразных и очень сложных задач ее обеспечения сегодня концентрируются силы и ресурсы.*

### Союз физиков и биологов

Эти задачи были четко сформулированы на выездной сессии Бюро Отделения физиологии и фундаментальной медицины (ОФФМ) Российской Академии Наук, впервые состоявшаяся в Дубне еще полтора года назад.

Что привело представителей наук о жизни в город физиков? Объективная необходимость в интеграции знания, подталкивающая специалистов разных областей к «межвидовому общению», сказал, приветствуя гостей, директор

Объединенного института ядерных исследований академик В.А. Матвеев. У физиков созрела огромная потребность передать свои наработки в арсенал медицины и здравоохранения, поэтому их контакт с представителями наук о жизни может оказаться чрезвычайно конструктивным и социально значимым. К тому же, заметил В.А. Матвеев, в последнее время работы в области медицины носят более инновационный характер, чем работы в области физики, поэтому физикам очень полезно познакомиться с проблемами и подходами фундаментальной медицины.

Биологам, физиологам, врачам, в свою очередь, необходимо взять на вооружение методологию познания, выработанную физикой и химией, сказал вице-президент РАН академик А.И. Григорьев. Именно точные науки способны предложить эффективный метод изучения живого. Без этого невозможно решение ключевой проблемы современности – продвижения в области наук о жизни. Есть в союзе физиков и биологов и еще один аспект, поддержал академиков Матвеева и Григорьева Ю.В. Наточин, академик-секретарь ОФФМ РАН. Что, например – применительно к марсианскому проекту - будет происходить с космонавтами в межпланетном пространстве? Чтобы ответить на этот вопрос, надо рассматривать организм как целое. А для этого нужно понимать, что такое жизнь и как она возникла, что невозможно без понимания того, как возникли Земля, Вселенная. Этим занимается именно физика, Вот и получается, что проблемы радиационной физиологии – это, в равной степени, проблемы наук о жизни и точных наук.

Поэтому Дубна может стать той площадкой, где физики, медики, физиологи, представители других наук сообща искали бы прорывные решения злободневных задач, отметил А.И. Григорьев. С помощью ОИЯИ уже удалось справиться с рядом проблем в области космической медицины при подготовке орбитальных полетов. Вклад Института оказался здесь очень весомым. Стоящие в повестке дня проблемы межпланетных полетов значительно сложнее, но в Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ предложены адекватные концептуальные подходы. И это чрезвычайно ценно: ведь для полета на Марс радиобиологические ограничения будут ключевыми и, к сожалению, во многом лимитирующими.

#### Радиобиология на ускорителях ОИЯИ

- Радиобиологические исследования ведутся в Институте со времени его образования, то есть уже больше 50 лет, - рассказывает директор Лаборатории

радиационной биологии ОИЯИ, член-корреспондент РАН Евгений Александрович Красавин. - Они были инициированы такими выдающимися деятелями науки, как Н.М. Сисакян, В.В. Парин, А.В. Лебединский, О.Г. Газенко. В те годы, годы после запуска первого искусственного спутника Земли, возникла необходимость в изучении биологического действия протонов высоких энергий, которые, как было установлено, присутствуют в космическом пространстве. Академик С.П. Королев, планируя первые пилотируемые космические полеты, нуждался в достоверных научных данных относительно опасности для организма космонавтов действия этого вида заряженных частиц. Дубна и ОИЯИ были тогда уникальным и, не исключено, вообще единственным местом, где можно было проводить подобные исследования, поскольку первый ускоритель Дубны позволял получать пучки протонов с энергией до 660 МэВ, наиболее широко представленных в открытом Космосе.

Оценка биологической эффективности этих частиц была получена в цикле великолепных работ, осуществленных специалистами ряда советских исследовательских институтов, и прежде всего, Института медико-биологических проблем Минздрава СССР. Эти эксперименты стали классическими. Специалисты различных космических агентств мира, в том числе NASA, по сей день обращаются к их результатам. Однако в этих экспериментах были получены лишь коэффициенты биологической эффективности протонов различных энергий, а каковы механизмы, лежащие в основе различий биологического действия протонов и ионизирующих излучений электромагнитной природы, так и не было выяснено.

Позднее, после организации непосредственно в ОИЯИ подразделения биологического профиля была предпринята попытка решения этой фундаментальной проблемы радиобиологии – «проблемы ОБЭ», то есть относительной биологической эффективности ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками. Она формулируется следующим образом: почему разные виды ионизирующих излучений при действии в одинаковых дозах инициируют разные биологические эффекты? Так, например, почему число хромосомных поломок в живых клетках под действием гамма-квантов и нейтронов в одинаковой дозе различается в пять и более раз? Ответить на этот вопрос во многих лабораториях мира пытались с позиций учета энерговыделения излучений определенным микрообъемом, сопоставимым с размерами генетических структур. Одна и та же единица дозы от рентгеновского

излучения, от гамма-квантов и от заряженных частиц совершенно различно распределяется в каком-то элементарном объеме, и это, безусловно, отражается на тех радиационно-индуцированных эффектах, за которыми ведется наблюдение.

