РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

РФФИ

ISSN 1605-8070

ВЕСТНИК РФФИ

1 (77) январь-март 2013

ВЕСТНИК РФФИ

№ 1 (77) январь–март 2013 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати,
рег. № 012620 от 03.06.1994 г.

Учредитель
федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главная редакция:

главный редактор В.Я. Панченко,
заместитель главного редактора В.В. Квардаков,
приглашенный редактор Э.М. Галимов

Редакционная коллегия:

В.А. Геловани, Ю.Н. Кульчин, В.П. Матвеенко, Е.И. Моисеев,
А.М. Музафаров, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, В.В. Ярмолюк,
П.П. Пашинин, Е.Н. Черных, В.А. Шахнов

Редакция:

В.И. Елисеев, А.П. Локтев, А.О. Тимофеева

Адрес редакции:

119991, Москва, Ленинский проспект, 32а
Тел.: (495) 952 6053, факс: (495) 952 5541
e-mail: pressa@rfbr.ru

© Российский фонд фундаментальных исследований, 2013.

JOURNAL RFBR

Number 1 (77) January-March 2013

Founded in 1994

Registredin the Joined by the Committee of the Russian Federation for Press,
reg. Number 012620 on 03.06.1994

The Founder
Federal State Budgetary Institution
«Russian Foundation for Basic Research»

Editor-in-Chief V. Panchenko,
Deputy chief editor V. Kvardakov,
Guest Editor E. Galimov

Editorial Board:

V. Gelovani, J. Kul'chin, V. Matvienko, E. Moses
A. Muzafarov, R. Petrov, I. Fedorov, V. Yarmolyuk
P. Pashinin, E. Chernykh, V. Shakhnov

Editorial Office:

V. Eliseev, A. Loktev, S. Timofeeva

Editorial address:

119991, Moscow, Leninsky Prospect, 32a
Tel.: (495) 952 6053, fax: (495) 952 5541
e-mail: pressa@rfbr.ru

© Russian Foundation for Basic Research, 2013.

«Вестник РФФИ»
№ 1 (77), январь–март 2013 г. (Приложение к «Информационному бюллетеню» № 21)

НАУКА В ЛИЦАХ

Галимов Э.М.
К 150-летнему юбилею В.И. Вернадского.....6
Летников Ф.А.
О великом ученом В.И. Вернадском.....8
Мищенко С.В., Майстренко А.В.
Владимир Иванович Вернадский (1863-1945).....10

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК: 150 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В.И. ВЕРНАДСКОГО

О редакторе тематического блока академике Э.М. Галимове.....13
Аннотация к тематическому блоку.....14
Фадеев В.В., Ширшин Е.А., Будылин Г.С., Калмыков С.Н.
Разработка новых методов детектирования урана (VI) и его комплексов в природных водах с использованием лазерной флуориметрии.....15
Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Бабкин Д.И.
Закономерности формирования благороднометалльного оруденения в гидротермальных урановых и редкометалльных месторождениях Центральной Азии.....21
Петров В.А., Устинов С.А., Полуэктов В.В., Прокофьев В.Ю.
Реконструкция путей и условий миграции рудоносных гидротермальных растворов: структурно-геологический и термобарогеохимический подход....27
Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Данилова В.Н., Хушвахтова С.Д., Буряк А.К., Пыцкий И.С., Хабаров В.Б.
Особенности аккумулирования молибдена, вольфрама, меди и рения в биогеохимической пищевой цепи.....34
Урусов В.С.
Нарушения паритета «правого» и «левого», четного и нечетного в живой и неживой природе.....39
Моисеенко Т.И.
Эволюционные процессы в современной биосфере: идеи В.И. Вернадского, реальность и перспективы развития.....54

КОНФЕРЕНЦИИ

Котов А.А., Адамяк Б.Ю.
Юбилейная XV Международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул».....68
Айзенберг Н.И., Зоркальцев В.И
IV Всероссийская конференция «Равновесные модели экономики и энергетики»..72
Маров М.Я., Нефедьев Ю.А., Гусев А.В.
Роботизированное изучение луны, планет и их спутников.....78

«RFBR Journal»
№ 1 (77), January–March 2013 (Supplement to RFBR Information Bulletin No 21)

THE FACES OF SCIENCE

Galimov E.
The 150-th Anniversary of V.I.Vernadsky....6
Letnikov F.
About the Great Scientist V.I.Vernadsky....8
Mischenko S., Maystrenko A.
Vladimir Ivanovich Vernadsky (1863-1945)....10

THEMATIC SECTION: 150 YEARS SINCE THE BIRTH OF V.I. VERNADSKY

About the Editor of the Thematic Section,
the Member of the Russian Academy of Sciences E. Galimov....13

Abstract of the Thematic Section....14
Fadeyev V., Shirshin E., Budylin G., Kalmykov S.
Development of New Methods for Detecting Uranium (VI) and Uranium Complexes in Natural Waters Using Laser Fluorimetry....15
Potseluyev A., Ananyev Yu., Zhitkov V., Babkin D.
Regularities in Formation of Noble Metal Mineralization in Hydrothermal Uranium and Rare Metal Deposits in Central Asia....21
Petrov V., Ustinov S., Poluektov V., Prokofyev V.
Reconstructing Ways and Conditions of Migration of Ore-bearing Hydrothermal Solutions: Geostructural and Thermobarogeochemical Approach...27
Yermakov V., Tyutikov S., Danilova V., Hushvakhtova S., Buryak A., Pytsky I., Khabarov V.
Specifics of the Accumulation of Mo, W, Cu and Re in the Biogeochemical Food Chain....34
Urusov V.
Upsetting Parity of the «Right» and the «Left», Odd and Even in Animate and Nonanimate Nature....39
Moiseenko T.
Evolutionary Processes In Modern Biosphere: V. Vernadsky's Ideas, a Reality and Development Prospects 54

CONFERENCES

Kotov A., Adamyak B.
15th Anniversary Scientific Conference on Physicochemical Processes Accompanying the Selection of Atoms and Molecule....68
Ayzenberg N., Zorkaltsev V.
Economic and Energetic Equilibrium Models....72
Marov M., Nefedyev Yu., Gusev A.
Robotic Exploration of the Moon, the Planets and their Satellites 78

К 150-летнему юбилею В.И. Вернадского

Галимов Э.М.

В этом году мы отмечаем знаменательную дату в научной и культурной жизни страны. 12 марта 2013 г. исполнилось 150 лет со дня рождения Владимира Ивановича Вернадского – крупнейшего ученого, мыслителя, общественного деятеля и организатора науки.

После окончания Санкт-Петербургского университета в 1886 г. В.И. Вернадский преподает минералогию и кристаллографию сначала в Петербургском, а затем в течение последующих двадцати лет, вплоть до 1911 г., в Московском университете. За эти годы В.И. Вернадский становится одним из наиболее авторитетных минералогов своего времени. Он создает фундаментальные труды: «Опыт описательной минералогии», «История минералов земной коры». Вслед за В.М. Севергиным в XVII в., Н.И. Кокшаровым и Е.С. Федоровым в XIX в., В.И. Вернадский завершил в начале XX в. построение превосходной отечественной школы минералогии. За эти работы он еще в 1911 г. был избран академиком. И это одно обеспечило бы ему достойное место в истории науки. Но это оказалось лишь малой долей того, что ему удалось совершить.

Наиболее значительный вклад В.И. Вернадского связан с введенным им в науку представлением о геологической роли живого вещества и созданием учения о биосфере и ноосфере. В.И. Вернадский показал, что при относительно незначительной массе живое вещество определяет процессы планетарных масштабов: возникновение гранитных масс в земной коре, кислородный состав земной атмосферы. Через фотосинтез и производство восстановленного углерода заводится окислительно-восстановительный цикл в земной коре. С этим циклом связаны глобальные процессы рудообразования. Живое вещество преобразует геологическую среду таким образом, что она приобретает свойства, которые она не имела бы в отсутствие жизни. Живое вещество порождает химические процессы, которые идут с необычно высокой скоростью, в необычном направлении. Биосферу великий ученый определял как геологическую оболочку Земли, содержащую живое вещество.

В.И. Вернадский – один из создателей науки геохимии. В 1924 г. он опубликовал классический труд «Очерки геохимии». Если в трудах предшественников и современных ему других основоположников геохимии речь идет скорее о применении химии и химических подходов к исследованию геологической среды, то у В.И. Вернадского, в его обобщении, геохимия – это наука об истории атомов, о процессах и химических превращениях. Здесь сразу выявляется роль факторов, казалось бы, не связанных прямо с составом горных пород. Это, прежде всего, особая роль углерода и живого вещества.

Ознакомившись в свое время с открытием радиоактивности, В.И. Вернадский был чрезвычайно увлечен перспективами использования радиоактивности в качестве источника энергии:

«Перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, какие рисовались человеческому воображению» (29 декабря 1910 г.).

Это было сказано более 100 лет назад, когда физические основания такого прогноза были еще неясны создателям новой физики А. Эйнштейну, Э. Резерфорду и другим.

В.И. Вернадский впервые начал рассматривать геологию Земли в контексте ее истории в качестве планеты Солнечной системы. Он говорил о том, что нельзя рассматривать Землю вне ее связи с космосом. В.И. Вернадский рассматривает в качестве вполне актуальной задачи исследование Луны как геологического тела и хозяйственное освоение Луны. Он придавал большое значение изучению природы Тунгусского метеорита. Поддерживал организацию экспедиций в район падения.

В.И. Вернадский создает учение о ноосфере, рассматривает включение человека в биосферу не просто как конфликт природы и человека, а как новый этап развития биосферы:

«Ноосфера есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней

ГАЛИМОВ Эрик Михайлович,
академик, директор Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.
Eric M.GALIMOV,
Director at the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS,
e-mail: galimov@geokhi.ru.

впервые человек становится крупнейшей геологической силой».

До появления человека эволюция была стихийным процессом. С появлением разума возник новый организующий фактор в биосфере. Концепция ноосферы у Вернадского тесно переплетается с его представлением о научной мысли как планетном явлении. Ноосфера представляется как этап развития биосферы, в котором деятельность человека становится геологической силой. Главной составляющей в развитии ноосферы является расширение знаний. Он пишет в работе «Научная мысль как планетное явление»:

«… главная геологическая сила, творящая ноосферу – это рост научного знания».

«В.И. Вернадский – выдающийся организатор науки. Он создал Украинскую Академию наук. Основал Комиссию по изучению естественных производительных сил России (КЕПС). В течение жизни В.И. Вернадский организовал 26 научных учреждений. В 1928 г. Биогеохимический отдел КЕПС был реорганизован в биогеохимическую лабораторию Академии Наук, директором которой В.И. Вернадский оставался до конца жизни. В 1934 г. лаборатория вместе с другими академическими учреждениями была переведена из Ленинграда в Москву. В 1947 г. на базе этой лаборатории был организован нынешний Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского.

К 150-летнему юбилею В.И. Вернадского Комиссией по разработке научного наследия В.И. Вернадского РАН подготовлено к изданию 24-томное собрание сочинений В.И. Вернадского, в котором помимо его научных работ значительное место занимают статьи, выступления, документы, связанные с общественно-политической деятельностью академика. Эта сторона творчества и деятельности В.И. Вернадского освещалась скупо, может быть, потому что его гражданская позиция ни в какие времена не была удобна власти.

