

«Исследование космического вещества на Земле и в космосе; исследование биологических и геохимических особенностей ранней Земли»

Оглавление

Введение

Обоснование Проекта

1. Исследование микрофоссилий и органических соединений в метеоритах и в древних земных породах.
2. Исследование синтеза сложных пребиотических соединений из формамида при действии радиации с участием метеоритов в роли катализаторов.
3. Биогеохимические исследования космической пыли.
4. Изучение космического вещества методами ядерной физики.

Полученные результаты

Ожидаемые результаты

Экспериментальное и теоретическое обеспечение проекта

Оценка стоимости

План работ

Аннотация

Введение

В настоящее время астробиология является активно развивающейся наукой, которая изучает жизнь в самом широком понимании, т.е. как глобальное космическое явление. Она изучает происхождение, эволюцию, и распространенность жизни во Вселенной. Астробиологи стремятся к более полному пониманию земной жизни для того, чтобы оптимизировать её поиски на других планетах. Необходимо ближе подойти к ответам на следующие фундаментальные вопросы: где и при каких условиях могли зародиться первые организмы? Каковы условия их существования? Обитаемы ли другие тела Солнечной системы? Также астробиология изучает процессы, протекающие от астрокатализа, т.е. образования первых органических соединений в космосе, до формирования клеток и далее первых организмов.

Представленный проект относится к области астробиологии. Астробиологические исследования в последние годы приобрели особую актуальность, в связи с обнаружением всё большего количества свидетельств о распространенности жизни во Вселенной. Известны новые границы условий существования живых организмов (экстремофилов) на

Земле, обнаруживаются окаменелости микроорганизмов в метеоритах, известно о широкой распространенности органических молекул в космосе.

По представленным в проекте темам проводятся важные исследования в сфере астробиологии и имеются существенные результаты, которые вносят весомый вклад в данном направлении. Работа проводится силами сектора астробиологии ЛРБ ОИЯИ с участием других подразделений ОИЯИ и научных организаций, входящих в коллаборацию. Ряд исследований осуществляется совместно, при этом часть из них выполняется на установках коллаборантов.

Обоснование Проекта

На данный момент известно, что в космосе присутствуют различные, в том числе и сложные, органические соединения, которые могли являться предшественниками известной нам формы жизни. С одной стороны, они сравнительно устойчивы в окружающей межзвездной среде, но при формировании планет из газо-пылевых дисков могут претерпевать разнообразные химические трансформации. Такие молекулы могут войти в состав метеоритов и кометных ядер, которые способны доставить эти структуры на формирующиеся и уже готовые планеты. Все это, наряду с обнаружением планет земного типа и находками окаменелых микроорганизмов в метеоритах означает, что во Вселенной должна быть распространена жизнь.

Для астробиологических исследований требуется применение методов как биологии, так и астрофизики, физики, химии, палеонтологии. На Землю постоянно поступает огромное количество космического (метеоритного) материала. Это и является одним из значительных стимулов развития астробиологии. Обнаружение учеными в метеоритах окаменелых микроорганизмов (микрофоссилий) вернуло человечество к необходимости переосмысления идей панспермии.

Но возможности заноса микроорганизмов на Землю упирались всегда в проблему их сохранения и транспорта в космическом пространстве. С этой точки зрения, одним из важных элементов исследований является изучение длительного анабиоза микроорганизмов в условиях антарктических льдов и вечной мерзлоты. Установлена невероятная приспособляемость жизни к самым разнообразным, в том числе экстремальным условиям, что заставляет по-новому исследовать возможности жизни на планетах Солнечной системы, их спутниках, астероидах, кометах, в межзвездной и межпланетной среде.

В целях продолжения развития работ по астробиологии в России, при поддержке Научного совета по астробиологии при президиуме РАН в 2013 году в ОИЯИ было

создано новое научное направление по теме «Биогеохимическое исследование космического вещества на Земле и космосе» и исследование биологических и геохимических особенностей ранней Земли.

В секторе астробиологии (ЛРБ ОИЯИ) уже проводятся, а также планируются проводиться следующие исследования:

- исследование микрофоссилий и органических соединений в метеоритах и в древних земных породах
- изучение жизни в экстремальных (тепло и холод) условиях;
- исследования синтеза сложных пребиотических соединений из формамида при действии радиации с участием метеоритов и земных пород в роли катализаторов;
- биогеохимические исследования космической пыли;
- изучение космического вещества методами ядерной физики;
- изучение возможного переноса жизни между телами солнечной системы и за ее пределами;
- изучение ранней Земли: палеонтологические, палеобиологические, геологические и иные аспекты, возможные модели появления жизни на Земле, становление мира РНК;
- изучение органических веществ и физико-химических параметров в гидротермальных системах, подземной биосфере Земли и космическом веществе, в контексте возникновения первичных форм жизни на ранней Земле и других планетах.

Среди вышеуказанных исследований выделяются ОСНОВНЫЕ направления исследований:

- исследование микрофоссилий и органических соединений в метеоритах и в древних земных породах;
- исследования синтеза сложных пребиотических соединений из формамида при действии радиации с участием метеоритов и земных пород в роли катализаторов
- биогеохимические исследования космической пыли;
- изучение космического вещества методами ядерной физики.

В рамках данных направлений будут решаться следующие задачи:

- изучение возможных источников, путей и условия формирования первых пребиотических соединений;
- поиск следов жизни в метеоритах и других астроматериалах;

- изучение вариаций элементного и минерального составов метеоритов;
- исследование организмов-экстремофилов;
- интерпретация результатов изучения космической пыли;
- микропалеонтологическое исследование земных пород, поскольку Земля – это наиболее изученный объект Солнечной системы

Для решения поставленных задач будут использоваться методы газовой хроматографии и масс-спектрометрии (ГХ/МС), электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и т.д.

1. Исследование микрофоссилий и органических соединений в метеоритах и в древних земных породах.

Микрофоссилии представляют собой окаменелые микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности. Они являются важным свидетельством распространенности жизни во Вселенной. Микрофоссилии присутствуют практически во всех осадочных и осадочно-вулканогенных породах земной коры, начиная с 3,9 млрд. лет. Опыт бактериальной палеонтологии позволил уверенно выделить микрофоссилии в метеоритах типа углистых хондритов. Возраст некоторых из них превышает возраст Земли. Это указывает на то, что жизнь в Солнечной системе возникала за пределами земного шара и, возможно, была занесена на Землю из космоса. Изучение микрофоссилий и органических соединений в метеоритах и древних земных породах позволит получить данные о формах древней земной и внеземной жизни и пролить свет на проблему происхождения жизни.

Изучение элементного и минерального состава метеоритов и земных горных пород – путем рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. Исследование состава метеоритов позволит сделать выводы об их происхождении и об условиях, существовавших на родительском теле. В ходе исследования метеоритов необходимо уметь отличать родные для метеорита древние микрофоссилии от земных контаминантов и абиогенных структур. Поскольку мы имеем дело с псевдоморфозами, которые по химическому составу не отличаются от метеорита, то в первом случае засорение обнаруживается с помощью микроанализатора. Во втором – биогенные структуры, как правило, резко отличаются от абиогенных морфологически.