В ходе радиобиологических экспериментов в ОИЯИ удалось показать, что решающая роль здесь принадлежит специфическим повреждениям ДНК, где записана вся генетическая информация, - продолжает свой рассказ Е.А. Красавин. - При облучении гамма-квантами образуются так называемые «одиночные» повреждения ДНК - одностранные или двустранные разрывы во фрагменте ДНК, модифицированные основания, которые являются буквами, ответственными за ту или иную наследственную информацию, записанную в конкретных генах, сшивки ДНК-ДНК, ДНК-белок. При действии же тяжелых заряженных частиц возникают «кластерные повреждения», когда одновременно повреждается много различных фрагментов ДНК. Такие грубые деструктивные изменения исправляются клеткой с большим трудом. Поэтому, как было установлено в ЛРБ, различия в биологической эффективности разных типов ионизирующих излучений определяются двумя факторами различной природы: с одной стороны – физическим, влияющим на характер выделения энергии излучений в генетических структурах, с другой стороны – биологическим – восстановительными процессами генетических структур.

Для обнаружения в клетках различных повреждений ДНК и оценки кинетики их восстановления в ЛРБ был использован ряд эффективных методов: метод «ДНК-комет», «ДНК-фокусов», определяющих выход различных типов повреждений ДНК в живых индивидуальных клетках, другие методы, которые позволяют в их ядрах выявлять первичные повреждения ДНК.

Радиационные эффекты, наблюдаемые в живых клетках при действии разных типов излучений, изучаются в Лаборатории не только на молекулярном уровне, но и на уровне отдельных хромосом. Эти исследования особенно важны, поскольку повреждения хромосом связаны с развитием раковых заболеваний и мутациями. Особенно опасны так называемые стабильные хромосомные aberrации, когда происходит обмен генетической информацией различных хромосом. Морфология хромосом при этом не изменяется, а вот генетическая информация полностью искажается, словно в книгу вставили часть страниц из другой книги. Сегодня специалисты связывают развитие многих раковых заболеваний именно с формированием стабильных хромосомных aberrаций.

Наблюдать их в живых клетках чрезвычайно сложно, но в ЛРБ научились это делать с помощью различных экспериментальных методов.

Те типы ионизирующих излучений, которые доступны исследователям в ОИЯИ, позволяют анализировать фундаментальные процессы, протекающие в живых клетках, и, прежде всего, индукцию различных типов мутаций. Мутации, как известно, - это наследственные изменения в генетическом материале, передающиеся из поколения в поколение. Как правило, они носят вредный характер, и это очень опасно. Мы различаем так называемые генные мутации, когда нарушаются основания в триплетном коде, изменяется их смысловая нагрузка, и структурные мутации, когда повреждается целостность хромосомы. Выходы этих повреждений можно оценить, используя различные типы ионизирующих излучений. За всеми этими зависимостями стоит сложная молекулярная цепь событий. Прежде всего, это касается процессов репарации, направленных на восстановление нарушенных генетических структур.

По результатам экспериментов в ЛРБ были расшифрованы генетические механизмы и последовательность событий, порождаемых первичными актами передачи энергии в генах, вплоть до конечного события – возникновения мутаций, и впервые описана вероятность их появления в живых клетках в строгих математических терминах. Нам удалось показать, - заключил директор лаборатории, - что разные типы мутаций индуцируются различными участками треков тяжёлых заряженных частиц, которые взаимодействуют с генетическими структурами и что генные мутации индуцируются областью дельта-электронов, а сердцевина трека ответственна за летальные эффекты в клетках.

#### «Принцип мишенности»

Помимо упомянутых фундаментальных задач ускорители ОИЯИ с успехом могут применяться и в сфере лучевой и ядерной медицины. В лучевой терапии с помощью пучков заряженных частиц достигнуты значимые результаты, основанные на специфике энерговыделения различных видов излучений в тканях, а именно, на свойстве частиц отдавать энергию в конце своего пробега.. Это позволяет минимально затрагивать прилегающие к облучаемой области ткани и максимально концентрировать дозу на тех частях опухоли, на которые необходимо воздействовать. Доза не должна быть гигантской, поскольку опухоль – это сложное образование, в которое включены и стромальные элементы, и

нервные окончания, и сосуды, питающие опухолевые клетки. Если огромная доза облучения повредит все эти элементы, возникнет некроз и больной просто погибнет от интоксикации. Оптимальный вариант – так называемая мишенная терапия, прицельное воздействие только на раковые клетки.

Исследования по «мишенной терапии», проведенные в свое время в ЛРБ на чрезвычайно агрессивной опухоли – меланоме, позволили создать препарат, который был бы очень эффективен при терапии этого заболевания. Клетки меланомы содержат меланин – сложное химическое соединение, полная структура которого до сих пор не расшифрована, однако известен химический агент, называемый «тетраметилентионин» или «метиленовый синий», обладающий колоссальной степенью связывания с меланином, достигающей более 80 процентов. Поэтому возникла идея вместе с этим химическим агентом присоединить к клетке меланомы радионуклид. Выбор пал на астат – отличный эмиттер альфа-частиц, обеспечивающий высокую плотность ионизации, с пробегом в ткани на расстоянии двух-трех клеток. Его период полураспада – семь с небольшим часов, продукты распада абсолютно не активны. Если бы удалось завести такой радионуклид только в раковые клетки, не затрагивая стромальные элементы, это означало бы значительный шаг вперед в лечении онкологических заболеваний, особенно метастазных образований.

- С участием специалистов из Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, - говорит Красавин, - удалось создать устойчивую связь названного агента с радионуклидом. Можно было начинать изучение биологической эффективности препарата *in vivo*. Должен сказать, что это очень непростая задача, связанная с экспериментами на мышах. В результате была получена картина распределения препарата в различных органах и тканях. Из нее следовало, что принцип мишенности действительно реализуется! Аналогичное соединение химического агента было сделано также с йодом-131, эксперименты были проведены совместно со специалистами Института биофизики Минздрава РФ, головной организации по проблеме. Но потом работа застопорилась. До клинических испытаний не дошло. Специальных активных агентов для лечения меланомы по-прежнему нет, больные погибают в очень короткий период от начала заболевания. Мы в ОИЯИ все же надеемся, что радиационная терапия меланомы получит свое развитие и эту страшную опухоль удастся победить...

