

АННОТАЦИЯ к проекту

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

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.

В рамках настоящего проекта предлагается продлить в ОИЯИ тему «Биогеохимическое исследование космического вещества на Земле и в космосе; исследование биологических и геохимических особенностей ранней Земли». По отдельным частям (разделам) темы имелся существенный задел в различных научных учреждениях, однако в таком комплексном виде тема была проведена впервые. Она проводится силами сектора астробиологии ЛРБ ОИЯИ с участием других подразделений ОИЯИ и научных организаций, входящих в коллаборацию. Ряд исследований проводится совместно, при этом часть из них выполняется на установках коллаборантов.

В рамках темы представлены следующие 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 в роли катализаторов
- биогеохимические исследования космической пыли;
- изучение космического вещества методами ядерной физики.

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.

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

Одним из важных направлений исследований сектора является изучение проблемы происхождения пребиотических соединений на Земле. Как известно, метеориты на своей поверхности 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.

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.

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

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 соотношения содержания тяжелых изотопов на импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН;
- определение тяжелых изотопов с помощью нейтронного спектрографа ИРЕН;
- определение структуры объектов методами рентгеновской и нейтронной томографии.

Полученные результаты за предыдущий период

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: цианобактерий, актиномицет, прازیнофитов, раковинных амёб, альвеолят и т.д. Впервые были обнаружены пеннатные диатомеи в метеорите Оргей [1].

Микропалеонтологическое изучение раннедокембрийских пород проводилось на базе Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН. Исследовались только свежие сколы пород (как древних, так и современных), иногда слегка протравленные кислотами. Следует отметить, что во всех случаях речь идет не о фоссилизированных микроорганизмах, о псевдоморфозах, а не о собственно микроорганизмах.

Продолжены исследования древнейших кор выветривания, архейских и раннепротерозойских железистых кварцитов Карелии, Кольского п-ова и КМА [2,3,4,5]; получены новые данные по биогенному происхождению минералов; рассмотрена роль жизни в концентрации полезных ископаемых на Земле; изучались вопросы, касающиеся заселения микроорганизмами лавовых потоков [6], а также колонизация суши [7,8].

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, представленные трихомами, объединенными единым чехлом [2]. Захоронены ископаемые *in situ*. Морфологически они близки современным представителям рода *Microcoleus*.

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 [9,10,11].

Академиком А.Ю. Розановым [12] 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»:

Продолжены исследования синтеза пребиотических соединений из формамида под действием радиации с использованием метеоритов в качестве катализаторов процесса. Опубликованы материалы по облучению атомами бора [13].

Проведены эксперименты по формированию нуклеозидов, составляющих РНК и ДНК, с использованием ионизирующего излучения, формамида (FA) и хондрита (NWA 1465). 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. Выход продуктов реакции значительно выше в присутствии формамида и метеорита относительно контроля. Результаты исследования были опубликованы в журнале Nature - Scientific reports [14].

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 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.

Во всех четырех реакционных смесях наблюдалось образование алициклических и циклических аденозиновых нуклеотидов. В результате экспериментов было установлено, что общий выход аденозиновых нуклеотидов значительно увеличивался, если в реакционную смесь присутствовали формамид (NH_2CHO) и метеорит. Результаты проведенных исследований находятся в печати в журнале *Chemistry - A European Journal*, 2019 г.

3. По направлению «биогеохимические исследования космической пыли»:

Фронтасьевой и др. [15,16] были проведены исследования космической пыли в образцах мхов, собранных в США, Грузии, Беларуси и России. Микроанализ образцов мхов показал 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 [17, 18] по поиску частиц космической пыли во льдах Антарктиды. Были найдены железокремнистые микрометеориты. Углистых хондритов обнаружено не было.

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

Фронтасьевой 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».

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. Астафьева М.М. 2016. Ранняя колонизация суши микроорганизмами // Материалы II Всероссийской палеонтологической конференции «Водоросли в эволюции биосферы». С. 19 – 22.
9. Астафьева М.М. 2018. Древнейшие (AR-PR1) микрофоссилии: методы исследования // Сборник «Современная микропалеонтология – проблемы и перспективы». Труды XVII Всероссийского микропалеонтологического совещания. Казань (в печати).
10. 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
11. Astafieva M.M. 2018. Life in Ancient Cooling Lava // *Paleontological Journal*. V. 52. № 10. P. 45–61.
12. 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.
13. 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.
14. 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
15. 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.
16. Frontasyeva M. V., Tselmovich V. A., Steinnes E. 2018. Atmospheric Deposition of Cosmic Dust Studied by Moss Analysis // *LPI Contributions*. 2067. P.37-45.
17. 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.

18. 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 течении 3 лет потребуется около 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, экспериментальных работ. 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 «формаид+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