Владимир Иванович глубоко понимал суть науки и механизм научного творчества. Он писал:

«Ученые – те же фантазеры и художники; они не вольны над своими идеями; они могут хорошо работать, долго работать только над тем, к чему лежит их мысль, к чему влечет их чувство. У них идеи сменяются; появляются самые невозможные, часто сумасбродные; они роятся, кружатся, сливаются, переливаются. И среди таких идей они живут и для таких идей они работают, <…> мне ненавистны всякие оковы моей мысли, я не могу и не хочу заставить ее идти по дорожке практически важной, по такой, которая не позволит мне хоть несколько больше понять те вопросы, которые мучат меня…». И еще: «Новые науки, которые постоянно создаются вокруг нас, создаются по своим собственным законам; эти законы не стоят ни в какой связи, ни с нашей волей, ни с нашей логикой. Наоборот, когда мы всматриваемся в процесс зарождения какой-нибудь новой науки, мы видим, что этот процесс не отвечает нашей логике. Ход истории и развития науки, ход выяснения научной истины совершенно не отвечает тому ее ходу, который, казалось бы, должен был бы осуществляться по нашему логическому разумению» (Вернадский В.И. Труды по геохимии. Изд. 1994 г. Лекция 1. Создание новой науки геохимии, 1921 г. С. 8).

В.И. Вернадский был убежден, что задача любой власти – не пытаться управлять наукой по своему разумению, а лишь создавать условия для ее развития.

Владимир Иванович Вернадский был великим ученым. Он создал новые направления в науке: геохимию, учение о живом веществе и биосфере, радиогеологию, он внес огромный вклад в развитие минералогии и кристаллографии. Ему принадлежат оригинальные философские идеи в понимании проблем симметрии, пространства-времени живых организмов, научной мысли как планетного явления. Он создал учение о ноосфере.

В общественно-политической жизни для него главной была абсолютная честность, его возмущали мелочность и некомпетентность властей и при царском режиме и при советской власти. В его высказываниях по этому поводу, к сожалению, много напрашивающихся аналогий и с тем, что мы наблюдаем сегодня.

Как мыслитель В.И. Вернадский был удивительно проницателен. Некоторые его предвидения, например, касавшиеся будущей роли атомной энергии, значения исследования Луны и планет, возникновение проблем экологии, были неожиданными для его современников и только теперь оценены в полной мере.

В.И. Вернадский был великим гуманистом. Несмотря на свой критический ум, а может быть, благодаря ему, его отношение к истории и будущему человечества было глубоко оптимистичным. Его учение о ноосфере проникнуто верой в торжество разума.

О великом ученом В.И. Вернадском

Летников Ф.А.

Выдающийся ученый сформировался на интеллектуальной волне, проявившейся в России на рубеже XIX и XX вв. В этот период российская научная интеллигенция завоевала прочные позиции в мире и укрепила свои связи с самыми выдающимися учеными Европы. В равной мере этот интеллектуальный прорыв коснулся Петербургского и Московского университетов. Владимир Иванович Вернадский закончил физико-математический факультет Петербургского университета, где получил блестящее образование, что заложило фундамент для его дальнейшей более чем успешной научной деятельности. Его учителями во время обучения в университете были выдающиеся ученые того времени – В.В. Докучаев (основатель почвоведения), Д.И. Менделеев (создатель периодической системы химических элементов), А.И. Воейков (создатель климатологии), А.Н. Бекетов (основатель научной школы географии растений), Н.П. Вагнер (палеонтолог, крупный специалист по фауне беспозвоночных).

Все это и глубокий проницательный ум всесторонне образованного ученого, предопределили широту научных интересов В.И. Вернадского. Кроме того, что он был геологом, он преуспел в биологии, изучении почв, природных вод в создании системы «вода–порода», метеоритов, и пожалуй, одним из первых оценил важность изучения радиоактивности во всех аспектах практического применения этого природного феномена. Его научный багаж огромен и многосторонен. Из 416 опубликованных трудов 100 посвящено минералогии, 70 – биохимии, 50 – геохимии, 43 – истории наук, 37 – организационным вопросам, 29 – кристаллографии, 21 – радиогеологии, 14 – почвоведению, остальные разным разделам науки, причем многие из этих работ намного опередили свое время.

ЛЕТНИКОВ Феликс Артемьевич
академик, заведующий лабораторией петрологии и рудогенеза Института земной коры СО РАН.
Felix A. LETNIKOV,
Chief of Petrology and Ore Genesis Laboratory, Institute of the Earth Crust SB RAS,
e-mail: letnikov@crust.irk.ru.

Так В.И. Вернадский создал новую генетическую минералогию, заложив тем самым ряд принципиально новых минералогических подходов к изучению не только самой минералогии, но и процессов образования минералов. На базе генетической минералогии возникла новая наука – геохимия, основателем которой по общему признанию является В.И. Вернадский, создавший основы геохимии в своих трудах 1908–1911 гг. В 1912 г. талантливый ученик В.И. Вернадского А.Е. Ферсман прочитал первый курс новой науки, и в дальнейшем до конца своей жизни неоднократно со статьями, докладами и лекциями по геохимии, обобщил многие аспекты нового учения в своей книге.

Одной из заслуг В.И. Вернадского является создание радиогеологии. Во всех странах мира считают В.И. Вернадского создателем радиогеологии как самостоятельного научного направления, которым В.И. Вернадский занимался с 1908 г. Созданная им минералогическая база радиоактивных минералов в тогдашней России явилась в СССР основой сырьевой базы радиоактивных руд, что сыграло огромную роль в создании собственной атомной промышленности. Именно по инициативе В.И. Вернадского в 1922 г. в Петербурге был создан Радиевый институт, и уже в преддверии начала атомной эры в 1940 г. в связи с обращением В.И. Вернадского, А.Е. Ферсмана и В.Г. Хлопина в Президиум АН СССР была создана Комиссия по урану.

Дар предвидения позволил В.И. Вернадскому уже в 1915 г. создать Комиссию по изучению естественных производительных сил России (КЕПС), проработавшей до

1930 г., в заслугу которой относится открытие бокситов Тихвинского месторождения, оценка железных руд Урала, фосфоритов Центральной России и т.д.

В конце своей жизни В.И. Вернадский сформулировал учение о ноосфере, которое изложил в 1937 г. в своем докладе на XVII сессии Международного геологического конгресса. В 1945 г. после смерти В.И. Вернадского в журнале «American Scientist» вышла его статья «Биосфера и ноосфера», получившая широкую известность в научном сообществе.

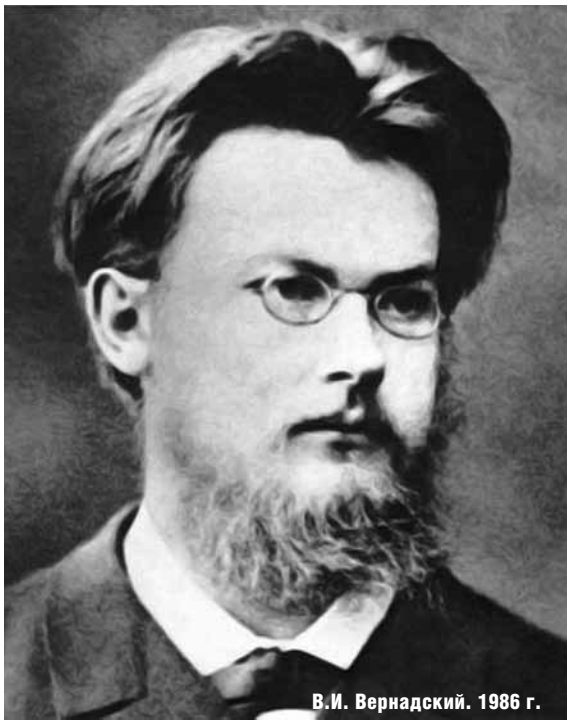
Во время войны в 1941-1945 г.г. В.И. Вернадский с группой выдающихся ученых был эвакуирован из Москвы в курорт Боровое (Северный Казахстан), где на фоне неповторимой природы: сочетание сосновых лесов, озер и гранитных гор, – В.И. Вернадский продолжал продуктивно работать. Свои представления он изложил в двух больших, незаконченных и поэтому неопубликованных при жизни трудах. Наиболее полно представления о ноосфере изложены в работе «Научная мысль как планетное явление», изданной в 1977 г., а затем с поправками вошли в книгу «Философские мысли натуралиста» (1988 г.), а третье издание отдельной книгой осуществилось в 1991 г.

В трудах В.И. Вернадского указаны 12 конкретных условий, необходимых для становления и существования ноосферы. Самый важный из 12-ти пунктов его завещания – исключение войн из жизни общества.

Владимир Иванович Вернадский (1863-1945)

Мищенко С.В., Мастрейко А.В.

Академик АН СССР, член Чехословацкой и Парижской Академий, первый президент АН Украинской ССР Владимир Иванович Вернадский широко известен как в нашей стране, так и за рубежом своими достижениями в области кристаллографии, геохимии, гидрохимии, минералогии, радиогеологии, метеоритики, биогеохимии и ноосферы, а также как автор трудов по философским вопросам естествознания и науковедению. Владея основными европейскими языками и общаясь с великими учеными своей эпохи, будучи в курсе всех открытий в области естественных наук, В.И. Вернадский глубоко анализировал и философски обобщал их в своих фундаментальных трудах.

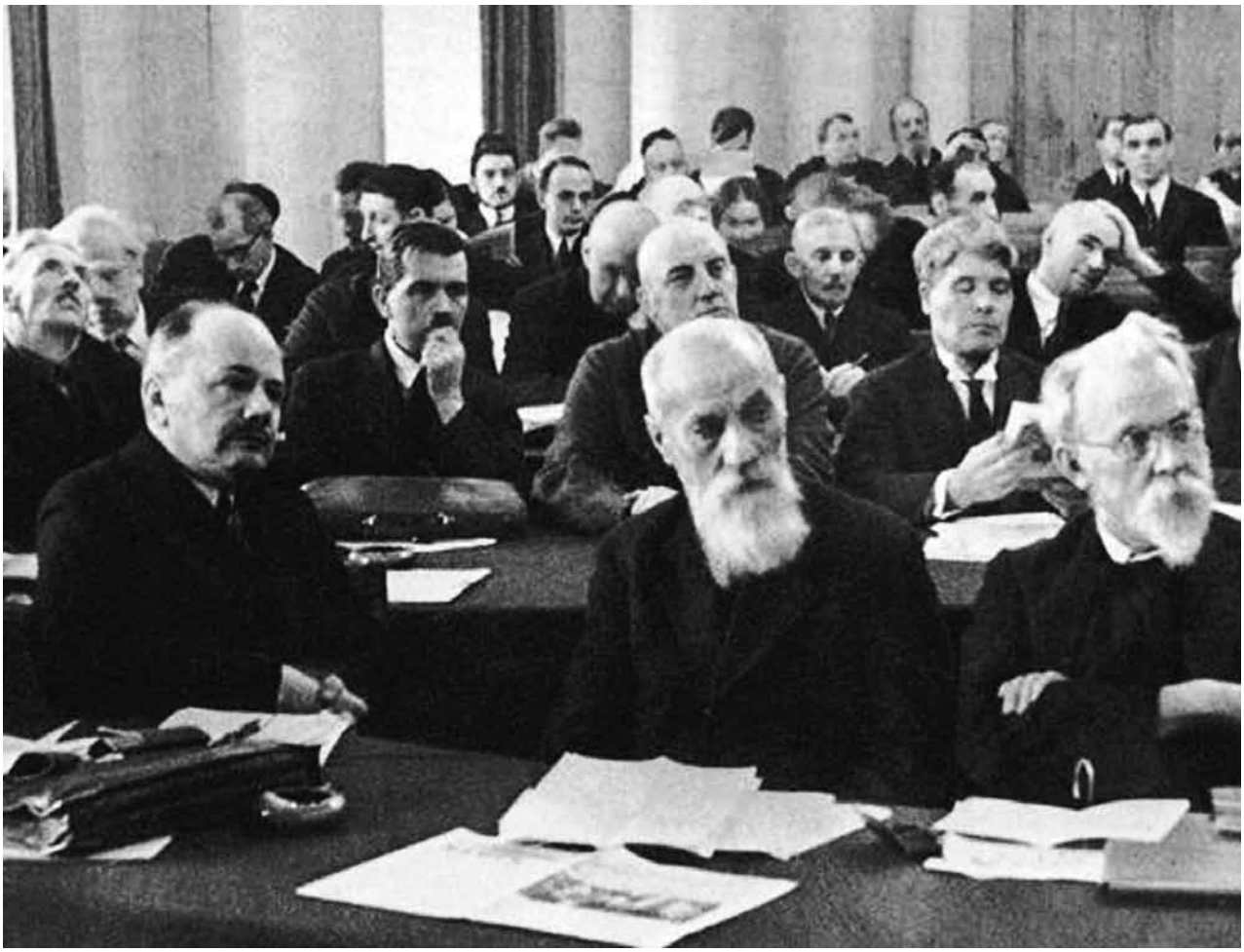

В.И. Вернадский. 1986 г.