Микропалеонтологическое изучение древнейших земных горных пород позволит расширить наши представления об условиях, господствовавших на ранней Земле, истории развития жизни на ней.

Исследование экстремофилов поможет установить границы существования живого. В секторе планируется изучение морфологии данных организмов, с помощью СЭМ.

С помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 в секторе астробиологии изучено более 20 образцов метеоритов и земных горных пород. Получено и проанализировано несколько сотен изображений ископаемых микроорганизмов.

Продолжены исследования древнейших кор выветривания, архейских и раннепротерозойских железистых кварцитов Карелии, Кольского п-ова и КМА; получены новые данные по биогенному происхождению минералов; рассмотрена роль организмов в концентрации полезных ископаемых на Земле; изучались вопросы, касающиеся заселения микроорганизмами лавовых потоков, а также колонизация суши.

В рамках сотрудничества с Палеонтологическим институтом имени А. А. Борисяка РАН, старшим научным сотрудником этого института М.М. Астафьевой и др. проведен ряд бактериально-палеонтологических исследований.

2. Исследования синтеза сложных пребиотических соединений из формамида при действии радиации с участием метеоритов в роли катализаторов

Как известно, метеориты внутри содержат значительное число органических веществ, многие из которых необходимы для возникновения жизни. Считается, что эти вещества синтезировались в газовой фазе и затем были включены в минералы. Исследование процессов синтеза таких пребиотических соединений позволяют приблизиться к ответу на вопрос «Как могли возникнуть такие сложные структуры на метеоритах?». Эти соединения, попав на Землю, могли дать начало жизни на Земле. Если переход «от неживого к живому», пока что, оставляет много вопросов, то начальные стадии этого процесса можно воспроизводить экспериментально.

Одним из таких «начальных материалов» мог выступать формамид (ФА). Формамид (HCONH_2) – одно из простейших химических соединений, широко распространенных как в межзвездной, так и межпланетной средах. В секторе астробиологии совместно с коллегами из университета Тушии (г. Витербо, Италия) было установлено, что из ФА могут формироваться более сложные органические молекулы: аминокислоты, карбоновые кислоты, сахара, нуклеиновые основания и даже нуклеозиды.

Для такого богатого синтеза необходимо облучить смесь из ФА и метеоритного вещества ионизирующим излучением. После облучения использовался метод ГХ/МС для идентификации органических веществ в сложной смеси.

Таким образом, изучение воздействия различных видов радиации на ФА в комплексе с метеоритами может позволить решить фундаментальный вопрос, связанный с образованием пребиотических соединений, которые в свою очередь лежат в основе формирования первых живых систем. Данное направление исследований является новаторским, т.к. современные исследования синтеза органических соединений из формамида, в основном, сводятся к использованию температурных факторов или УФ-излучения, и результаты исследований ограничиваются синтезом более простых соединений, чем получено в секторе астробиологии.

3. Биогеохимические исследования космической пыли.

Исследования космической пыли (КП) позволяют получить данные о закономерностях временного распределения выпадающего на поверхность Земли космического пылевого вещества, что является важным для реконструкции геологической истории Земли и получения данных о палеоклимате. Изучение структуры, химического, изотопного состава и биологических свойств космической пыли позволяет продвинуться в решении таких фундаментальных проблем, как природа межпланетного вещества и его роль в происхождении жизни. Поэтому особый интерес представляет обнаружение органических веществ в составе КП. Изучение физико-химических свойств частиц КП и их сравнение с аналогичными характеристиками астероидов и ядер комет, определяемых дистанционными методами, позволяет получить ценную информацию о происхождении и эволюции не только этих небесных тел, но и Солнечной системы в целом.

Космическая пыль образуется главным образом в процессе распада периодических комет, а также при дроблении астероидов. В межпланетной среде присутствуют также частицы межзвездной пыли. Вероятно, они попадают в Солнечную систему вследствие аккреции при ее прохождении через межзвездные газопылевые облака. При рассеянии света на частицах межпланетной пыли возникают такие оптические явления, как зодиакальный свет, фраунгоферова составляющая солнечной короны, зодиакальная полоса, противосияние.

Особый интерес представляет космическая пыль, выпадающая на поверхность Земли. Она обнаруживается в глубоководных морских и океанических отложениях, в ледовом и снежном покрове Арктики и Антарктики, в снежном покрове горных вершин, в толще земных пород и других природных планшетах. Космическая пыль является важным источником вещества и энергии, постоянно поступающих на Землю из космического пространства и активно влияющих на геохимические и геофизические процессы Земли, а также оказывающих воздействие на биологические объекты, в том числе на человека.

Исследования космической пыли проводится в соответствии с «Программой исследования КП» Научного совета по Астробиологии при Президиуме РАН с участием кооперации научных учреждений.

В рамках Проекта проведены исследования морфологии и размеров частиц, определен их элементный, изотопный и минералогический состав. Особое внимание было уделено исследованию органики. Важнейшей задачей являлось выделение космогенной составляющей из собранных образцов. За прошедший отчетный период в секторе астробиологии была проделана работа по созданию центра сбора, хранения и распределения образцов, интересных для астробиологических исследований: метеориты, космическая пыль (КП), почва, лед и снег со следами КП и т.д. Готовы в необходимом количестве стеллажи, стерильные и нестерильные контейнеры и т.д. Для целей систематизации информации о поступаемых в сектор образцах, а также контроля над их хранением в секторе разработана электронная база данных. Данная база построена на основе системы управления MySQL и является веб-ориентированной, что обеспечивает широкие информационные возможности и удобство эксплуатации для ее пользователей. В настоящий момент сектор готов принимать образцы, складировать их и хранить в заданных внешних условиях (в настоящий момент доступна холодильная и морозильная камера объемом более 200 литров) для проведения дальнейших исследований.

Данная программа предусматривает следующие направления исследований:

– Сбор образцов КП в различных природных планшетах (снега и ледники Антарктики и Арктики, снега и ледники высокогорных вершин, мох сфагнум, толща земных пород, донные отложения, верхняя атмосфера, околоземное и межпланетное пространство);

– Выделение (обогащение) космической составляющей из собранных образцов пыли;

– Комплексное исследование космической составляющей пыли:

- исследование минералогического, химического и элементного состава КП,
- исследование изотопного состава элементов, референтных для КП,
- поиск биомаркеров, включая блоки и, возможно, целые молекулы наследственной информации типа нуклеиновых кислот, а, также, живых микроорганизмов в КП,
- оценка общего количества КП, выпадающей на поверхность Земли,
- пространственное распределение КП по поверхности Земли, исследование временных вариаций, изучение вариаций состава КП в геологической истории Земли,

- сравнительный анализ ископаемой и «современной» КП, используя межпланетную пыль, собранную космическими аппаратами, в качестве референтных образцов (не загрязненных земной пылью);
- влияние КП на палеоклимат Земли,
- влияние КП на биологические объекты, включая микрофлору (плодородие почв).

Важнейшей задачей является выделение космогенной составляющей из собранных образцов. В связи с этим в секторе астробиологии ЛРБ ОИЯИ планируется создание *единого центра* сбора, хранения, распределения и изучения образцов КП (в том числе методами ядерной физики), подготовки проб КП для проведения различного рода анализов. Особое место будет занимать создание и поддержание *банка данных* (сбор, хранение и распространение информации) по КП. Необходимо обеспечить хранение собранных образцов при отрицательной температуре и возможность проведения пробоподготовки в условиях чистых помещений.