## Радиационный барьер

Полет на Марс - тоже из разряда «нерешаемых» задач. Во всяком случае, пока. Сейчас обеспечить радиационную безопасность длительных пилотируемых полетов вне магнитосферы Земли не удастся. Экипажи космических кораблей будут подвергаться воздействию галактического космического излучения, в котором присутствуют тяжелые ионы высоких энергий (наиболее представлены ядра группы углерода и железа с энергией 300-500 МэВ на нуклон). Исследования позволяют оценить реальный интегральный поток тяжелых частиц в открытом космосе. Он составляет примерно  $10^5$  частиц группы ядер углерода и железа на квадратный сантиметр в год или 160 частиц в сутки на квадратный сантиметр для частиц с зарядом ядра  $\geq 20$ . Защититься от этого излучения с помощью методов физической защиты пока не представляется возможным, можно только прогнозировать последствия их воздействия.

Предположительно, они таковы: генетические повреждения, о которых рассказывал Е.А. Красавин, то есть генные и структурные мутации, онкология, нарушение зрительных функций (образование катаракты и повреждение сетчатки), нарушение функций центральной нервной системы (ЦНС). Конкретизируя, можно с известной осторожностью сказать, что риск возникновения рака при облучении ускоренными ионами железа в 20 раз больше, чем при гамма-облучении, что катаракта развивается через 45-50 недель после даже ничтожной дозы облучения тяжёлыми ионами. Некоторые зарубежные исследователи вообще считают, что в результате прохождения через хрусталик глаза одного иона железа с энергией 300-500 МэВ на нуклон спустя какое-то время обязательно возникает катаракта.

Трек тяжелой частицы высокой энергии в организме может пересекать несколько тысяч клеток. Они мгновенно подвергаются значительному облучению, а это означает, что такие частицы могут представлять серьезную опасность для непролиферирующих тканей, и, прежде всего, для тканей нервной системы. Вот прогноз, сделанный биофизиками NASA. За время полета на Марс до 13 процентов нервных клеток будут пересечены, по крайней мере, одним ионом железа; от 8 до 46 процентов нейронов - по крайней мере, одной частицей с  $Z$  больше 15; каждое ядро клетки в течение трех дней – протоном; в течение 30 дней – альфа-частицей. Это, безусловно, будет приводить к каким-то нарушениям. К каким? Неизвестно...

Ясно только, что миссия на Марс при тех скоростях полета, которые могут обеспечить сегодня наши космические корабли, весьма и весьма проблематична. При сегодняшних скоростях радиационный барьер является труднопреодолимым. Как его обойти, тоже неизвестно... Пока остается надеяться лишь на новые двигатели космических кораблей, которые позволят развить втрое большую скорость полета в открытом космосе, соответственно, втрое сократить время заточения в корабле и, значит, втрое уменьшить вредное воздействие радиации на космонавтов. Этого, как полагают специалисты, вполне достаточно для обеспечения радиационной безопасности марсианского путешествия. Прототипы таких двигателей уже появляются. Успеют ли разработчики к 2022 году?.. Успеют ли физиологи с оценками нарушения деятельности ЦНС после облучения ускоренными ионами железа?.. Очевидно, что радиационный фактор вносит в нее искажения и помехи, но сказать о них что-то определенное мы пока не можем...

#### Семилетка биофизики

Марсианская миссия сегодня проблематична не только из-за вполне очевидной радиационной опасности, но и из-за множества неясностей. Задача пока не может быть решена в силу своей неопределенности. Проще говоря, не хватает знаний. Чем конкретно грозит космическая радиация кораблю (в том числе микроэлектронике многих управляющих систем) и астронавтам, во многом до конца не известно.

Но ОИЯИ всегда был в числе тех организаций, усилиями которых решались, казалось бы, неразрешимые для своего времени задачи. Например, подготовка первых космических полетов человека. И сегодня, при тщательной подготовке миссии на Марс многие медико-биологические задачи также решаются с помощью ускорителей заряженных частиц Института. Нуклотрон, фазотрон, ускорители Лаборатории ядерных реакций, а в будущем и дубненский коллайдер «Ника» обеспечат радиобиологам отличные возможности для полноценных исследований.

Их программа на 2010-2016 годы, утвержденная Комитетом Полномочных Представителей ОИЯИ, включает работы по следующим основным направлениям. К ним относятся:

##### Исследования

- механизмов генетического действия ускоренных многозарядных ионов;



- закономерностей и механизмов образования и репарации повреждений ДНК в клетках человека;
- вопросов действия тяжелых ионов на хромосомный аппарат клеток;
- мутагенного воздействия излучений широкого диапазона линейной передачи энергии (ЛПЭ) на клетки различных организмов.

#### Исследования

воздействия тяжелых частиц на структуры глаза - хрусталик и сетчатку, что позволит построить модель молекулярных механизмов возникновения помутнений в хрусталике (катаракты) человека, подвергшегося облучению тяжелыми ионами.

#### Исследования

закономерностей биологического действия ускоренных тяжелых ионов на центральную нервную систему, изучение морфологических, цитологических и молекулярно-физиологических нарушений в структурах центральной нервной системы, модификации поведенческих функций у облученных животных.