Научная деятельность Владимира Ивановича Вернадского началась в 1881 г., когда по окончании гимназии он поступил в Петербургский университет на естественное отделение физико-математического факультета. Огромное впечатление на него произвели лекции таких замечательных ученых как, А.Н. Бекетов, А.М. Бутлеров, В.В. Докучаев, Д.И. Менделеев. Окончив университет со степенью кандидата наук по минералогии в 1885 г., он остается работать в университете в должности хранителя минералогического кабинета. В 1890 г. Владимир Иванович получает приглашение от профессора геологии А.П. Павлова перейти в Московский университет на кафедру минералогии, где несколько позже защищает магистерскую диссертацию «О группе силлиманита и роли глинозема в силикатах», а затем и докторскую на тему: «Явление скольжения кристаллического вещества».

Московский период его научной жизни – чисто минералогический и кристаллографический. В это время закладываются многие направления его дальнейшей научной деятельности в области геохимии, биогеохимии, радиогеологии. По словам его ученика, выдающегося геохимика А. Саукова, «минералогию он реформировал, биогеохимию и радиологию создал». В московский период Вернадским В.И. были созданы минералогические музеи Высших ин-

МИЩЕНКО
Сергей Владимирович,
доктор технических наук, почетный ректор Тамбовского государственного технического университета,
e-mail: msv@tstu.ru.
Sergey V. MISCHENKO,
Doctor of Engineering Sciences, Lord Rector at Tambov State Technical University, e-mail: msv@tstu.ru.

МАЙСТРЕНКО
Александр Владимирович,
кандидат технических наук, декан факультета нанотехнологий Тамбовского государственного технического университета,
e-mail: mmf@nnn.tstu.ru.
Alexandr V. MAYSTRENKO,
Candidate of Engineering Sciences, Dean of Nanotechnology Faculty at Tambov State Technical University, e-mail: mmf@nnn.tstu.ru.

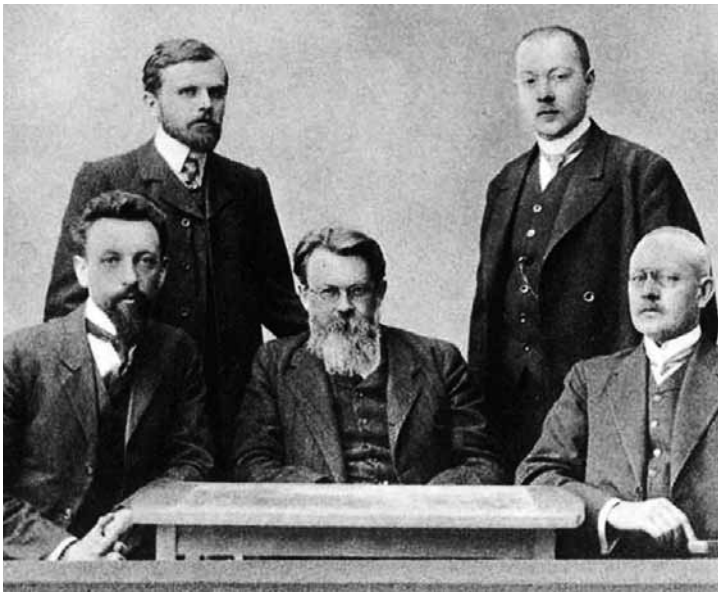


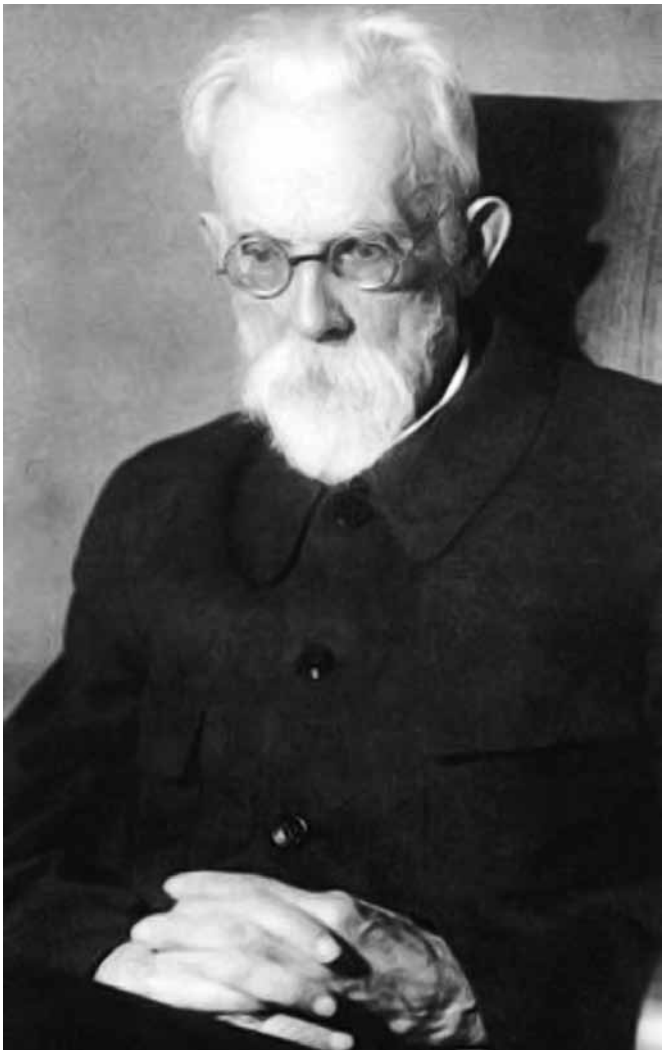
В.И. Вернадский на собрании Академии наук. Ленинград, конец 1920-х гг.

женерных курсов и университета, Научно-исследовательский минералогический институт, сформировались его представления о минеральных химических соединениях, была создана основа его минералогической системы. В эти годы им был написан труд «История минералов земной коры», который выходил в свет с 1898 г. частями в виде учебных курсов по минералогии. В результате дальнейшей работы в этом направлении возникла его фундаментальная монография «Опыт описательной минералогии», во многом актуальная до сих пор, и был издан знаменитый труд «Минералогия».

С 1891 по 1912 гг. жизнь В.И. Вернадского была тесно связана с родовым имением Вернадовка Тамбовской губернии, где он не прекращал своего научного поиска. Он участвует в работе земского собрания Тамбовской губернии, много ездит по губернии, изучает ее природные условия и климатические особенности. Именно так в 1899 г. Владимир Иванович открыл на границе своих земель и угодий крестьян села Липовки, в овраге речки Красная, марганцевое месторождение. На протяжении всего тамбовского периода наиболее важные вопросы, волновавшие ученого, касались создания центров народного просвещения. И сегодня в бывшем здании губернского земства (в наши дни – корпус Там-

В.И.Вернадский со своими ассистентами. Слева направо: В.В. Карандеев, Г.И. Касперович, А.Е. Ферсман, П.К. Алексат





Одна из последних фотографий В.И.Вернадского

бовского государственного технического университета) организован Музей научного наследия академика В.И. Вернадского, среди экспонатов которого особый интерес представляет уникальная коллекция научных трудов В.И. Вернадского, включающая такие раритетные издания как «Минералогия» (1910 г.), «Биосфера» (1926 г.), «Геохимия» (1934 г.).

Начиная с осени 1908 г., видя перспективность выбранного направления в будущем, В.И. Вернадский начинает изучать явление радиоактивного распада. По его предложению при физико-математическом отделении Академии наук создается Радиевая комиссия, организуются первые радиевые экспедиции в Забайкалье, Фергану, Закавказье и на Урал, открывается Радиологическая лаборатория в Петербурге. В январе 1922 г. по инициативе В.И. Вернадского в Петрограде создается Радиевый институт Академии наук, который Владимир Иванович будет возглавлять до 1939 г. Именно здесь Игорь Курчатов построил первый отечественный циклотрон, а инициатором стал все тот же Владимир Иванович Вернадский, отец атомной энергетики.

Период с 1923 по 1926 гг. В.И. Вернадский провел за границей, в основном во Франции, читая курс лекций по геохимии в Сорбоннском университете. Первые его статьи по данному направлению относятся к началу XX в., в которых приводятся сведения о поведении отдельных химических элементов, а также их групп. Позднее, обобщив свои геохимические исследования, он разработал целый ряд фундаментальных идей, включая геохимическую классификацию элементов. В 1924 г. в Париже на французском языке вышла в свет его известная книга «Геохимия», состоящая из очерков о живом веществе, радиоактивных элементах, кремнии и силикатах в земной коре, ставшая крупным научным событием.

«*Мы живем,* – писал позднее В.И. Вернадский, – *в небывало новую, геологически яркую эпоху. Человек своим трудом и своим сознательным отношением к жизни перерабатывает земную оболочку – геологическую область жизни, биосферу. Он переводит ее в новое геологическое состояние: его трудом и сознанием биосфера переходит в ноосферу*».

Духовное наследие академика В.И. Вернадского является мощным стимулом в работе современных ученых. Они изучают закономерности формирования благороднометального оруднения и каналов миграции рудоносных гидротермальных растворов, разрабатывают новые методы диагностики урана и исследуют роль микроэлементов для живого вещества биосферы, поднимают философские проблемы живой и неживой природы.

Научное наследие В.И. Вернадского, представленное множеством фундаментальных работ, с каждым годом находит новых приверженцев и последователей, а изречение «Царство моих идей впереди…» по-прежнему актуально в научной среде.

Авторы выражают благодарность работникам Музея научного наследия академика В.И. Вернадского ФГБОУ ВПО «ТГТУ» Н Семиной. и Н. Филатовой за помощь в подготовке материала.

О редакторе тематического блока академике Эрике Михайловиче Галимове

Академик РАН с 1994 г. Директор Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Почетный профессор МГУ им. М.В. Ломоносова. Председатель Комитета по метеоритам РАН. Председатель Научного Совета по проблемам геохимии. Главный редактор журнала «Геохимия». Член Президиума РАН (2002–2013 гг.). Президент международной ассоциации геохимии и космохимии (2000–2004 гг.) и вице Президент этой ассоциации (1996–2000 гг.). Член бюро Совета по космосу РАН. Председатель Комиссии по разработке научного наследия академика В.И. Вернадского при Президиуме РАН.