В рамках заявляемого Проекта по направлению «*Биогеохимические исследования космической пыли*» планируется:

- 1) сбор КП в снежно-ледовом покрове Центральной Восточной Антарктиды;
- 2) обработка и плавление снега/льда в условиях чистых помещений;
- 3) концентрирование микрочастиц пыли в условиях чистых помещений;
- 4) определение концентрации микрочастиц пыли и их распределения по размеру (счетчик частиц Beckman Coulter) в условиях чистых помещений;
- 5) приготовление образцов микрочастиц пыли в условиях чистых помещений для различного рода анализов на уровне отдельных частиц (морфология, элементный и минералогический состав, возможно изотопный состав ряда элементов, а в будущем изучение органической компоненты) с использованием в основном электронных микроскопов и зондовых приставок коллабораторов;
- 6) разработка и изготовление аэрогеля и установка ловушки с аэрогелем для улавливания частиц КП на космическом аппарате «Фотон-М».

4. Изучение космического вещества методами ядерной физики.

Открытие данной темы в ОИЯИ позволило использовать методы ядерной физики для исследования космического вещества. Они включают:

- определение элементного состава космической пыли и других материалов внеземного происхождения с использованием многоэлементного нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2;
- определение тяжелых изотопов с помощью нейтронного спектрографа ИРЕН;
- определение структуры объектов методами рентгеновской и нейтронной томографии.

В секторе НАА ОИЯИ накоплен многолетний опыт исследования микрочастиц промышленного происхождения с помощью мха сфагнум. Особенность этого мха, покрывающего обширные территории Евразии, состоит в том, что он получает питание *только* из атмосферы. Соответственно, обнаруживаемые в нем микрочастицы имеют атмосферное происхождение. Более 15 лет сектор НАА ЛНФ ОИЯИ участвует с международной программой «Heavy Metal Atmospheric Deposition in Europe – estimations based on moss analysis» («Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе – оценки на основе анализа мхов-биомониторов»), и передает результаты анализ мхов, собранных на территории Центральной России, Урала, Болгарии, Румынии, Польши, Словакии, Хорватии, Албании, Сербии, Македонии и ряда других стран в Европейский Атлас атмосферных выпадения тяжелых металлов, издаваемый каждые пять лет Экономической комиссией ООН по воздуху Европы.

Мох сфагнум может использоваться также как накопитель космической пыли. В отличие от экологической программы, в рамках которой сбор образцов осуществляется вблизи промышленных центров, для исследования космической пыли сбор образцов должен производиться в районах удаленных от промышленных центров. Методика сбора образцов, позволяющая получить временной разрез, разработана сибирскими учеными и успешно использовалась ими, в том числе при исследовании Тунгусского феномена. При исследовании космической пыли этим методом может использоваться коллаборация, участвующая в экологической программе.

В рамках данного направления, проводятся следующие исследования:

- 1) сбор образцов, содержащих КП в Западной Сибири, на Алтае и в донных отложениях Атлантического океана;
- 2) проведение многоэлементного НАА торфяных колонок Сибири и магнитных частиц с ледника Актру (Северо-Чуйский хребет в юго-восточной части Республики Алтай, на территории Кош-Агачского района) на реакторе ИБР-2 и в Аналитическом центре ГИН РАН;

- 3) визуализация частиц КП с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгеновский энергодисперсионный анализ частиц (EDAX);
- 4) НАА анализ и радиометрия донных отложений в ЛНФ и университете Бухарест (Румыния);
- 5) Проведение изотопного анализа образцов с ледника Ак-Тру на установке ИРЭН;
- 6) Определение структурных особенностей частиц КП с помощью методов, применяемых в анализе конденсированных сред.

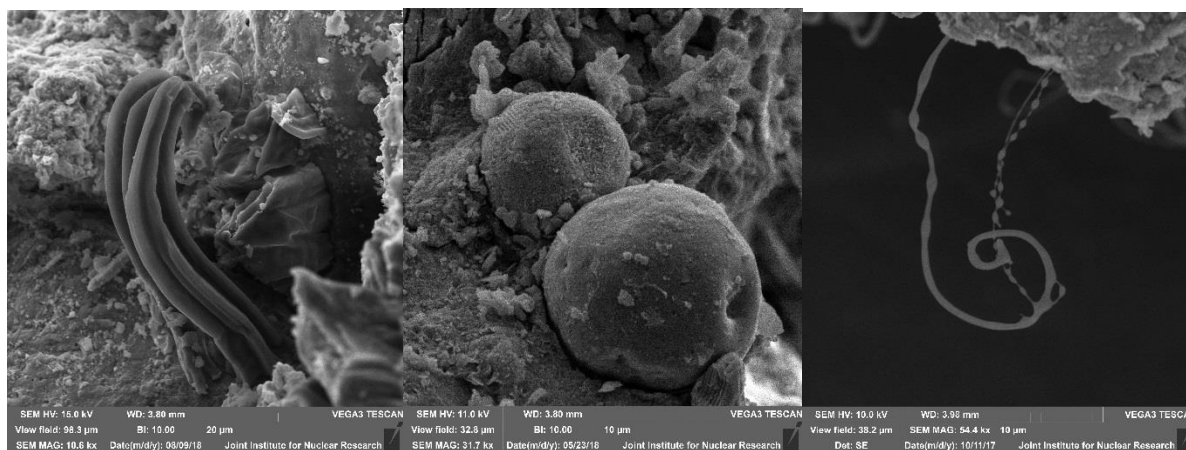
Полученные результаты за период (2016-2019 гг.)

1. *По направлению «Исследование микрофоссилий и органических соединений в метеоритах и в древних земных породах»:*

В секторе астробиологии ЛРБ ОИЯИ при помощи электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 изучено более 20 образцов метеоритов (в первую очередь углистых хондритов Оргей и Мурчисон) и земных горных пород. Получено и проанализировано несколько сотен изображений ископаемых микроорганизмов (рис. 1): цианобактерий, актиномицет, прازیнофитов, раковинных амёб, альвеолят и т.д. Часть результатов исследований были представлены на рабочем совещании «Современные проблемы космической радиобиологии и астробиологии» (17-19 октября 2018 г., Дубна) Р.Хувером [1]. Впервые были обнаружены пеннатные диатомеи (рис. 2) в метеорите Оргей [2].

Микропалеонтологическое изучение раннедокембрийских пород проводилось на базе Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН. Все бактериально-палеонтологические исследования проводились на электронном сканирующем микроскопе CamScan-4 с микроанализатором Link-860, на сканирующем электронном микроскопе системы Zeiss EVO 50 с рентгеновским микроанализатором Inca Oxford (350) и TESCAN VEGA II ZMU фирмы “TESCAN” с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450. Исследовались только свежие сколы пород (как древних, так и современных), иногда слегка протравленные кислотами. Следует отметить, что во всех случаях речь идет о фоссилизированных микроорганизмах (псевдоморфозах), а не о собственно микроорганизмах.