#### Математическое моделирование биофизических систем.

#### Радиационные исследования.

Они будут ориентированы, главным образом, на развитие методов расчета транспорта излучений в веществе применительно к решению биофизических задач.

Для решения практических задач будут проводиться расчеты полей излучения внутри космических аппаратов и жилых модулей, распределений первичного и вторичного излучений в органах тела человека на борту космических аппаратов, оценка дозовой нагрузки космонавтов и риска соматических и генетических последствий облучения на основе существующих методик. Будут изучаться возможности использования методов биодозиметрии для оценки дозовых нагрузок. Другим традиционным приложением расчетов транспорта излучений в веществе останется физика защиты. Планируется продолжить разработку методов расчета защиты ускорителей в условиях сложной геометрии, методов прогнозирования радиационной обстановки на ускорителях и в окружающей среде, методов оценки наведенной активности оборудования, воздуха, воды и т. д.; разработку систем радиационной безопасности на проектируемых ускорительных комплексах в ОИЯИ и странах-участницах.

Продолжаются исследования и расчеты характеристик перспективных радиационных детекторов и дозиметров излучений.

### Вероятности

В исследованиях, ведущихся с конца 50-х годов, главное, по-видимому, установлено твердо. Главным лимитирующим фактором межпланетного полета является **галактическое космическое излучение**, то самое, интегральный поток которого составляет примерно  $10^5$  частиц на квадратный сантиметр в год или 160 частиц в сутки, именно то, что с большой вероятностью вызывает генетические повреждения - генные и структурные мутации, онкологию, нарушение зрительных функций (образование катаракты и повреждение сетчатки), нарушение функций центральной нервной системы (ЦНС), лучевую болезнь, хотя эта последняя крайне маловероятна. (Это, как выяснилось, далеко не всегда смертельная и вообще самая редкая болезнь на Земле - за все время наблюдений в СССР зафиксировано только 500 случаев.) Чрезвычайная опасность грозит нервным тканям. Они почти наверняка будут поражаться, что приведет к каким-то нарушениям и отразится на работе мозга. Исходя из данных экспериментов на ускорителях, можно предположить, что под действием галактического излучения уже через несколько месяцев работоспособность астронавтов может снизиться, они могут утратить часть профессиональных навыков, ослабнет способность к обучению... Так ли это? Не окажется ли миссия на Марс под угрозой? Хуже того, не будет ли провалена?..

По мнению Е.А. Красавина, для ответа на два последних, самых важных вопроса необходимо предложить какие-то новые подходы. Например, ввести такой показатель как **вероятность осуществления миссии**. Миссия окажется под угрозой, если вследствие различных неблагоприятных факторов (облучение, невесомость, гипокинезия, стресс и пр.) возникнут грубые нарушения поведенческих реакций космонавтов, пострадает зрение, разовьется астенический синдром, снизится двигательная активность. Угрозы могут обернуться провалом, а значит, привести к потере гигантских средств, затраченных на подготовку и осуществление полета... В число угрожающих факторов входит и риск развития онкологических заболеваний в результате облучения. Однако их можно отнести к отдалённым последствиям радиационного воздействия. Хотя возникновение опухолевых процессов не

исключено и, напротив, весьма вероятно, они проявятся, главным образом, только после возвращения экспедиции на Землю. Иными словами, рак у космонавтов возможен, но он не успеет помешать выполнению миссии. Это означает принципиально другой подход к нормированию радиационного риска для членов экипажа в отличие от людей, живущих на Земле. Им воздадут почести как героям и будут лечить. Когда они прилетят назад. Жестко? Да. Но миссия на то и миссия, чтобы быть выполненной, в крайнем случае – ценой жизни. Вот почему, кстати, «миссия на Марс» сегодня говорят чаще, чем «полет на Марс» или «путешествие на Марс».

Такое смещение акцентов подразумевает, что миссия должна быть осуществлена даже при отсутствии надежной защиты от космических излучений, хотя очевидно, что при надежной защите вероятность успеха значительно выше. Что можно предложить сегодня в качестве такой защиты? Традиционные способы, как утверждается, не годятся. Нельзя использовать комбинации металлов, так как при прохождении заряженных частиц через вещество защиты будут рождаться ливни вторичных частиц. Различные материалы корабля станут источником вторичного, в основном, нейтронного излучения, а нейтроны также имеют высокую относительную биологическую эффективность и приводят к сильному поражению систем и структур организма. Рассматриваются варианты защиты корабля мощным магнитным полем, однако в этом случае экипаж подвергается потенциальной опасности воздействия сильного магнитного поля, а его воздействие на живые организмы не изучено. Поэтому, полагает Е.А. Красавин, самый верный способ уменьшить воздействие космических потоков радиации – все-таки постараться лететь быстрее. Это значительно увеличит шансы. Хотя и тут гарантий никто не даст. Их нет и быть не может.

Ведь кроме галактической на космонавтов будет действовать **радиация солнечная** плюс **излучение радиационных поясов Земли**. Солнечные космические лучи – это, в основном, протоны, имеющие свою пространственную структуру, да и радиационные пояса вносят свой специфический вклад в общую картину. Она такова: на стабильный хронический фон галактического потока накладываются острые протонные пики при событиях на Солнце. При этом энергия протонов может достигать 500 МэВ.

Этой-то обобщенной картиной и должны задаваться параметры радиационной защиты космического корабля, как с точки зрения радиобиологии, так и технической физики. Обеспечить их практически невозможно, поэтому, как

считает В.М. Петров – специалист в области радиационной защиты космических аппаратов, придется смириться с неизбежностью определенного воздействия излучений на астронавтов.