Эрик Михайлович один из мировых лидеров в области изотопной геохимии. Он автор теории фракционирования изотопов в системе многоатомных органических соединений. Э.М. Галимов первым исследовал и установил закономерности биологического фракционирования изотопов. Он награжден международной медалью Альфреда Трейбса «За выдающийся вклад в органическую химию изотопов». Установленные им фундаментальные закономерности послужили основой для разработки практических методов выявления нефтематеринских пород, установления происхождения гигантских скоплений газа Западной Сибири. Им даны строгие доказательства биологического происхождения углеводородов нефти.

Э.М. Галимов выполнил пионерские работы по исследованию изотопного состава алмазов. Им впервые установлена неоднородность изотопного состава алмазов как внутри кристаллов, так и алмазов разного минерального парагенезиса. Теоретически обосновал еще в 1973 г. возможность синтеза алмазов в процессе кавитации, который был 30 лет спустя экспериментально подтвержден.

Вместе с тем Э.М. Галимов является одним из известных исследователей геохимии дна океана. Он руководитель и участник морских экспедиций, в том числе на легендарных буровых суднах «Гломар Челенджер», и «Джоидес Резольюшен», руководитель рейсов НИС «Академик Борис Петров», принадлежащего ГЕОХИ РАН в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах.

Э.М. Галимов – руководитель программ исследования внеземного вещества. Эрик Михайлович выдвинул новую концепцию происхождения системы Земля-Луна. Он инициатор космических программ «Луна-Глоб» и «Фобос-Грунт». Под его руководством проведены недавнее исследование и точная идентификация метеорита «Челябинск».

Академик Э.М. Галимов – продолжатель дела В.И. Вернадского. Более 20 лет он руководит институтом геохимии и аналитической химии Им. В.И Вернадского, выросшего из биогеохимической лаборатории, которую в 1928 г. основал В.И. Вернадский. Э.М. Галимов возглавляет комиссию РАН по разработке научного наследия академика В.И. Вернадского. Под его редакцией выходит в юбилейном году первое 24-томное собрание сочинений В.И. Вернадского.

Аннотация к тематическому блоку

Летников Ф.А.

Поражает широта и многогранность идей В.И. Вернадского, многие из которых оказались пророческими. Диапазон дальнейшего внедрения его идей иллюстрируется сообщениями, опубликованными в «Вестнике РФФИ» в тематическом блоке, посвященном Вернадскому.

Развитие радиогеохимии освещено в серии публикаций, посвященных, в частности, разработке новых методов детектирования урана (V1) и его комплексов в природных водах с использованием лазерной флуориметрии (В.В. Фадеев с соавторами), что имеет несомненное теоретическое и прикладное значение.

На базе детального изучения месторождений и рудопроявлений редких металлов и урана Центральной Азии выявлены закономерности формирования комплексного уранового и редкометального с благородными элементами эндогенного оруденения, что является развитием новых направлений генетической минералогии (А.А. Поцелуев с соавторами).

На базе изучения флюидных включений в минералах реконструированы пространственно-временные закономерности формирования флюидопроводящих каналов рудообразующих гидротермальных систем (В.А. Петров с соавторами).

Заложенные В.И. Вернадским представления о биогеохимии развиты при изучении W-Mo и Vo-Cu рудных ландшафтов Северного Кавказа и Казахстана. Показано, что при увеличении концентрации металлов в среде их миграция в организмы заметно возрастает особенно в рудных зонах (В.В. Ермаков с соавторами).

В.С. Урусов детально анализирует философский подход Вернадского о симметрии-диссиметрии вещества в пространстве-времени. Автор с позиций единой концепции симметрии-диссиметрии рассматривает современное состояние этих проблем и указывает некоторые возможные пути решения наиболее сложных и дискуссионных моментов.

Обзор А.А. Котова и Б.Ю. Адамяка посвящен юбилейной XV международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», на которой были рассмотрены на шести секциях различные аспекты и методы селекции вещества, и в частности, применение изотопов в фундаментальных прикладных физико-химических исследованиях и в медицине.

Диапазон реферируемого обзора достаточно обширен и часто касается проблем на стыке нескольких наук, в частности, доклад Н.И. Айзенберг и В.И. Зоркальцева «Равновесные модели экономики и энергетики». Хотя с позиций макротермодинамики лучше было рассматривать и сравнивать стационарные мега- и макросистемы.

В докладе М.Ю. Марова, Ю.А. Нефедьева и А.В. Гусева сделан обзор современных исследований планет и их спутников с использованием космических технологий. Приведен обзор будущих космических миссий и перечень задач, которые планируется осуществить на основании спутниковых наблюдений.

Таким образом, в данном тематическом блоке сгруппированы многоплановые доклады, посвященные дальнейшему развитию идей В.И. Вернадского.

Разработка новых методов детектирования урана (VI) и его комплексов в природных водах с использованием лазерной флуориметрии

Фадеев В.В., Ширшин Е.А., Будылин Г.С., Калмыков С.Н.

Предложен и апробирован метод диагностики смеси физико-химических форм урана(VI) в водных средах, основанный на одновременном применении время-разрешенной и нелинейной лазерной флуориметрии. Показаны новые возможности этого подхода в определении парциальных концентраций компонентов смеси и их фотофизических параметров.

Ключевые слова: природная вода, уран(VI), физико-химические формы урана(VI), флуоресценция, лазерная спектроскопия, время-разрешенная, нелинейная и матричная флуориметрия.

A novel method of monitoring uranium(VI) speciation in aqueous solutions based on the joint application of time-resolved and nonlinear laser fluorimetry was developed. New possibilities of the suggested approach in determination of uranium(VI) complexes partial concentrations and photophysical parameters were shown.

Keywords: natural waters, uranium(VI) speciation, fluorescence, laser spectroscopy, time-resolved fluorimetry, nonlinear fluorimetry, matrix fluorimetry.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-01132).
The work was financially supported by RFBR (grant № 12-05-01132).

ФАДЕЕВ Виктор Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники, физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
Victor V. FADEYEV,
Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Quantum Electronic Department, Faculty of Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University, e-mail: victor_fadeev@mail.ru.

БУДЫЛИН Глеб Сергеевич,
аспирант кафедры квантовой электроники, физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
Gleb S. BUDYLIN,
post-graduate student at the Quantum Electronics Department, Faculty of Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University, e-mail: gleb.budylin@gmail.com.

ШИРШИН Евгений Александрович,
кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник кафедры квантовой электроники, физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
Evgeny A. SHIRSHIN,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Junior Research Fellow at the Quantum Electronics Department, Faculty of Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University, e-mail: shirshin@lid.phys.msu.ru.

КАЛМЫКОВ Степан Николаевич,
доктор химических наук, заведующий кафедрой радиохимии, химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
Stepan N. KALMYKOV,
Doctor of Chemistry, Head of the Radiochemistry Department, Faculty of Chemistry of M.V. Lomonosov Moscow State University, e-mail: stepan@radio.chem.msu.ru.

В данной статье приведены результаты, полученные на первом (2012 г.) этапе выполнения проекта РФФИ № 12-05-01132.

Уран(VI), существующий в водной среде в форме иона уранила UO_2^{2+}, представляет серьезную опасность для окружающей среды, являясь одновременно тяжелым металлом и радиоактивным элементом. В связи с этим актуальной задачей является контроль содержания урана как в местах его повышенной концентрации (рядом с урановыми рудниками, заводами по переработке руды и радиоактивных отходов, АЭС), так и в удаленных от них природных водах. Необходимыми требованиями к системам контроля являются возможность экспрессного анализа – получения данных в режиме реального времени, высокая чувствительность детектирования на интенсивном фоне природного происхождения, анализ in situ (без предварительной пробоподготовки), в дистанционном режиме. Из всех существующих на данный момент методов предъявленным выше требованиям в наибольшей мере удовлетворяет метод лазерно-индуцированной время-разрешенной флуориметрии (TRLFS – time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy) [1, 2]. Он в принципе позволяет детектировать физико-химические комплексы урана в природной воде путем временной селекции их флуоресценции из интенсивного флуоресцентного фона, обусловленного прежде всего растворенным органическим веществом, РОВ (используется различие на три порядка и более времен затухания флуоресценции комплексов урана и РОВ). Однако применение данного подхода связано с трудностями, возникающими при решении обратной задачи спектроскопии – большим числом неизвестных фотофизических параметров, описывающих флуоресцентный отклик системы, и отсутствием модели, адекватно описывающей зависимость фотофизических параметров физико-химических форм урана от параметров окружающей среды.

В проекте, результаты выполнения первого этапа которого изложены в данной статье, ставится новая для оптики океана фундаментальная задача – развить, применительно к особенностям фотофизических свойств урана и его комплексов в воде, подход, в основе которого лежат методы лазерной флуориметрии, позволяющие проводить одновременное определение in situ, в дистанционном режиме, фотофизических параметров и парциальных концентраций всех физико-химических форм урана в природных водах в присутствии интенсивного флуоресцентного фона, обусловленного растворенным органическим веществом. Предполагается, что в рамках поставленной фундаментальной задачи будет разработана модель фотофизических процессов в комплексах урана для интерпретации полученных методами лазерной флуориметрии зависимостей фотофизических параметров форм урана от типа комплекса (геометрии, типа лигандов) и исследования механизмов влияния факторов среды (температуры, pH, ионной силы) на фотофизические параметры комплексов. Это позволит решить задачу экспресс-диагностики комплексов урана, контроля его связывания растворенным органическим веществом и миграции урана в гидросфере.

Методы и аппаратура

В данной работе были использованы следующие методы лазерной флуориметрии.

Метод кинетической флуориметрии, включающий измерение спектров флуоресценции смеси форм урана при различных значениях задержки времени регистрации относительно лазерного импульса. Кинетика затухания флуоресцентного отклика смеси комплексов урана(VI), измеряемая системой регистрации после окончания возбуждающего импульса длительностью τ_P в случае малой плотности мощности возбуждения F ($F\sigma\tau_P \ll 1$, σ – сечение поглощения комплекса) имеет вид

$$I(t) = \sum_{i=1}^{N} A_i e^{-t/\tau_i} = \Pi \sum_{i=1}^{N} \sigma_i \kappa_i n_i S_i(\lambda) e^{-t/\tau_i}, \quad (1)$$

где N – число физико-химических форм урана(VI) в смеси, A_i – амплитуда вклада i-й формы в кинетику затухания флуоресценции смеси, П – приборный фактор, учитывающий интенсивность возбуждающего излучения и параметры геометрии лазерного спектрометра, – n_i парциальная концентрация i-й формы в смеси, σ_i, κ_i, τ_i –сечение поглощения, скорость радиационной дезактивации возбужденного состояния и время жизни возбужденного состояния этой формы, $S_i(\lambda)$ – форма спектра флуоресценции i-й формы. С учетом условия нормировки $\sum_{i=1}^{N} n_i = 1$, путем решения обратной задачи из (1) можно получить значения парциальных концентраций в смеси.