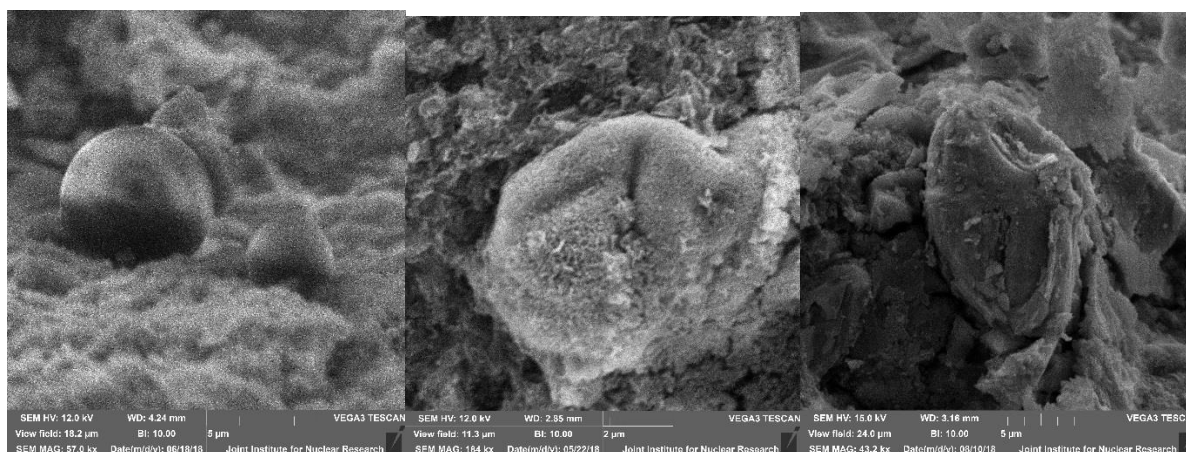
Продолжены исследования древнейших кор выветривания (рис. 3), архейских и раннепротерозойских железистых кварцитов Карелии, Кольского п-ова и КМА [3,4,5,6]; получены новые данные по биогенному происхождению минералов; рассмотрена роль



а

б

в



г

д

е

Рис. 1. Микрофоссилии из метеоритов Оргей (а – д) и Мурчисон (е): а – цианобактериальная нить; б – клетки прازیнофитов (видны поры); в – нити актиномицет; г – раковинные амебы; д – пылеподобная форма; е – альвеолята

жизни в концентрации полезных ископаемых на Земле; изучались вопросы, касающиеся заселения микроорганизмами лавовых потоков [7], а также колонизация суши [8,9].

М..М. Астафьевой в коллективной монографии «Жизнь и Вселенная» приведены результаты микропалеонтологического изучения нижнепротерозойских пиллоу-лав Карелии и Южной Африки. В них найдены разнообразные псевдоморфозы по биогенным объектам. Сделан вывод о том, что колонизация Земли организмами могла начаться после остывания земной коры до 113°C, по другим данным – уже при 120 -130°C; заселение происходило вдоль трещин и поверхностей; воде принадлежала роль барьера для жесткого УФ-излучения.

В раннепротерозойских железистых кварцитах Курской магнитной аномалии (Лебединский рудник, лимонит-мартитовые руды и полосчатые железистые кварциты Коробковского месторождения) были обнаружены фоссилизированные цианобактерии,

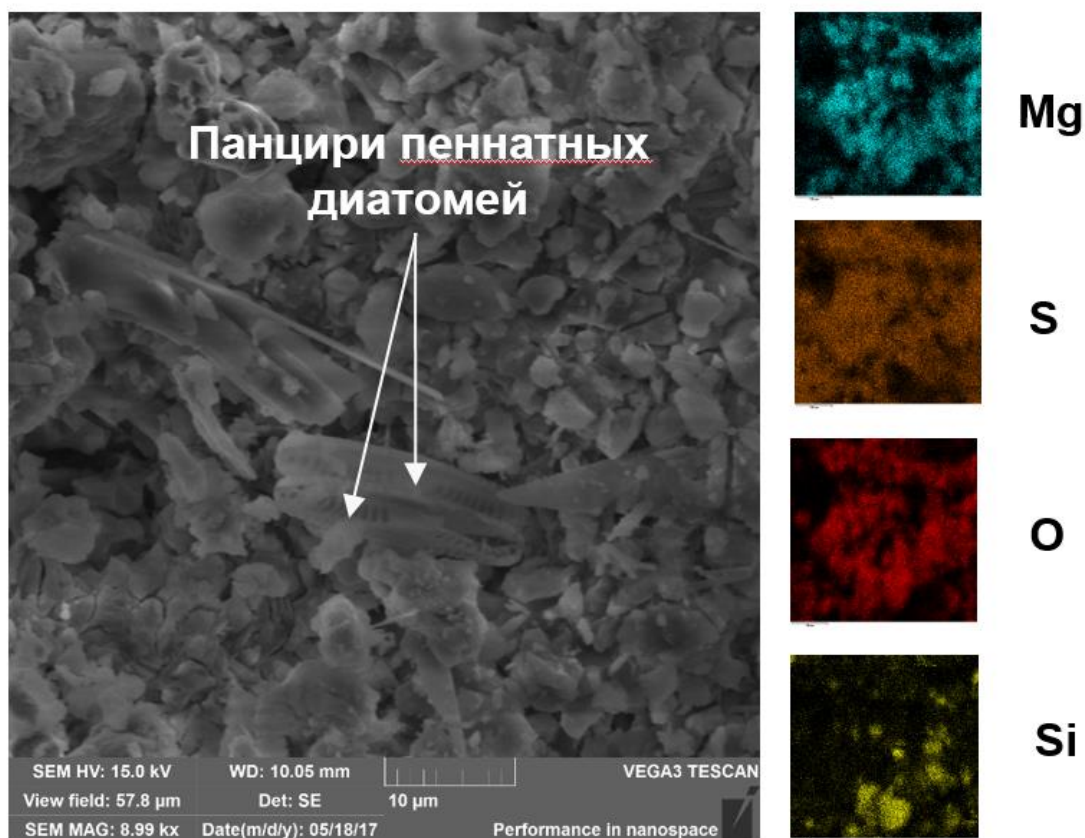


Рис. 2. Пеннатные диатомей в метеорите Оргей и ЭДС-карты распределения элементов представленные трихомами, объединенными единым чехлом [3]. Захоронены ископаемые *in situ*. Морфологически они близки современным представителям рода *Microcoleus*.

В полосчатых железистых кварцитах возрастом 2.7-2.8 млрд. лет (AR) из месторождений Карелии и Кольского п-ова обнаружены микрофоссилии предположительно бактериального происхождения [6]. На основании результатов определений содержания органического углерода и балансовых расчетов установлено, что формирование исследованных железистых кварцитов архея происходило в среде, обогащенной органическим веществом. Сравнительный анализ морфологии современных и неоархейских микроорганизмов позволяет предположить бактериальное происхождение некоторого количества магнетита в изученных кварцитах.

Результаты исследования микрофоссилий свидетельствуют о том, что в образовании осадочных раннепротерозойских железистых кварцитов КМА значительную роль играл биогенный фактор. Это было подтверждено нахождением в образцах ископаемых цианобактерий и обильного гликокаликса. Из этого следует, что осаждение железистых кварцитов осадочного типа происходило в условиях фотической зоны, т. е. на мелководье, и содержание O_2 в атмосфере было довольно значительным.