Какими окажутся последствия, насколько опасны они для выполнения программы полета, раз, и для экипажа, два? Чтобы оценить их, нужно ввести понятия **радиационного риска** (возрастание вероятности гибели при увеличении облучения) и **эргономического риска** (вероятность неверного выполнения полетных операций), который появляется за счет воздействия на ЦНС. Эти аспекты пребывания человека в открытом космосе пока изучены недостаточно.

### Критерии и риски

Интересно, что индикатором биологических сбоев могут служить сбои в микроэлектронике – ведь от радиации страдают не только живые организмы, но и электронное оборудование космических аппаратов и в их реакции на воздействие много общего. Полностью защитить от тяжелых заряженных частиц оборудование корабля нельзя, но что-то предпринять для ослабления поражений – можно. В области микроэлектроники помогут конструкторские ухищрения, выбор материалов, планирование космических экспериментов. Так, нельзя выполнять ответственные операции в период или в месте особой радиационной опасности, во время солнечных вспышек, в районе Южно-атлантической («бразильской») аномалии. Иными словами, их следует планировать на менее опасные периоды. При обращении к человеку и прочим живым биологическим структурам принцип адекватного конструирования отпадает, а вот принцип планирования – остается. И в соответствии с ним нужно точно определять время космических экспедиций, а чтобы получить точную оценку риска и вероятности успеха космической миссии, надо применять модели.

Среди ведущих специалистов, занимающихся проблемой преодоления радиационного барьера на пути в дальний космос, есть и пессимисты, и оптимисты. Директор НИИЯФ им Д.В. Скобельцина МГУ профессор М.И. Панасюк считает, что, хотя о космической радиации нам известно очень много, все-таки пространство исследуется давно, какие-то критические точки остаются. Изучение их желательно с участием мировых космических агентств – Российского, Европейского, NASA. Но тут возникает столкновение интересов. Возьмем такой вопрос: сколько можно пробыть на Луне? Вычисления по российским моделям

радиационного риска показали: при максимуме солнечной активности – 45 дней, при минимуме – 360 дней. По американским моделям - 210 и 90 дней, соответственно. В чем причина расхождения, понятно: в разных исходных посылах, поскольку единых подходов не существует. Мировое научное сообщество не выработало общепринятых представлений о радиационном риске, опасности или безопасности пребывания в открытом космосе. В Европе сейчас пытаются свести подходы разных школ воедино, но пока разногласия велики. По мнению американцев, нужно лететь на Марс в год наибольшей солнечной активности, потому что в такие годы галактическое излучение минимально. Российские же модели показывают, что американцы переоценивают снижение галактической радиации и недооценивают радиационный риск.

Директор Института мозга им. Н.П. Бехтеревой РАН, член-корреспондент РАН С.В. Медведев полагает, что все мы вместе недооцениваем степень устойчивости мозга человека. Он способен к самовосстановлению и компенсации. Американцы подсчитали, что марсианский полет будет стоить астронавтам потери 15 процентов нейронов. Это, примерно, равносильно тому, что они будут выпивать по бутылке водки в день. Но 15 процентов – не очень значимо, если теряются они на одном участке мозга и не сразу. Возьмите микроинсульты или опухоли, убивающие такое же число нейронов. Ведь человек остается вполне адекватным. Поэтому угроза миссии со стороны мозга достаточно мала... Опасна потеря 30 процентов нейронов, но и здесь нужно учитывать каждодневное восстановление человеческого организма. Сейчас уже установлено, что каждый день умирает сто грамм клеток крови и один килограмм соматических и висцеральных клеток. За жизнь человек производит три тонны крови. Клетки мозга обновляются хуже и все-таки тоже обновляются. Наверно, самая тяжелая ситуация – с сетчаткой глаза, она почти не обновляется, как и некоторые участки коры, очень важные для интеллектуальной деятельности. Но процессы, пусть и медленно, идут и там... Поэтому при оценке вероятного успеха марсианской миссии не стоит впадать в безнадежность. Все будет зависеть от динамики поражения и динамики репарации организма. Если восстановление будет идти быстрее, то шансы есть, а значит, есть и повод для оптимизма.

## Пессимизм, оптимизм, реализм

Осторожный оптимизм выказывают специалисты и в связи с большой устойчивостью базовых оснований и моделей психики. По-видимому, она далеко не сразу поддастся атакам космического излучения. Нельзя сбрасывать со счетов известные радиопротекторы, которые, будучи введенными в организм до того, как он подвергнется облучению, повышают его устойчивость.

Может быть, недооценка степени устойчивости мозга человека действительно имеет место? Но она основана на объективных экспериментальных данных. Их последнее обобщение дано в статье А.И. Григорьева, Е.А. Красавина и М.А. Островского «К оценке риска биологического действия галактических тяжелых ионов в условиях межпланетного полета», напечатанной в «Российском физиологическом журнале им. И.М. Сеченова».