Принципиальной особенностью применения данного метода в нашей работе является измерение кинетик затухания при различных значениях

интенсивности накачки. При достаточно большой интенсивности лазерного импульса проявляется эффект диффузионно-ограниченной аннигиляции возбужденных состояний. Этот эффект подробно исследован применительно к сложным органическим соединениям и комплексам, в частности, к фотосинтезирующим организмам [3], где он именуется как синглет-синглетная аннигиляция. Поскольку природа возбужденного состояния урана, переходы с которого формируют полосу люминесценции в области 480–650 нм, является предметом дискуссии, мы обозначаем этот эффект для урана как аннигиляцию возбужденных состояний. Он приводит к появлению быстрого участка в кинетике затухания. Таким образом, при обработке данных кинетической флуориметрии необходимо учитывать не только собственную скорость релаксации комплекса, но и бимолекулярный процесс дезактивации. Измерение кинетик флуоресценции для разных значений интенсивности накачки, обработка их по модели, включающей аннигиляцию, определение скорости аннигиляции и истинных (собственных) времен жизни флуоресценции комплексов – оригинальная модификация метода кинетической флуориметрии применительно к комплексам урана.

Методы нелинейной [4] и матричной [5] лазерной флуориметрии – оригинальные методы, развиваемые авторами работы и основанные, соответственно, на эффекте насыщения флуоресценции и его комбинации с время-разрешенной флуориметрией. Последняя позволяет измерять матрицу интенсивностей флуоресценции $||I(F_i, t_i)||$, где F – плотность потока фотонов (интенсивность) возбуждающего флуоресценцию лазерного излучения, а t – время задержки строба приемника относительно лазерного импульса. Поскольку характерные времена релаксации комплексов (микросекунды) значительно превышают длительность импульсов лазерного излучения (10 нс), режим возбуждения флуоресценции является существенно нестационарным и зависимость интенсивности флуоресценции смеси физико-химических форм урана от времени t и плотности потока фотонов возбуждающего излучения F определяется выражением

$$I(t)=\tilde{\Pi}\sum_{i=1}^{N}\kappa_i(1-e^{-F\sigma_i\tau_p})n_i e^{-t/\tau_i}, \qquad (2)$$

переходящим при $F\sigma\tau_p << 1$ в (1) с учетом нормировки $\Pi=\tilde{\Pi}F\tau_p$.

Появление в факторе перед экспонентой $e^{-t/\tau}$ сомножителя, зависящего от параметров возбуждающего излучения, аналогично с точки зрения решения обратной задачи появлению в нем сомножителя $c_i(x)$, описывающего перераспределение парциальных концентраций физико-химических форм урана в смеси под влиянием внешнего фактора x (например, pH, температуры и т.д.). Формальное различие заключается в том, что в случае варьирования внешних условий неизменным полагается сомножитель $\sigma_i k_i$ в (1), в нашем же методе неизменными при изменении плотности потока фотонов лазерного импульса F остаются концентрации n_i, а сомножитель, в который входят фотофизические параметры σ_i, k_i форм урана, изменяется согласно (2). При измерении не одной, а семейства кинетических кривых в режиме, когда проявляется насыщение флуоресценции, т.е. массива I(F,t), увеличивается устойчивость и, как следствие, точность решения обратной задачи спектроскопии, что позволяет определять парциальные концентрации форм урана(VI) в растворе при их числе три и более. Применение метода нелинейной флуориметрии позволяет определить индивидуальные фотофизические параметры комплексов и исследовать влияние координации на скорости радиационной и безызлучательной релаксации возбужденного состояния.

Для исследования фотофизических свойств комплексов урана в воде методами время-разрешенной и нелинейной флуоресцентной спектроскопии в работе был собран лазерный флуориметр, в котором для возбуждения флуоресценции использовалась четвертая гармоника излучения импульсного ИАГ:Nd лазера (длина волны 266 нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 2 мДж, частота повторения импульсов 10 Гц); мощность излучения варьировалась с помощью ячейки Поккельса в диапазоне 10^5–$5\cdot10^7$ Вт/см^2. Отметим, что во многих работах (например, [6]) для кинетической флуориметрия форм урана(VI), использовались лазеры с аналогичными характеристиками. Лазерное излучение заводится в кварцевую кювету с образцом, а сигнал флуоресценции собирается в 90° схеме световодом и передается на входную щель полихроматора со спектральным разрешением 1 нм, к которому присоединена ПЗС-камера с усилителем яркости (ширина стробирующего импульса 2,5 мкс, точность установки стробирующего импульса относительно возбуждающего лазерного импульса – 50 нс). Используемая система регистрации позволяет детектировать спектры флуоресценции исследуемых образцов во времени при разных значениях плотности мощности возбуждающего излучения.

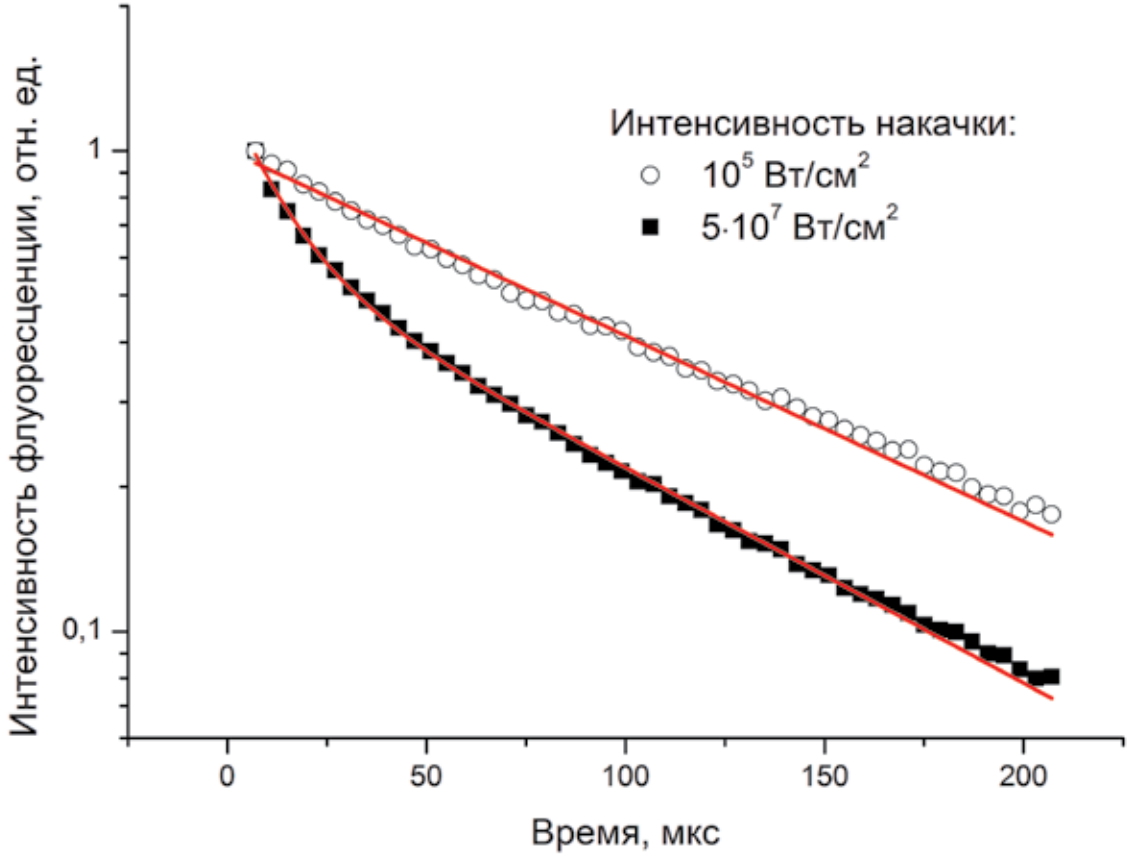


Рис. 1. Кинетики флуоресценции образца, содержащего физико-химические формы урана(VI), полученные при разных интенсивностях возбуждающего излучения. Сплошными линиями изображены аппроксимации моно- (верхняя кривая, τ = 110±5 мкс) и биэкспоненциальным (нижняя кривая, τ_1 = 15±2 мкс, τ_2 = 105±5 мкс) затуханием по формуле (1)

На рис. 1 приведены кинетики затухания флуоресценции образца ([U(VI)] = 10^{-4} M, [F^-]=$2\cdot10^{-3}$ M, pH = 2,7, I = 0,1), содержащего фторидные комплексы урана(VI). Кинетики флуоресценции, полученные для различных значений интенсивности возбуждающего излучения (накачки), имеют разный характер (моно- или мультиэкспоненциальный), а диапазон значений времен жизни возбужденных состояний, которые можно получить путем аппроксимации кинетических кривых, включает значения от 110 мкс («собственное», в отсутствие эффекта аннигиляции, время релаксации возбужденного состояния комплекса UO_2F_2, доминирующего в смеси) до 15 мкс (характерный временной масштаб быстрого участка в кинетике затухания флуоресценции при максимальном значении интенсивности накачки в нашем эксперименте I = $5\cdot10^7$ Вт/ см^2). Наблюдаемую зависимость мы объясняем присутствием эффекта диффузионно-обусловленной аннигиляции возбужденных состояний комплексов урана: при увеличении мощности накачки уменьшается среднее расстояние между возбужденными комплексами, в результате чего растет вероятность их диффузионного сближения с последующим переносом энергии, приводящим к тушению флуоресценции. Действительно, для комплексов урана смещение за счет диффузии за время жизни в возбужденном состоянии τ ~ 100 мкс заметно превосходит среднее расстояние между ними при концентрации 10^{-5} M и, следовательно, велика вероятность «столкновения» двух возбужденных молекул и их аннигиляция (в результате этого акта из двух возбужденных комплексов остается один, второй безызлучательно переходит в основное состояние).

С учетом аннигиляции, динамика населенности первого возбужденного состояния n_{ex} в первом приближении описывается уравнением:

$$\frac{dn_{ex}}{dt} = F(t)\sigma(1-n_{ex}) - \frac{n_{ex}}{\tau} - Kn_{ex}^{\ 2}, \qquad (3)$$

где K – константа скорости аннигиляции. Квадратичный по концентрации возбужденных состояний член в (3) отражает эффект аннигиляции возбуженных состояний, обусловленный переносом

энергии между двумя возбужденными комплексами, что приводит к тушению флуоресценции. Константа скорости аннигиляции при этом определяется выражением:

$$K = 4\pi DRn_0, \quad (4)$$

где D – коэффициент диффузии комплекса, R – эффективный радиус взаимодействия двух возбужденных комплексов (аналог ферстеровского радиуса переноса энергии электронного возбуждения – с возбужденной молекулы на невозбужденную), n_0 – полная концентрация урана в смеси. Таким образом, путем определения константы скорости аннигиляции из кривой затухания флуоресценции становится возможным определение коэффициента диффузии комплекса урана(VI) (при известном радиусе взаимодействия). Более того, при известных значениях коэффициента диффузии и радиуса взаимодействия возможно определение абсолютной концентрации урана в растворе, тогда как обычно определяются относительные концентрации, и переход к абсолютным значениям требует наличия эталонов.

С практической точки зрения, учет этого эффекта принципиально важен при определении как парциальных концентраций физико-химических форм урана(VI), так и их типа. Разброс значений времен жизни флуоресценции, используемых в качестве признака для идентификации форм урана(VI) [6], неприемлем при решении аналитических задач, связанных с контролем физико-химических форм урана(VI) в природных и технологических водах. Таким образом, эффект аннигиляции возбужденных состояний урана необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных кинетической флуориметрии.

В работе был апробирован на пятикомпонентной смеси фторидных и сульфатных комплексов урана(VI) метод определения их парциальных концентраций, основанный на совместном применении методов кинетической и нелинейной флуориметрии, основы которого кратко изложены выше.