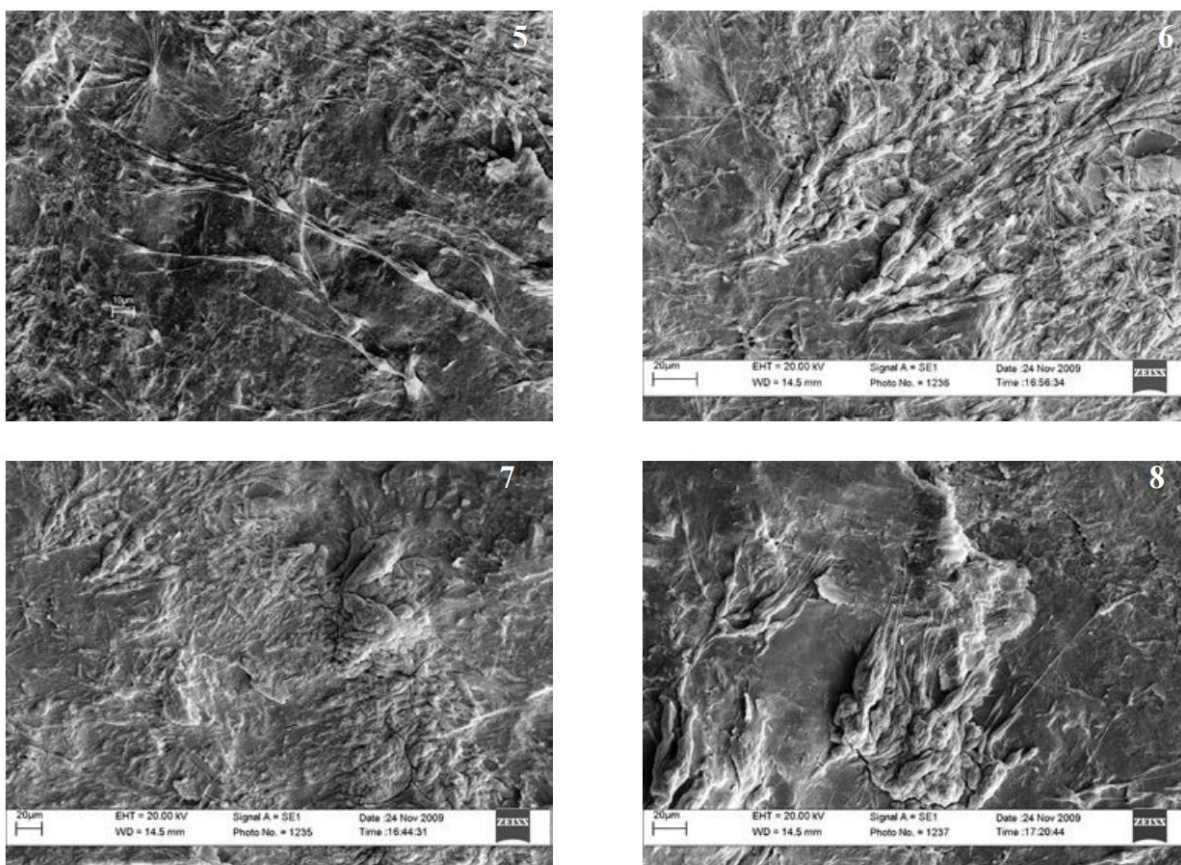


Рис. 3. 5–8. Высокоорганизованные фоссилизированные водорослевидные формы *Gazavazinia antiqua* Rozanov et Astafieva, 2013 (Имандра-Варзуга, PR₁, 2.45 млрд. лет): 5–7 – видны обильно разветвленные главные стволы (диаметр около 10 μm) и разветвленные боковые ветви (диаметр около 5 μm); 8 – уплощенные округло-овальные основания, или нащепки (размер превышает 50 μm), посредством которых водоросли прикреплялись к субстрату.

В раннедокембрийских кейвских парасланцах Кольского п-ова были обнаружены нанобактерии, захороненные *in situ*. Предполагается, что присутствие нанобактерий свидетельствует об участии биологического фактора в формировании вмещающих пород, наличие биопленок и нанобактерий также предполагает условия внешней среды неблагоприятные для жизни бактерий.

В рамках сотрудничества с Палеонтологическим институтом имени А. А. Борисяка РАН, старшим научным сотрудником этого института М.М. Астафьевой и др. проведен ряд бактериально-палеонтологических исследований докембрийских горных пород [10,11,12]. В частности:

- 1) В раннедокембрийских кейвских парасланцах Кольского п-ова были обнаружены нанобактерии, захороненные *in situ*. Предполагается, что присутствие нанобактерий свидетельствует об участии биологического фактора в формировании вмещающих пород.

- 2) Изучены вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы (раннепротерозойские пиллоу-лавы Карелии и Южной Африки), в которых обнаружены разнообразные фоссилизированные бактерии и даже, возможно, эвкариоты. Показано, что условия для развития жизни и колонизации остывающих лавовых потоков и вулканогенных пород в столь раннее время были благоприятными.

Академиком А.Ю. Розановым [13] проведен анализ исследований последних двух десятилетий, связанных с астробиологической тематикой, на основе которого:

- 1) высказано предположение о присутствии остатков эукариотических водорослей в нижнеархейских породах формации Исуа;
- 2) поставлен под сомнение бескислородный характер архейско-раннепротерозойской атмосферы;
- 3) сделан вывод о том, что вода на Земле в существенных количествах появилась только около 4 млрд. лет назад;
- 4) время возможного возникновения РНК-мира расширено до 7 млрд. лет назад.

На примере изучения эволюции археоциат показана важность эволюционных идей Н.И. Вавилова, Л.С. Берга, Д.Н. Соболева и др., поставлена под сомнение творческая роль естественного отбора.

2. По направлению «Исследования синтеза сложных пребиотических соединений из формамида при действии радиации с участием метеоритов в роли катализаторов»:

В 2016 году были продолжены исследования синтеза пребиотических соединений из формамида под действием радиации с использованием метеоритов в качестве катализаторов процесса. Опубликованы материалы по облучению атомами бора [14]. Проведено повторное облучение смеси формамида с различными образцами метеоритов ускоренными протонами с энергией 170 МэВ. Использован альтернативный способ анализа образцов - рамановская спектроскопия. В эксперименте исследовалось 18 образцов метеоритного вещества и земных минералов (метеориты: Campo del Sielo, Canyon Diablo, Sikhote-Alin, Seymchan, NWA4482, NWA2828, Gold Basin, Dhofar959, NWA1465, NWA5357, Al Haggounia, Chelyabinsk, минералы: ковеллин (CuS), халькопирит (CuFeS₂), монтмориллонит (KSF), монтмориллонит KP-30, пилларированный алюминием монтмориллонит) в смеси с формамидом. Данная работа проведена в коллаборации с коллегами из лаборатории биофотоники Института электроники Болгарской академии наук. Исследование проводилось при помощи рамановского микроскопа inVia Qontor фирмы Renishaw на базе факультета Нано- и биомедицинских технологий Национального исследовательского Саратовского государственного университета им. Н.Г.