Исходное положение анализа – доказанная в опытах высокая опасность воздействия ГКИ на клетки целостного организма. В том числе, а, может быть, прежде всего, на структуры головного мозга. И здесь наиболее чувствительной областью, особенно к действию тяжелых заряженных частиц, является гиппокамп. Этот участок мозга выполняет задачу консолидации памяти, что означает ее переход из кратковременной в долговременную. Гиппокамп выделяет и удерживает в потоке внешних стимулов важную информацию, то есть выполняет ту же функцию, что оперативная память компьютера. Кроме того, он обеспечивает пространственную память. Это своего рода «карта», нейронное представление окружающей обстановки и своего местоположения в ней. При поражении гиппокампа утрачивается память на текущие события, выходит из строя нейронный аппарат для учета допущенных ошибок. Отсюда понятно, что радиационное повреждение этой структуры, играющей ключевую роль в механизме памяти, способно привести к модификации высших интегративных функций мозга и обусловить нарушения оперативной деятельности экипажа. Поэтому детальное исследование действия тяжелых ионов на структуры и функции ЦНС, по мнению авторов статьи крайне важны. К ним подталкивают и накапливающиеся в последние годы данные, свидетельствующие о высокой радиочувствительности отдельных структур ЦНС даже к малым дозам облучения. К ним относится и гиппокамп.

Есть и еще одна причина повышенной опасности тяжелых заряженных частиц именно для этой структуры. В одном из ее отделов происходит нейрогенез - постоянное образование новых нервных клеток, исключительно уязвимых для излучения. Открытие нейрогенеза в гиппокампе – это, можно сказать, сенсация. Ведь на протяжении долгого времени считалось, что нервные клетки не делятся. Оказалось – делятся с ежесуточным образованием, по некоторым данным, 1400 молодых нейронов, так что в год обновляется 1,75 % этой структуры. Молодые нейроны поначалу участвуют в процессах, связанных с запоминанием, затем в течение нескольких месяцев идет их миграция в высшие отделы мозга и встраивание в сети, где формируется долговременная память.

Означает ли это, что угроза гибели нейронов под действием ГКИ действительно преувеличена, потому что на место выбывших нервных клеток придут народившиеся? Нет, не означает, ибо в случае гиппокампа речь идет только о функции памяти, а изменения во многих других функциях ЦНС при повреждении структур мозга ионизирующим излучением еще не изучены. По мнению Е.А. Красавина, именно эти исследования становятся стержневыми, они должны потеснить изучение онкогенеза, при том, разумеется, что последнее тоже чрезвычайно важно. Проблем в радиобиологическом обеспечении марсианской миссии очень много.

Отдаленные эффекты облучения для космонавтов в нормативных документах США, Японии и других стран обычно связываются с развитием опухолевых процессов в организме. Потенциальная опасность тяжелых ядер ГКИ для работы ЦНС почти не учитывается, хотя, как мы видим, их воздействие может значительно модифицировать высшие интегративные функции мозга и привести к нарушениям в операторской деятельности экипажей. Ведь суммарный радиационный риск для космонавтов в возрасте 45-50 лет, оцениваемый с учетом развития нарушений в других системах организма (центральной нервной, сердечно-сосудистой, нейроэндокринной и других), согласно российским исследованиям, в 3,5-9 раз больше по сравнению с развитием онкологии.

Эти цифры не оптимистичны и не пессимистичны, они реалистичны, поскольку основаны на результатах проведенных на сегодня опытов. К тому же, оценки будут уточняться по мере увеличения базы данных, тщательного анализа риска радиационных нарушений у экипажей космических кораблей при действии тяжелых ядер ГКИ в ходе межпланетных полетов. Показатель «вероятность успешного выполнения миссии» должен определяться по нескольким

вероятностям: во-первых, возникновения радиационных поражений, во-вторых, возникновения нерадиационных нарушений вследствие влияния факторов космического полета (невесомость, нахождение в замкнутом пространстве, психологические факторы, заболевания, травмы и прочее) и, в-третьих, отказа технических устройств.

В свою очередь, вероятность возникновения радиационных поражений может слагаться из вероятности нарушения функций ЦНС, функций сетчатки глаза как части мозга, вынесенной на периферию, вероятности возникновения ближайших эффектов облучения (нарушение костно-мозгового кроветворения, повреждение кожных покровов, других органов и тканей организма вследствие интенсивного облучения протонами в результате солнечных вспышек), вероятности возникновения отдаленных эффектов облучения (возникновение раковых заболеваний, формирование радиационной катаракты и пр.). Насколько будут эти вероятности влиять друг на друга – повышать, понижать? Насколько усилятся нарушения высших интегративных функций ЦНС при тех тяжелейших психологических нагрузках, которые неизбежно будет сопровождать полет? Ответы можно получить только в тесном сотрудничестве специалистов в области радиационной биологии, нейрофизиологии, физики ускорителей, математического моделирования.

### Космическая культура

Многое уже известно. Но старые представления и нормы, ГОСТы, разработанные для орбитальных полетов, нуждаются в обновлении и уточнении. Здесь опытных данных не хватает. Их, как говорилось, можно частично получить на уникальной ускорительной базе ОИЯИ, но потребуются также экспериментальные исследования в космосе – с помощью так называемых «спутников возврата». Собственно, они уже велись, причем, на людях, а именно, на космонавтах. У тех из них, кто несколько раз побывал на орбитальных станциях «Мир» и МКС после первых двух полетов уровень хромосомных aberrаций возрастал, а после третьего полета происходила некоторая адаптация к радиации. У летавших на МКС она наблюдалась отчетливее, а полученные дозы, были, наоборот, меньше – за счет лучших бытовых условий и, главное, лучшей защиты. Значит, ее все-таки возможно улучшить. А чем надежнее защита, тем реальнее становится миссия на Марс.



И все-таки думается, мы никогда не отправимся туда с такой же простотой и уверенностью, как летаем на авиалайнере в Сочи. «Среди звезд нас ждет неизвестное», - сказал писатель и философ Станислав Лем, и действительно, уже первые маленькие шаги даже не к звездам, а к ближайшим планетам Солнечной системы ставят перед нами труднопреодолимые задачи и заставляют пересмотреть привычные представления. За выход в свободное пространство приходится давать высокую цену: успех миссии должен быть оплачен здоровьем, а то и самой жизнью космонавтов, что в нашей современной культуре звучит почти кощунственно... однако те, кто устремлен в космос, к этому готовы.