Определение парциальных концентраций физико-химических форм урана в смеси проводилось для образца со следующим составом: pH = 1,5, полная концентрация урана в смеси $[UO_2^{2+}] = 10^{-5}$ M, ионная сила раствора 1 M (фиксировалась путем добавления соли $NaClO_4$), полная концентрация фторид-ионов $[F^-] = 0{,}05$ M, полная концентрация сульфат-ионов $[SO_4^{2-}] = 1$ M. Распределение комплексов урана в данном образце, рассчитанное с помощью программного обеспечения MEDUSA [7] с использованием имеющихся в нем констант комплексообразования (база данных HYDRA), дает для этих условий следующие парциальные концентрации физико-химических форм в растворе: $[UO_2F_3^-]$=2%, $[UO_2SO_4]$=10%, $[UO_2F^+]$=12%, $[UO_2F_2]$=26%, $[UO_2(SO4)_2^{2-}]$=50%.

Стандартная методика определения парциальных концентраций форм урана в их смеси основана на определении вкладов (амплитуд) комплексов в общую кинетику затухания флуоресценции путем ее мультиэкспоненциальной аппроксимации (1). В случае числа форм более двух решение данной задачи становится неустойчивым.

Для кинетик затухания флуоресценции образца, полученных при различных значениях плотности потока фотонов возбуждающего излучения, парциальные концентрации форм для всех кинетических кривых одни и те же, а их вклады в кинетику затухания меняются согласно (2). Совместная обработка набора кинетических кривых, измеренных для различных значений F (флуоресцентной матрицы) с учетом условия нормировки парциальных концентраций дает значения:

$[UO_2F_3^-]$=5±5%,
$[UO_2SO_4]$=10±5%,
$[UO_2F^+]$=15±7%,
$[UO_2F_2]$=20±7%,
$[UO_2(SO4)_2^2]$=50±10%,

то есть точность восстановления парциальных концентраций (даже в пятикомпонентной смеси) с помощью предложенного способа значительно превышает точность подхода, оперирующего одной кинетикой затухания флуоресценции. Использование эффекта насыщения – нелинейной зависимости интенсивности флуоресценции от интенсивности накачки I(F) – позволяет преодолеть трудности кинетической флуориметрии в линейном режиме возбуждения: фактически, измеряемая флуоресцентная матрица $||I(F_i, t_j)||$ содержит семейство кинетических кривых I(t), вклад индивидуальных компонент в амплитуду которых различен для каждого значения F в связи с различием значений их сечения поглощения и времени жизни возбужденного состояния, от которых зависит степень насыщения флуоресценции при данном F.

Таким образом, предложенный метод позволяет увеличить размерность входных данных (размерность обратной задачи с достаточно устойчивым решением) и значительно повысить точность определения парциальных концентраций форм урана(VI) в смеси.

В работе показано, что метод матричной флуориметрии позволяет значительно увеличить возможности флуоресцентной спектроскопии в анализе состава смесей комплексов урана, а предложенная модель формирования их флуоресцентного отклика в нелинейном режиме возбуждения, учитывающая диффузионно-ограниченный процесс тушения (аннигиляции) возбужденных состояний, позволяет корректно интерпретировать данные кинетической флуориметрии. Ее использование устраняет разброс данных, который, как установлено в данной работе, был во многом связан с различной степенью проявления эффекта аннигиляции (тушения) возбужденных состояний комплексов урана, который не учитывался при обработке кинетических кривых в предшествующих работах.

Показано, что метод нелинейной флуориметрии позволяет определять индивидуальные фотофизические параметры комплексов, которые могут быть использованы в качестве идентификационных признаков, например, для изучения и контроля их миграции в гидросфере и исследования процесса связывания комплексов урана гуминовыми веществами. Этот раздел программы проекта будет разрабатываться на следующих этапах его выполнения.

Полученные результаты закладывают основу для разработки новых безэталонных методов определения абсолютного значения полной концентрации урана в растворе (из значения константы скорости аннигиляции возбужденных состояний по формуле (4) при известных коэффициенте диффузии и радиусе взаимодействия).

Литература

1. ***Collins R., Saito T., Aoyagi N., Payne T., Kimura T., Waite T.D.*** Applications of Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy to the Environmental Biogeochemistry of Actinides // Journal of Environmental Quality. – 2011. – V. 40. – P. 732–741.

2. ***May C.C., Worsfold P.J., Keith-Roach M.J.*** Analytical techniques for speciation analysis of aqueous long-lived radionuclides in environmental matrices // Trends in Analytical Chemistry. – 2008. – V. 27, №2. – P. 160–168.

3. ***Маслов Д.В., Остроумов Е.Е., Фадеев В.В.*** Флуориметрия насыщения сложных органических соединений с высокой локальной концентрацией флуорофоров (на примере фитопланктона) // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, №2. – С. 163–168.

4. ***Fadeev V.V., Shirshin E.A.*** Nonlinear laser flurescence spectroscopy of natural organic compounds // Chapter 30 in: «Handbook of Coherent-Domain Optical Metods: Biomedical Diagnostics, Enviromental Monitoring, and Material Science», Kluwer – Springer, edited by V.V. Tuchin. Kluwer – Springer. – 2013. – P. 1255–1288.

5. ***Fadeev V.V., Dolenko T.A., Banishev A.A., Litvinov P.N., Maslov D.V., Ostroumov E.E.*** Matrix method in laser fluorimetry of organic compounds // Proceedings of SPIE, Opto-Ireland 2005: Optical Sensing and Spectroscopy. – 2005. – V. 5826. – P. 44–55.

6. ***Billard I. et al.*** Aqueous Solutions of Uranium(VI) as Studied by Time-Resolved Emission Spectroscopy: A Round-Robin Test // Applied Spectroscopy. – 2003. – V. 57, №8. – P. 1027–1038.

7. http://sites.google.com/site/chemdiagr/.

Закономерности формирования благородно-металльного оруденения в гидротермальных урановых и редкометалльных месторождениях Центральной Азии

Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Бабкин Д.И.

Представлены результаты исследования месторождений и многочисленных рудопроявлений редких металлов и урана рудных районов Центральной Азии. Выявлены закономерности формирования комплексного уранового и редкометалльного с благородными элементами эндогенного оруденения.

Ключевые слова: Центральная Азия, редкометалльные и урановые месторождения.

The results of investigation fields and many ore deposits of rare metals and uranium ore areas of Central Asia. Dentified patterns of forming integrated uranium and rare metals with the noble elements of endogenous mineralization.

Keywords: Central Asia, rare metals and uranium deposits.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-01132).
The work was financially supported by RFBR (grant № 12-05-01132).

Благородные металлы в высоких и промышленных концентрациях известны во многих урановых и редкометалльных месторождениях мира. При этом доля добываемых благородных металлов, например, по золоту из комплексных месторождений, сопоставима с добычей металла из собственно золоторудных месторождений [1]. Классическими являются примеры сверхкрупных и гигантских золото-урановых месторождений Южной Африки (Витватерсранд), Австралии (Джабилука, Олимпик-Дам), Южной (район Сьерра-ди-Жакобина, Бразилия) и Северной (районы Клафф-Лейк и Биверлодж) Америки.

Не являются исключением и рудные районы Центральной Азии, где комплексное золото-урановое оруденение и благороднометалльная минерализация выявлены в изученных месторождениях Северо-Казахстанской (Акканбурлук, Викторовское Косачиное Чаглинское Шат-I Маныбайское) и Алтае-Саянской (Кедровое, Оленье, Усть-Уюкское, Онкажинское) складчатых областей [2–4].

ПОЦЕЛУЕВ Анатолий Алексеевич
доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой общей геологии и землеустройства института природных ресурсов Томского политехнического университета.
Anatoly A. POTSELUYEV
Dr. Sci. (Geol.–Miner.), Professor, Head of the Department of General Geology and Land Utilization at the Institute of Natural Resources at Tomsk PolytechnicUniversity, e-mail: poceluevaa@tpu.ru.

ЖИТКОВ Владимир Георгиевич,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства института природных ресурсов Томского политехнического университета.
Vladimir G. ZHITKOV,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor at the Department of Geology and Earth Resources Survey of the Institute of Natural Resources at Tomsk Polytechnic University, e-mail: vlgitkov@yandex.ru.

АНАНЬЕВ Юрий Сергеевич,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых института природных ресурсов Томского политехнического университета.
Yury S. ANANYEV,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor at the Department of Geology and Earth Resources Survey of the Institute of Natural Resources at Tomsk Polytechnic University, e-mail: ananyevys@ignd.tpu.ru.

БАБКИН Дмитрий Иванович,
кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник кафедры общей геологии и землеустройства института природных ресурсов Томского политехнического университета.
Dmitry I. BABKIN,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, research scholar at the Department of Geology and Earth Resources Survey of the Institute of Natural Resources at Tomsk Polytechnic University, e-mail: babkin_di@sibmail.com.

Высокие концентрации благородных металлов выявлены и в рудах редкометалльных грейзеновых месторождений России (Депутатское, Джидинское, Калгутинское, Лазовский рудный узел и др.), Казахстана (Донецкое, Сырымбет) [5–9].

Ресурсы благородных металлов в грейзеновых месторождениях могут быть весьма значительны. В процессе эксплуатации они накапливаются в сульфидных концентратах, а в случае их потери – в отходах обогащения [2]. Так, запасы только золота в хвостах Джидинского вольфрамо-молибденового комбината оцениваются в 1164 кг. [7].

Очевидно, что доля попутно извлекаемых из комплексных месторождений благородных металлов будет возрастать и далее. Это обусловлено в первую очередь тем, что основные запасы и ресурсы различных полезных ископаемых сосредоточены в основном в крупных и уникальных месторождениях, где на долговременной основе могут реализовываться сложные многоэтапные схемы извлечения широкого спектра попутных ценных компонентов.

Выявление и всестороннее исследование комплексных месторождений имеет важнейшее значение для теории рудообразования, позволяет выработать критерии прогнозирования новых нетрадиционных типов руд.

Формирование комплексного оруденения является результатом сочетания многих в той или иной степени взаимосвязанных или автономных факторов. К ним относятся геотектоническая позиция и особенности развития рудовмещающего геоблока, особенности его металлогении, масштабы проявления и характер магматизма, особенности рудообразующих процессов, их полигенность и полихронность.

В первую очередь отмечаются ***металлогенические особенности эпох формирования комплексных месторождений.*** Благороднометалльная минерализация выявлена в рудах месторождений, образование которых соответствует каледонской, герцинской и раннемезозойской эпохам формирования основных рудных месторождений Центрально-Азиатского складчатого пояса. В это время формируются разнообразные по условиям образования и составу ведущие промышленно-генетические типы эндогенных месторождений золота, урана и редких металлов [10]. При многообразии возможных источников рудообразующих флюидов отмечается наследование основных глубинных рудоконтролирующих структур.

Это предопределило комплексный характер минерагении рудных районов и узлов, а также проявление ранней золоторудной минерализации на урановых (Акканбурлук, Чаглинское, Маныбайское, Кедровое, Оленье) и поздней урановой минерализации на золоторудных объектах (Васильковское).

В некоторых рудных районах формирование золотых и урановых руд происходило многоэтапно с перекрытием возрастов и продолжалось от 70 до 490 млн лет [11,12].

В рудах некоторых урановых и редкометалльных месторождений высокое содержание благородных металлов ***обусловлено их аномальным содержанием в рудовмещающих породах.*** Как правило, это черносланцевые толщи, имеющие выраженную благородно-редкометалльно-халькофильную специализацию.