Чернышевского. Предварительные результаты свидетельствуют о присутствии в реакционной смеси нуклеиновых оснований и нуклеозидов (табл. 1).

Табл. 1. Результаты облучения смеси «формамид+метеорит/минерал», полученные с помощью рамановской спектроскопии: перечень обнаруженных нуклеиновых оснований и нуклеозидов.

Uracil	Cytosin	Hypoxanthine	Adenine	Guanine
4,6-DHP	Mannose	2,6-Diaminopurine	Orotic acid	Isocytosine
Thymine	Yhimidine	2'-Deoxyribose	Ribose	Adenosine
Glucose	Galactose	3(OH)pyridine	Uridine	Cytidine

Проведены эксперименты по синтезу нуклеозидов, компонентов ДНК и РНК, при облучении смеси «нуклеиновое основание + сахар» ускоренными протонами с энергией 170 МэВ. В качестве сахаров использовалась рибоза и 2-дезоксирибоза. Проведено облучение смеси «нуклеозид + фосфатная группа» аналогичным излучением для установления возможного синтеза нуклеотидов, которые служат основой для построения ДНК и РНК. Анализ результатов проводится в г. Витербо, Италия. По предварительным результатам можно с точностью сказать, что при облучении смеси «аденин + дезоксирибоза» (рис. 4), помимо других молекул, был получен дезокси- аденозин и полирибозилированный аденозин (рис. 5).

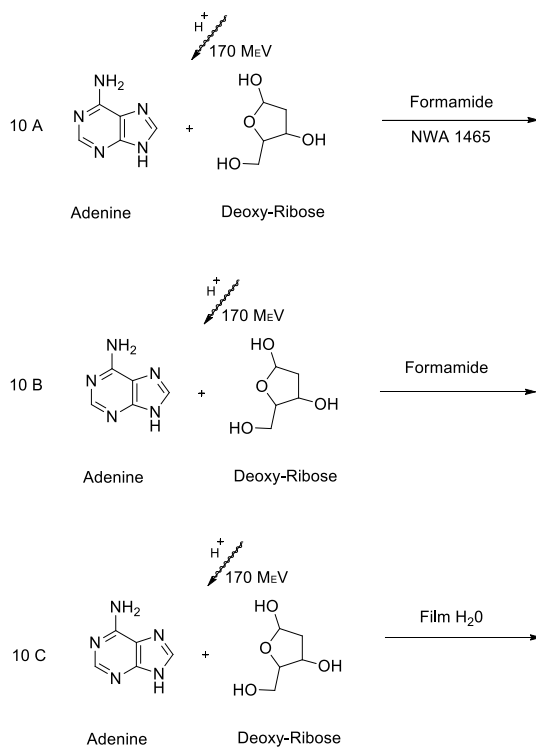


Рис 4. Схема реакций облучения смеси аденина с дезоксирибозой

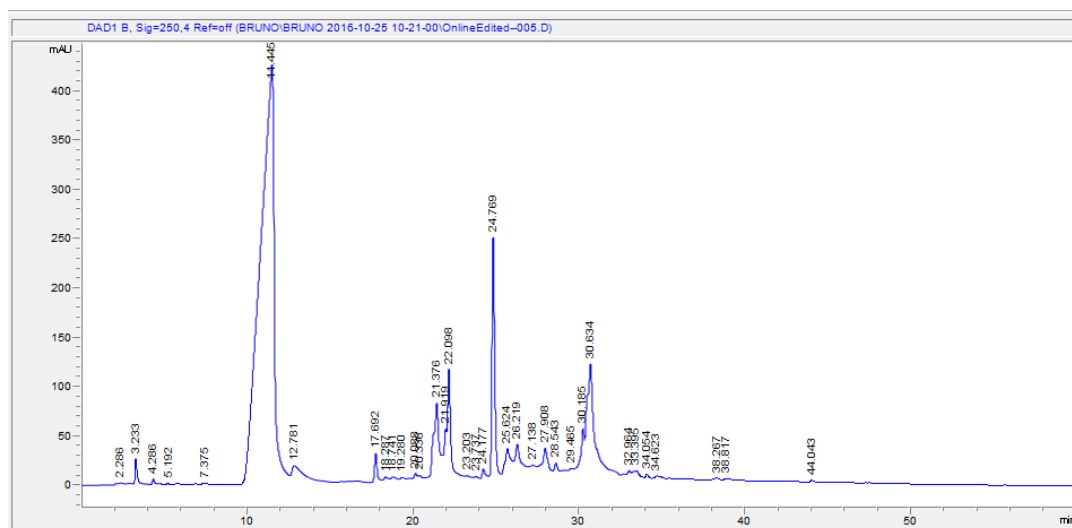


Рис. 5. Масс-спектр, полученный с помощью жидкостной хроматографии при высоком давлении (HPLC), для облученной смеси «аденин+дезоксирибоза+формаид+NWA 1465».

Образование нуклеозидов в абиотических условиях является основным препятствием в исследованиях происхождения жизни. В 2017 году были проведены эксперименты по формированию нуклеозидов, составляющих РНК и ДНК, с использованием ионизирующего излучения, формамида (FA) и одного из метеоритов, используемых в ранних исследованиях. Метеорит типа хондрит (NWA 1465) использовался в качестве катализатора синтеза. Был определен путь общей реакции, приводящей к синтезу рибо- и 2'-дезоксирибонуклеозидов из сахаров и пуриновых нуклеотидов при облучении протонами 170 МэВ в присутствии NWA 1465. Эти условия имитируют предполагаемые условия в космосе или на ранней Земле. Реакция не требует ни предварительно активированных молекул-предшественников, ни каких-либо промежуточных этапов. Синтез основан на определенном радикальном механизме и характеризуется процессами стереоселективности, региоселективности и (поли) гликозилирования. Выход продуктов реакции значительно выше в присутствии формамида и метеорита относительно контроля (табл. 2). Результаты исследования были опубликованы в журнале Nature - Scientific reports [15].

В 2018 году был проведен ряд экспериментов по абиотическому фосфорилированию нуклеозидов. Этот вопрос является серьезным препятствием в изучении процесса формирования первых живых организмов. Был определен оптимальный путь синтеза аденозиновых нуклеотидов из аденозина ($C_{10}H_{13}N_5O_4$) и дигидрофосфата натрия (NaH_2PO_4) в радиационных условиях (протоны 170 МэВ) с использованием метеорита, углистого хондрита NWA 2828, в роли катализатора процесса. В результате в реакционной смеси, помимо искомого нуклеозида, были получены его производные:

Табл. 2. Реакция аденина с рибозой.

№	Условия	Аденин ^a (%)	Выход продуктов реакции (%) ^c		
			α -pA	β -fA	α -fA (10) + β -pA
1	Сухое состояние ^b	75	7.3	2.9	14.8
2	FA	63	10.4	5.6	21.2
3	FA/NWA1465	52	6.1	20.1	16.9

FA = NH₂CHO. Метеорит = NWA 1465. Реакция обеспечивает формирование фуранозидов (f) и пиранозидов (p) в качестве α - и β -изомеров. α -fA = α -D-рибофуранозил-аденин; β -fA = β -D-рибофуранозил-аденин; α -pA = α -D-рибопиранозил аденин; β -pA = β -D-рибопиранозил-аденин. ^aНепрореагировавший аденин. ^bПолучен при растворении рибозы в дистиллированной воде с последующей сушкой. ^cВыход был рассчитан как процент (%) нуклеозида (ммоль) по отношению к исходному аденину. Данные представляют собой средние значения трех экспериментов со стандартным отклонением, равным или меньшим 0,1%.