Зачем они туда стремятся? Ведь дел на Земле – на столетия. А мы зачем-то рвемся в космос. Несмотря на все мыслимые и немыслимые опасности, на все преграды, на всю разорительность этого дела. Может быть, мы хотим найти там нечто, что не просто компенсирует, а значительно перекроет затраты? Собираемся покорить астероиды и планеты, установить там власть Земли? Вряд ли об этом стоит говорить всерьез... Наверно, на самом деле мы просто чувствуем неодолимую тягу к звездам. Наверно, подняться к ним – миссия человечества. И для ее выполнения постепенно создается новая культура. В ее недрах вызревает собственно полет – рывок вверх. Он станет ее вершиной, ее венцом.

На эту новую культуру уже работает старая земная наука, например, космическая радиобиология. Ее, по существу, создают ускорители ОИЯИ, моделирующие процессы, происходящие в глубоком космосе, за пределами магнитосферы Земли. Человеку там не место, жить там он не может. Но – вот ведь парадокс! – жизнь как таковая, возможно, зародилась именно там, в пространстве, пронизанном жестким излучением, пересекаемом странниками-метеоритами, которые время от времени заканчивают свой путь не Земле. «Небесные камни» дали начало астробиологии – одной из наук, тесно связанных с формирующейся космической культурой. В РАН астробиологическое направление возглавляет академик А.Ю. Розанов, академик-секретарь Отделения биологических наук. Основное поле его исследований – поиск в различных геологических отложениях и в различных телах космического происхождения следов жизнедеятельности колоний микроорганизмов либо более высокоорганизованных клеток, относящихся к разным геологическим временам существования Земли и Вселенной. Этих следов обнаружено множество. Огромный фактический материал подводит к выводу, что жизнь была привнесена

на нашу планету упавшими метеоритами определенных классов и за миллионы лет эволюционировала до нынешнего состояния.

Два года назад в ЛРБ ОИЯИ был образован новый сектор – сектор астробиологии, сосредоточившийся на тайнах происхождения жизни. Дубненские исследователи под руководством А.Ю. Розанова и Е.А. Красавина тесно сотрудничают с двумя группами итальянских ученых, возглавляемыми профессором Эрнесто Ди Мауро из римского университета «Сапиенца» и профессором Раффаэле Саладино из Университета делла Туша, Витербо.

### «Пробирка Вселенной»

Итальянцам удалось едва ли не главное: они сумели взглянуть на метеориты другими глазами. Что такое метеорит? Просто какой-то минерал. Только упавший с неба. А значит побывавший в космическом пространстве. Именно этот факт и надо поставить во главу угла. Проникнуться мыслью, что «небесный камень» бездну времени существовал в условиях, кардинально отличных от земных. Словно сама природа, говорит профессор Ди Мауро, подсказывает нам: смотрите, в этом камне может быть то, что на Земле неизвестно! Взгляните внимательнее, и вам откроются новые возможности!.. И действительно, в экспериментах с метеоритами открылись, по словам профессора, весьма обнадеживающие перспективы. Которые раньше не смог увидеть никто, потому что никто, кроме исследователей двух групп из названных итальянских университетов не занимался этой проблемой и не ставил подобных опытов.

В них выяснилось: в нашей Вселенной в межзвездной среде широко распространено химическое соединение формамид. Он в огромном количестве содержится в пространстве. Облака формамида в виде черных точек видны на снимках Млечного пути. Он образуется из двух самых распространенных органического и неорганического соединений, встречающихся в космосе – цианистоводородной кислоты и воды. Формамид найден в космической пыли, в хвостах комет, он присутствует в метеоритах, найден на астероидах, обнаружен на Марсе и Венере, не говоря уж о Земле. Если подвергнуть метеоритное вещество тепловому воздействию в формамидной среде, то образуются некоторые соединения, необходимые для строительства нуклеиновых кислот и аминокислот. Принципиально важно, что получают они абиотическим

способом, без участия живых организмов, только за счет изменения условий внешней среды.

Действие источников энергии, отличных от тепловой, на реакции синтеза из формамида в присутствии метеоритов как катализаторов, ранее не было исследовано. С учетом этого, итальянскими специалистами и сотрудниками Лаборатории радиационной биологии были предприняты эксперименты по изучению влияния ионизирующей радиации с разными физическими характеристиками на этот процесс. В ходе экспериментов наблюдалось образование нуклеиновых оснований, карбоксильных кислот, аминокислот и конденсирующих агентов в присутствии вещества, полученного из двенадцати метеоритов различных классов. Продукты этих реакций с большой ясностью показывают возможность открытия новых путей для изучения процессов, произошедших в космосе и определивших начало нашей истории.

Полученные результаты могут указывать на разрешение противопоставления первичности "генетики и метаболизма", комментирует Е.А. Красавин. Если компоненты, как генетических материалов, так и метаболизма синтезируются совместно, то представляется возможным общий эволюционный сценарий. При широком распространении формамида в космосе эти виды синтеза пребиотических молекул, по-видимому, могут осуществляться при наличии источников энергии в пространстве и катализаторов внеземного происхождения. По словам Ди Мауро, можно получить практически все переходы, ведущие к «самозарождению» РНК – первой нуклеиновой кислоты. В этой же среде и этим же способом образуются ключевые компоненты метаболических циклов, аналогичные тем, что происходят в живых клетках, часто - в той же самой пробирке.