Так, в Северо-Казахстанской складчатой области среди разновозрастных черносланцевых толщ выделяются породы шарыкской свиты протерозойского возраста. Эти отложения слагают грабены, приуроченные к рифтовым зонам, длина которых достигает 550 км. В пределах этих структур выявлены многочисленные месторождения урана и олова (Акканбурлукское, Косачиное, Сырымбет, Донецкое, Чаглинское и другие месторождения и участки). Высокие содержания золота (в среднем 0,15–0,4 г/т) и платиноидов, как правило, отмечаются в олово- и урановорудных зонах в тех участках, где они развиты в отложениях шарыкской свиты [5,6,13].

На ряде месторождений установлено, что оруденение формировалось из ***комплексных с благородными металлами глубинных флюидов.*** Это установлено на ряде урановых (Маныбайское, Онкажинское, Усть-Уюкское) и редкометалльных (Калгутинское) месторождений [14–16]. В этом случае формируется единая минеральная ассоциация основных рудообразующих и благороднометалльных минералов.

В составе руд отмечается присутствие разнообразных самородных минералов (золота, серебра, висмута, мышьяка, свинца, углерода), органических веществ и аномальные концентрации значительного количества элементов, характеризующихся различными геохимическими свойствами: As, Zn, Cu, Hg, Be, Co, Ni, Bi, Pb, Mo, Sb, Ag, Se, TR, Zr, Ti.

В процессе рудообразования вещественное влияние глубинного флюида нарастает и достигает максимума во время формирования минеральных ассоциаций основных стадий минералообразования, где и происходит накопление благородных элементов.

Особенностью этих месторождений является молодой позднепалеозой-раннемезозойский возраст оруденения, значительно оторванный от времени формирования основных золоторудных и урановорудных месторождений. Их формирование, по-видимому, связано с активным развитием Азиатского плюма в пермь-триасовое время.

Глубинные мантийные флюиды имеют слабодифференцированный характер. В их составе отмечается высокое содержание разнообразных газовых компонентов, в том числе водорода и различных углеводородов. Во флюиде присутствуют металлы, определяющие промышленную ценность и геохимические особенности оруденения. Подобные минералого-геохимические особенности характерны для месторождений «пятиметалльной формации» Рудных Гор и, следует это отметить, имеющих герцинский возраст [17].

В связи с этим примечателен факт выявления золото-урановой с ртутью ассоциации в гидротермальных образованиях зон спреддинга срединно-атлантических хребтов [18,19]. Содержание урана (уранинит), золота и ртути в этих образованиях достигает (г/т) 1590 (U), 50 (Au) и 9,15 (Hg). Данные изотопных исследований указывают на комплексную металлоносность глубинного флюида, связанного с мантийным плюмом Зеленого Мыса.

Для урановых и редкометалльных месторождений, на которых выявлена благороднометалльная минерализация, характерны выраженные особенности минералого-геохимического состава руд.

Для руд месторождений характерен широкий видовой набор рудных минералов, представленных оксидами, титанатами, сульфидами, сульфосолями, селенидами и самородными формами металлов. Характерно присутствие самородных минералов.

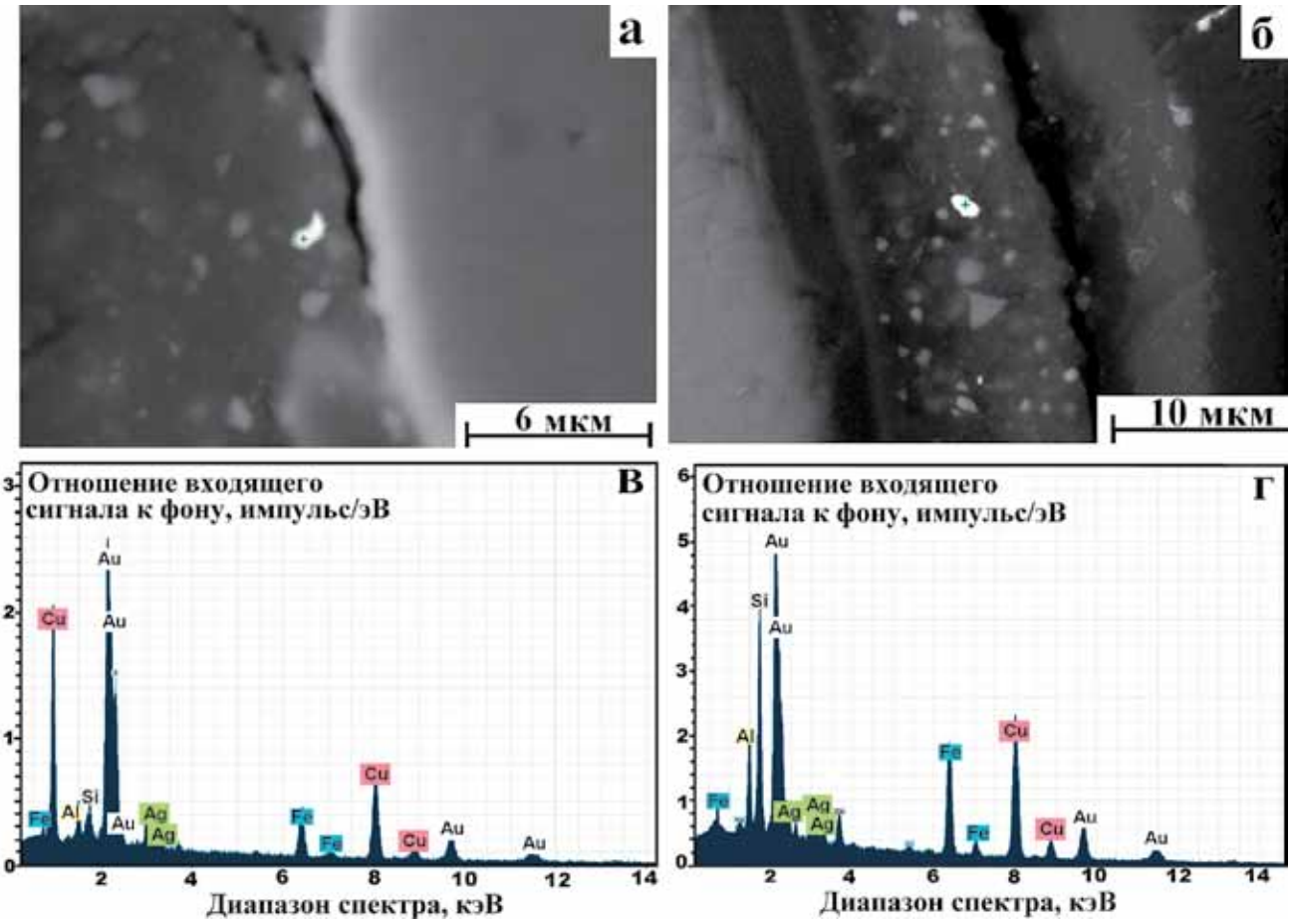


Рис. 1. Самородное золото в вольфрамите и его спектр (а, в) и в пирите и его спектр (б, г). Калгутинское месторождение

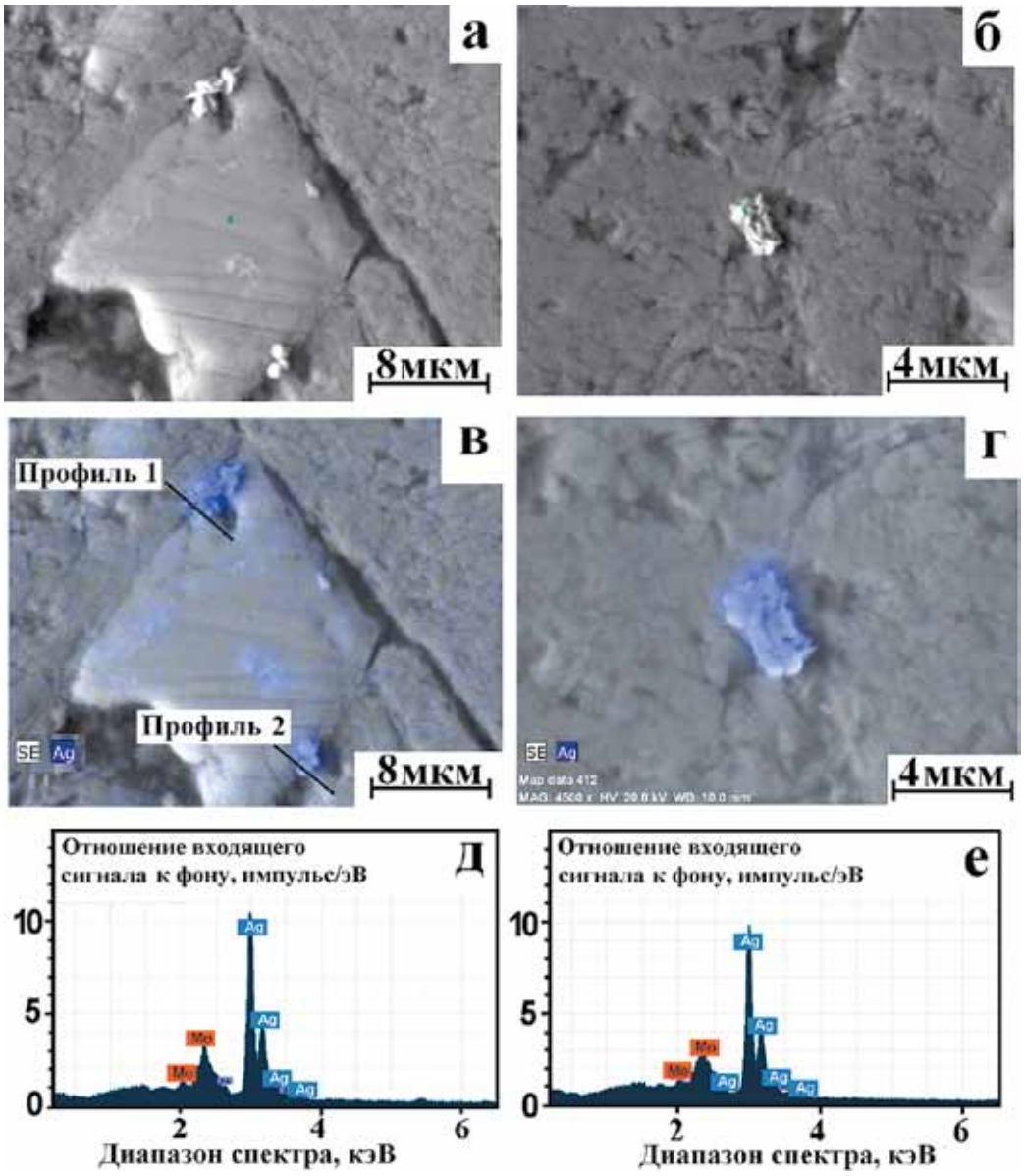


Рис. 2. Выделения самородного серебра в молибдените жилы № 87 (а), Мо-штока-1 (б), в режиме картирования (в, г) и энергодисперсионные спектры (д, е).

Калгутинское месторождение

Наряду с золотом на урановых месторождениях часто встречаются самородное серебро, свинец, медь, мышьяк, висмут, графит, а в редкометалльных – серебро, висмут, медь и графит (рис. 1, 2).

Многообразен геохимический спектр руд: помимо основных рудогенных компонентов отмечаются высокие концентрации элементов, относящихся к различным геохимическим группам – лито-, халько-, сидерофильным. В геохимическом спектре руд урановых и уран-молибденовых месторождений наряду с Au фиксируются высокие концентрации As, Zn, Cu, Hg, Be, Zr, Ti, Co, Ni, Bi, Pb, Mo, Sb, Ag, Se, TR. А в спектре редкометалльных руд отмечаются Nb, Sc, Cu, Zn, Cd, Sb, Hg, Te, Cs, Ti, Be, Zr, U, Th, TR, Ag, ЭПГ, Cr.