аденозин-полифосфаты и неорганические полифосфаты, что подчеркивает высокую реакционную способность системы. Данные эксперименты в некоторой степени имитируют условия в космосе или на ранней Земле, когда протоны солнечного ветра проникали не только сквозь межпланетное пространство, но и достигали поверхности Земли. Таким образом, проведенные эксперименты позволяют моделировать сценарий пребиотического фосфорилирования.

Фосфорилирование аденозина **1** проводили в четырех различных условиях эксперимента (см. описание к рис. 6). Во всех четырёх реакционных смесях наблюдалось образование алициклических и циклических аденозиновых нуклеотидов: 5'-аденозинмонофосфат (5'-AMP) **2**, 3'-аденозинмонофосфат (3'-AMP) **3**, 2'-аденозинмонофосфат (2'-AMP) **4** и 2',3'-циклоаденозинмонофосфат (2',3'-сAMP) **5**. В дополнение к перечисленному установлен значительных выход аденина, образовавшегося вследствие частичного разрыва β -гликозидной связи (рис. 6). Кроме того, 3', 5'-циклоаденозинмонофосфат (3', 5'-сAMP) **6** и 5'-аденозиндифосфат (5'-ADP) **7** были получены в ходе реакций В, и В,D соответственно (рис.6). В результате экспериментов было установлено, что общий выход аденозиновых нуклеотидов значительно увеличивался, если в реакционную смесь присутствовали формамид (NH₂CHO) и метеорит. Результаты проведенных исследований находятся в печати в журнале Chemistry - A European Journal, 2019 г.

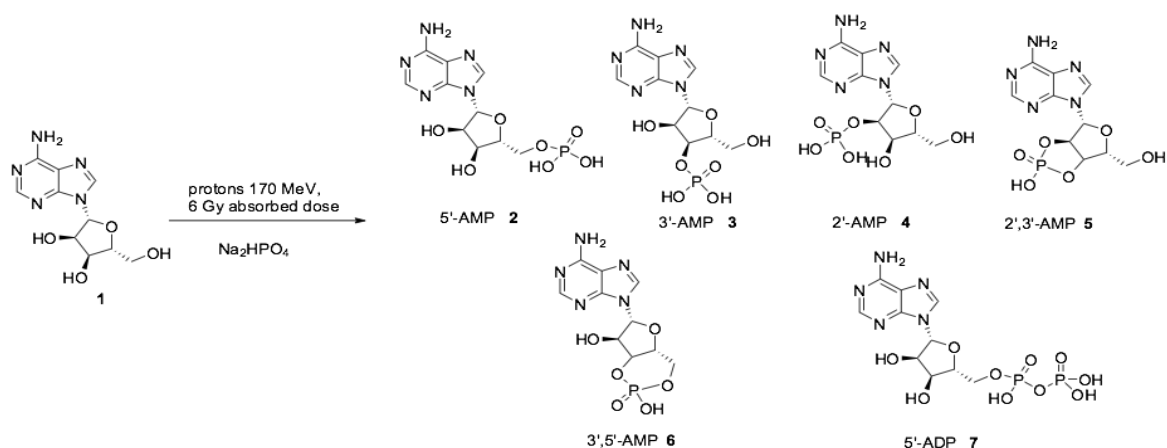


Рис. 6. Аденозиновые нуклеотиды 2-7, полученные при облучении аденозина 1 и NaH_2PO_4 высокоэнергетическим протонным пучком (170 МэВ) в четырех условиях эксперимента: А) сухая порошковая смесь аденозина и NaH_2PO_4 ; В) сухая порошковая смесь аденозина, NaH_2PO_4 и NWA 2828; С) аденозин и NaH_2PO_4 в жидком растворе NH_2CHO ; и D) порошок аденозина, NaH_2PO_4 и NWA 2828 в жидком растворе NH_2CHO

3. По направлению «биогеохимические исследования космической пыли»:

Были проведены исследования космической пыли в образцах мхов, собранных в США, Грузии, Беларуси и России [16,17]. Изучение образцов мхов, проведенное при помощи сканирующего электронного микроскопа с рентгеновским энергодисперсионным микроанализатором, а также нейтронно-активационного анализа, показало наличие обломочных, антропогенных частиц и частиц космической пыли. Чаще всего последние состоят из Fe, Fe-Ni, и Fe-Cr минералов.

Антарктический лед содержит значительно меньшее количество земной пыли (по сравнению с Арктикой) и не содержит техногенных частиц. Проведен ряд исследований [18,19]. по поиску частиц космической пыли во льдах Антарктиды. Были найдены железокаменные микрометеориты. Углистых хондритов обнаружено не было.

4. По направлению «изучение космического вещества методами ядерной физики»

Фронтасевой М.В. и др. (ЛНФ ОИЯИ) проведен нейтронно-активационный анализ частиц космической пыли на реакторе ИБР-2. Материал для исследований отобран в США, Грузии, Беларуси и России.

Большинство частиц подвергаются плавлению при прохождении через атмосферу. Чаще всего, особенно это характерно для частиц крупных размеров, наблюдались космические сферулы. Эти сферические частицы относительно легко идентифицировать. Они являются фоновым магнитным компонентом космической пыли. Наиболее часто обнаруживаемыми природными минералами являются Fe, Fe-Ni и Fe-Cr.

В рамках организационных работ:

1. Создана химическая комната для проведения экспериментов.
2. Создан атлас микрофоссилий в метеорите «Оргей».
3. Осуществлена верстка учебника для курса лекций по астробиологии в Университете «Дубна».

Ожидаемые результаты за 3-х летний период (2020-2022 гг.)

Согласно данному проекту, будут продолжены исследования по всем вышеуказанным направлениям. Продолжен подсчет общего количества космического вещества, выпадающего на всю поверхность Земли (тонн в год); получены данные о динамике выпадения КП на большой территории.

Будут определены параметры частиц: морфология, структура, распределение по размерам, элементный, изотопный и минералогический состав частиц и изменение этих характеристик со временем в различных планшетах на различных временных интервалах.

Данные исследования позволят ответить на следующие основные вопросы: сколько КП выпадает на Землю; ее элементный и изотопный составы; присутствие органической компоненты и какой именно.

В рамках данного направления будут проводиться следующие исследования:

- 1) Отбор и соответствующая подготовка образцов метеоритов и земных горных пород.
- 2) Продолжение исследования образцов метеоритов и земных пород на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega 3 с рентгеновским микроанализатором .
- 3) Подготовка иллюстрированных атласов микрофоссилий в углистых хондритах.

Из оборудования учреждений, входящих в коллаборацию, будут использоваться электронные сканирующие микроскопы TESCAN VEGA II ZMU фирмы “TESCAN” с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450, а также системы CamScan с микроанализатором Link-860 и системы Zeiss с микроанализатором Палеонтологического института РАН, микронзонд «Тескан Вега 2» с приставками для волнового и энергодисперсионного анализа, катодолюминесценции Геофизической обсерватории «Борок» филиала ИФЗ РАН, сканирующий электронный микроскоп Аналитического центра ГИН РАН, и приборы ИГЕМ РАН, ИКИ РАН и др.