Вселенная, говорит Ди Мауро, напоминает гигантскую лабораторию, где бесконечно идут процессы синтеза новых субстанций. Причем, наиболее активно участвуют в них водород, азот, углерод и кислород, то есть именно те элементы, на которых держится химизм нашего наследственного механизма, те, что составляют нашу ДНК.

Есть все основания утверждать, резюмирует профессор Ди Мауро, что элементы и соединения, составляющие живой организм, образуются в результате достаточно простого процесса без какого-либо креативного вмешательства извне, то есть первоначального творящего импульса, сошествия Духа Святого или другого подобного фактора. Это еще не жизнь, но весьма

близкие подступы к ней. На эти рубежи природа выходит сама, посредством термохимических и/или фотохимических реакций. Материалы космического происхождения, в частности, железо-каменные метеориты, являются чрезвычайно активными в реализации такого рода синтеза и продуцируют большое количество новых катализаторов.

Исследования итальянских ученых показывают, что эти процессы могут найти применение в инновационных наукоемких технологиях тонкой химии, фармацевтической химии и нефтехимии. Здесь перспективы действительно выглядят обнадеживающими, а вопрос об источнике энергии для синтеза можно отодвинуть на второй план. А вот в науке так поступить нельзя. В науке вопрос «какая первородная энергия используется для формирования начал жизни» рано или поздно становится основным. Может быть, предположили в группе Ди Мауро, это энергия космических излучений? В ходе экспериментов были получены данные, свидетельствующие в пользу такого ответа. Под действием радиации спонтанно возникали связи, приводящие к образованию информационных макромолекул – «строительного материала» РНК и ДНК. По-видимому, космическое излучение играло важную роль в процессах, идущих в гигантской «лабораторной пробирке» межзвездного пространства.

### Вершина

Ее модель была создана в ЛРБ ОИЯИ с помощью ускорителей Дубны, генерирующих различные виды ионизирующих излучений. Уже три года эти «блестящие машины», как назвал их директор лаборатории Е.А. Красавин, в дополнение ко всем своим обязанностям, помогают разобраться в механизме возникновения пребиотических молекул, играющих огромную роль в организации живых систем. Самым первым экспериментом стало облучение метеоритного вещества в формамиде пучками протонов фазотрона, надежно работающего в Институте с 1949 года. Облучение ионами углерода проводилось на нуклотроне, ионами бора - на ускорителе многозарядных ионов У-400М. Во всех экспериментах происходили реакции, которые ранее не наблюдались в итальянских опытах при действии на систему «формамид плюс метеоритное вещество» теплового фактора и ультрафиолетового излучения.

Опыты в ЛРБ подвели к заключению, что пребиотические макромолекулы возникают под действием ионизирующего излучения (космического или

генерированного на ускорителях), приводящего к образованию в среде свободных радикалов и генерирующих широкий спектр радионуклидов. Удалось установить, что облучение протонами формамида вместе с веществом метеоритов рождает такие важнейшие соединения, как различные основания, входящие в состав РНК и ДНК, сахара, аминокислоты... На следующем этапе исследований, говорит профессор Красавин, предстоит провести анализ возможных путей «самосборки» из сравнительно сложных структур еще более сложных – информационных макромолекул. Все необходимые элементы для этого есть, как и для того, чтобы обеспечить начальный этап процесса обмена веществ. И вообще есть все, чтобы начать процесс творения жизни. Кроме одного – источника творящего импульса.

Но, может быть, он и не нужен? Может быть, сотворение, возникновение, формирование жизни есть естественное следствие образования Вселенной, фаза ее развития? Может быть, жизнь просто не может не возникнуть, так как она есть обязательный элемент мироздания? Может быть, поэтому-то для ее появления в космосе и припасено все необходимое?.. В самом деле, говорит Е.А. Красавин, для начала космической работы по созданию пребиотических информационных молекул наличествуют и метеориты, и простые химические соединения, и ионизирующие излучения как источник энергии для синтетических реакций. Это действительно космическая работа, она может стартовать, по-видимому, только в космосе, потому что на Земле не хватает жесткого излучения, его отсекает магнитосфера планеты. Но в космосе возникает лишь преджизнь, а жизнь должна развиваться на Земле, под защитой магнитных полей. Поэтому следующие стадии эволюции, длящейся миллионы и сотни миллионов лет, плотно привязаны к планете. Рано или поздно здесь складываются благоприятные условия, когда из зародившихся в космосе макромолекул в результате гигантской концентрации сил и ресурсов могут возникнуть клетки, способные к обмену веществ и размножению. Получив от эволюции «биохимическую кухню» живой клетки, они в конце концов создают себе подобное, самовоспроизводятся, осуществляют обмен веществ с внешней средой, а это - наиглавнейшее свойство живого.

Речь сейчас о том, говорит Е.А. Красавин, чтобы с помощью оборудования ОИЯИ смоделировать те условия и процессы, которые, осуществляясь во Вселенной, в какой-то миг, сложившись в уникальную комбинацию, приводят к появлению живого. И к тому же, сконцентрировать их, спрессовать время –

время эволюции жизни... Интересно, что, достигнув в земном «инкубаторе» стадии homo sapiens, она, подчиняясь неодолимому и зачастую иррациональному зову, устремляется в космос – в свою изначальную колыбель. И это, наверное, совсем не случайно. В этом проявляется космическая миссия жизни. А значит, и ее скромная частица – готовящаяся марсианская миссия нашей цивилизации.