Литература

1. Hoover R.B., Rozanov A. Yu., Kapralov M.I., Ryumin A.K. 2018. Paradigms lost: comets, asteroids meteorites and life // Современные проблемы космической радиобиологии и астробиологии, Дубна, 17-19 октября 2018 г.
2. Hoover R.B., Rozanov A.Yu., Krasavin E.A., Ryumin A.K., Kapralov M.I. 2018. Diatoms in the Orgueil Meteorite // Paleontological Journal. Vol. 52. No. 13. P.1647–1650.
3. Розанов А.Ю., Астафьева М.М., Зайцева Л.В., Алфимова Н.А., Фелицын С.Б. 2016. Цианобактерии(?) в железистых кварцитах Курской магнитной аномалии // ДАН. Т. 470. № 3. С. 1-3.
4. Астафьева М.М. 2016. Древнейшие коры выветривания и проблема бактериальной колонизации суши // Палеонтология. Стратиграфия. Астробиология. К 80-летию А.Ю. Розанова. Москва, ПИН РАН, С. 31-43.
5. Астафьева М.М. 2016. Новые результаты бактериально-палеонтологических исследований // 100-летие Палеонтологического общества России. Проблемы и перспективы палеонтологических исследований. Материалы LXII сессии Палеонт. о-ва, С.-Пб. С. 17-18.
6. Астафьева М.М. 2016. Первые результаты бактериально-палеонтологического изучения раннедокембрийских железистых кварцитов Карелии и Кольского полуострова // Сборник материалов «Актуальные проблемы радиобиологии и астробиологии. Генетические и эпигенетические эффекты ионизирующих излучений» Дубна, 9-11 ноября 2016 г. С. 91-93.
7. Астафьева М.М. 2016. Ранняя Земля: лавовые потоки и возможность жизни // Коллоквиум "Земля на ранних этапах развития солнечной планетной системы" 28-30 ноября 2016 года, ГАИШ МГУ.
8. Астафьева М.М. 2016. Колонизация суши // 2-ая Всероссийская конференция по астробиологии. Жизнь во Вселенной: физические, химические и биологические аспекты. Пушкино, Россия, 5-9 июня 2016 г. С. 39-40.
9. Астафьева М.М. 2016. Ранняя колонизация суши микроорганизмами // Материалы II Всероссийской палеонтологической конференции «Водоросли в эволюции биосферы». С. 19 – 22.

10. Астафьева М.М. 2018. Древнейшие (AR-PR1) микрофоссилии: методы исследования // Сборник «Современная микропалеонтология – проблемы и перспективы». Труды XVII Всероссийского микропалеонтологического совещания. Казань (в печати).
11. Астафьева М.М., Балаганский В.В. 2018. Кейвские парасланцы (архей - ранний протерозой), нанобактерии и жизнь // Стратиграфия. Геологическая корреляция. Т. 26. № 3. С. 117-126. DOI: 10.7868/S0869592X18030080
12. Astafieva M.M. 2018. Life in Ancient Cooling Lava // *Paleontological Journal*. V. 52. № 10. P. 45–61.
13. Розанов А.Ю. 2017. История Земли – история жизни // Жизнь и Вселенная. Коллективная монография. Под ред. В.Н. Обридко и М.В. Рагульской. М.: Изд-во ВВМ. с. 245 – 252.
14. Saladino R., Carota E., Botta G., Kapralov M. I., Timoshenko G. N., Rozanov A. Yu., Krasavin E.A., Di Mauro E., «First Evidence on the Role of Heavy Ion Irradiation of Meteorites and Formamide in the Origin of Biomolecules», *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, pp 1–7, 2016.
15. Saladino R., Bizzarri B. M., Botta L., Šponer J., Šponer J. E., Georgelin T., Jaber M., Rigaud B., Kapralov M., Timoshenko G.N., Rozanov A. Yu., Krasavin E.A., Timperio A., Di Mauro E., Proton irradiation: a key to the challenge of N-glycosidic bond formation in a prebiotic context, *Scientific Reports* 7, Article number: 14709(2017) doi:10.1038/s41598-017-15392-8
16. Shetekauri S., Chaligava O., Shetekauri T., Kvlividze A., Kalabegishvili T., Kirkesali E., Frontasyeva M.V., Chepurchenko O.E., Tselmovich V.A. 2018. Biomonitoring air pollution using moss in Georgia. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(5) 2259-2266.
17. Frontasyeva M. V., Tselmovich V. A., Steinnes E. 2018. Atmospheric Deposition of Cosmic Dust Studied by Moss Analysis // *LPI Contributions*. 2067. P.37-45.
18. Булат С. А., Ежов В. Ф., Цельмович В. А. 2018. Первое обнаружение железоникелевых микрометеоритов в приснежном покрове Центральной Восточной Антарктиды, станция Восток / Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Девятнадцатая международная конференция. Москва, 24-26, Борок, 28 сентября 2018 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. С. 45-48.

19. Bulat, S. A., Bulat, E. S., Grokhovsky, V. I., Muftakhetdinova, R. F., Kolunin, R. N., Tselmovich, V. A., Sekatski S.K., Smirnov A.A., Ekaykin A.A., Petit, J. R. 2018. Search for Antarctic Micrometeorites in Blue Ice Field, Lomonosov Mountains, Voltat Massive, Queen Maud Land, East Antarctica // LPI Contributions, 2067.

Оценка стоимости

Для улучшения лабораторной базы сектора астробиологии ЛРБ ОИЯИ, сбора и анализа образцов космического и земного вещества в течение 3 лет потребуется 130 тысяч долларов США. Стоимость включает создание и оборудование блока чистых и холодных помещений, стоимость лабораторных приборов и расходных материалов.

По годам в тыс. долларов США.

№ года	1-й	2-й	3-й
Год	2020	2021	2022
Оборудование	40	30	30
Расходные материалы	5	5	5
Оплата НИР по договорам	-	-	-
Командировочные расходы	5	5	5
Итого	50	40	40

ПЛАН РАБОТ

2020: Пополнение коллекции метеоритов и земных горных пород. Дооснащение оборудованием химической комнаты для проведения исследований по синтезу сложных пребиотических соединений из формамида. Анализ пребиотических соединений и катализаторов. Проверить каталитическую активность земных пород. Работа над созданием иллюстрированного атласа микрофоссилий в метеорите Мурчисон. Подготовка к эксперименту «Исследование возможности синтеза пребиотических соединений из смеси «формамид+метеоритное вещество» в условиях открытого космоса в полете КА «Бион-М». Обобщение результатов исследования.

2021: Продолжить сбор, пробоподготовку и анализы образцов космической пыли, выявление и изучение микрофоссилий и органического вещества в метеоритах и древнейших породах Земли. Анализ пребиотических соединений и выяснение природы катализаторов. Публикация иллюстрированного атласа микрофоссилий в метеорите Мурчисон.

2022: Изучение экстремофилов, подземной биосферы, кор выветривания, криолитозоны, метеоритного вещества, космической пыли.

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Е.А. Красавин

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

А.Ю. Розанов