Следует подчеркнуть, что минералого-геохимическая характеристика руд, выполненная по рядовым пробам, может быть существенно дополнена анализом мономинеральных фракций основных рудных минералов. Так, электронно-микроскопические исследования одного из зерен арсенопирита золоторудного месторождения Бакырчик [20] показал на-

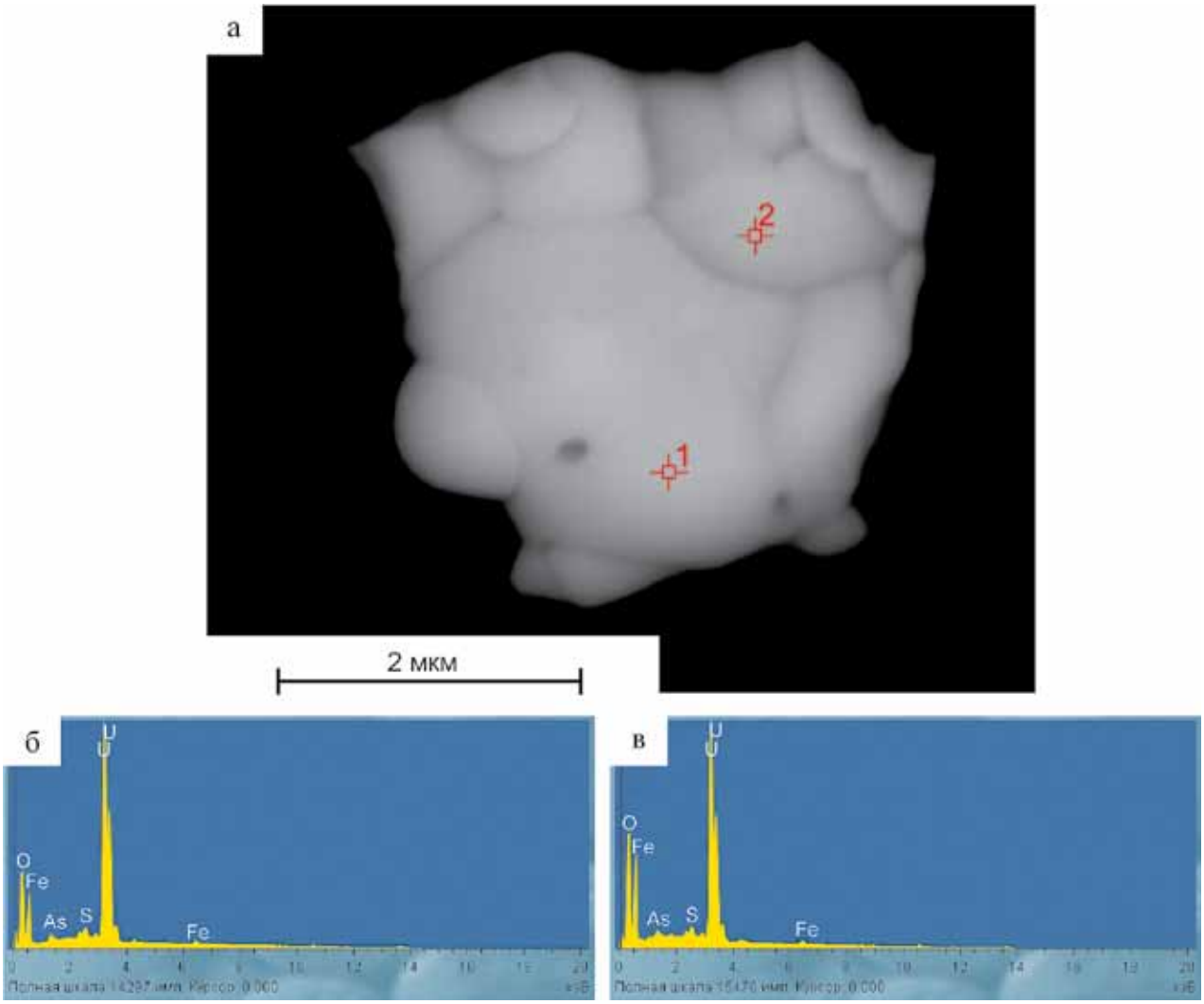


Рис. 3. Зерно настурана (а) из арсенопирита месторождения Бакырчик и энергодисперсионные спектры, измеренные в точках 1(б) и 2 (в)

личие в нем характерных почковидных микровключений настурана (рис. 3). При этом в рудах содержание урана составляет 0,4–2,5 г/т, что соответствует кларковому уровню.

Выполненные исследования показывают, что благороднометалльная минерализация широко распространена в рудах гидротермальных урановых и редкометалльных месторождений Центральной Азии. Появление высоких концентраций элементов определяется тремя главными факторами: совмещением разноформационного и полихронного оруденения в пределах одних рудоконтролирующих структур; унаследованием высокой золотоносности рудовмещающих пород; металлоносностью рудообразующих флюидов глубинного (мантийного) происхождения. Изолированное влияние этих факторов можно проследить только в рамках отдельных рудных тел и реже месторождений. В рудных полях и узлах они проявляются комплексно.

Все фотографии, используемые в статье, предоставлены авторами.

Литература

1. ***Сафонов Ю.Г.***
Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенический потенциал // Геология рудных месторождений. – 2003. – Т. 45, № 4. – С. 305–320.

2. ***Поцелуев А.А.***
Закономерности формирования благороднометалльного оруденения в гидротермальных урановых и редкометалльных месторождениях (на примере Алтае-Саянской и Северо-Казахстанской областей): Автореферат диссертации доктора геолого-минералогических наук. – Томск. – 2008. – 41 с.

3. ***Поцелуев А.А., Рихванов Л.П.***
Благороднометалльное оруденение в гидротермальных урановых месторождениях Центральной Азии / Материалы III Международной конференции. – Томск, 23–27 июня 2009 г. – Томск: STT. – 2009. – С. 474–480.

4. ***Бабкин Д.И., Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С.***
Золото и серебро в рудах Калгутинского месторождения (Горный Алтай) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 1. – С. 53–57.

5. ***Поцелуев А.А., Рихванов Л.П., Николаев С.Л., Зорин Ю.М.***
Редкие элементы и золото в месторождениях олова Северо-Казахстанской рудной провинции // Известия Вузов: Геология и разведка. – 1997. – №3. – С. 74–80.

6. ***Поцелуев А.А., Перегудов В.В., Бабкин Д.И. Ананьев Ю.С.***
Золото в рудах редкометалльного месторождения Сырымбет (Северный Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 1. – С. 41–45.

7. ***Дементьев В.Е., Гудков С.С., Николаев Ю.Л.***
Перспективы вовлечения в промышленную эксплуатацию вторичных запасов благородных металлов на базе лежалых хвостов Джидинскоговольфрамо-молибденового комбината / Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплекса Республики Бурятия: Материалы конференции 1–2 апреля 1999 г. – Улан-Уде: БНЦ СО РАН. – 1999. – С. 127–130.

8. ***Холмогоров А.И.***
Золото-редкометалльные грейзены глубоких горизонтов Депутатского оловорудного узла / Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология. Тезисы Третьего Всероссийского симпозиума с международным участием. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. – 2004. – С. 228–230.

9. ***Кузнецов В.М., Жигалов С.В.***
Золотоносность Лазовского оловорудного узла / Золото северного обрамления Пацифика. Международный горно-геологический форум. Тезисы докладов Всеколымской горно-геологической конференции, посвященной 80-летию Первой Колымской экспедиции Ю.А. Билибина (Магадан, 10–14 сентября). – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. – 2008. – С. 83–84.

10. ***Дистанов Э.Г., Оболенский А.А.*** Металлогеническое развитие Центрально-Азиатского подвижного пояса в связи с его геодинамической эволюцией // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35, № 7–8. – С. 252–269.

11. ***Мельников В.И.***
Вещественный состав руд и последовательность минералообразования на золотых и урановых объектах Заангарской части Енисейского кряжа // Геология месторождений урана, редких и редкоземельных металлов – М.: ВИМС. – 1992. – Вып. 133. – С. 49–59.

12. ***Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М.***
Типизация золоторудных месторождений складчатых об-ластей миогеосинклинального типа // Руды и металлы. – 1995. – № 5. – С. 54–71.

13. ***Поцелуев А.А., Рихванов Л.П., Николаев С.Л.***
Редкие элементы и золото в месторождениях Северо-Казахстанской урановорудной провинции // Известия Томского политехнического уни-верситета. – 2001. – Т. 304, вып. 1. – С. 197–209.

14. ***Спиридонов Э.М., Широкова Г.М.***
О новом типе золото-урановой жильной минерализации (Аксу-Маныбайский рудный узел) / Материалы по геологии урановых месторождений. Инфор-мационный сборник. – М.: ВИМС. – 1988. – Вып. 111. – С. 73–77.

15. ***Мельников В.И., Варданянц А.В.***
Особенности минералогии гидротермального этапа в молассоидных осадочных толщах Онкажинского урановорудного месторождения в Тувинском прогибе // Геология месторождений урана, редких и редкоземельных металлов – М.: ВИМС. – 1987.– Вып. 108. – С. 82–90.

16. ***Поцелуев А.А., Бабкин Д.И., Козьменко О.А.***
Металлы во флюидных включениях грейзеновых месторождений (Калгутинское месторождение) // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 5. – С. 26–32.

17. ***Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В.***
Зарубежные месторождения урана. – М.: Недра. – 1983. – 320 с.

18. ***Жмодик С.М., Жмодик А.С., Акимцев В.А.***
Золото-урановая ассоциация в гидротермальныхсистемах Срединно-Атлантического хребта // Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах. Материалы Всероссийской конференции с иностранным участием, посвященной 50-летию Сибирского отделения РАН и 80-летию чл.-кор. РАН Федора Петровича Кренделева. – Улан-Уде: Изд-во БНЦ СО РАН. – 2007. – С. 138–139.

19. ***Жмодик С.М., Акимцев В.А., Жмодик А.С.,***
Шестель С.Т. Минералого-геохимические осо-бенности процесса взаимодействия гидротермальных растворов с базальтами (зона сочленения Срединно-Атлантического хребта и трансформа Зеленого Мыса) / С.М. Жмодик, // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37, № 1. – С. 162–182.

20. ***Ананьев Ю.С., Бабкин Д.И., Поцелуев А.А.***
О первой находке настурана на золоторудном ме-сторождении Бакырчик / Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии. – Томск: Томский ЦНТИ – филиал ФГУП «РАЭ» минэнерго Росии. – 2012. – Вып 2. – С. 86–89.

Реконструкция путей и условий миграции рудоносных гидротермальных растворов: структурно-геологический и термобарогеохимический подход

Петров В.А., Устинов С.А., Полуэктов В.В., Прокофьев В.Ю.

Рассмотрены пространственно-временные закономерности формирования флюидопроводящих каналов рудообразующих гидротермальных систем в поле напряжений-деформаций-температур. В качестве индикаторов преобразований используются планарные системы флюидных включений (ПСФВ). Показано, что сочетание методов структурной геологии, микроструктурного анализа и термобарогеохимии с привлечением данных по геодинамике и разрывной тектонике позволяет реконструировать пути и условия миграции рудоносных гидротермальных растворов, устанавливать хронологию флюидопроницаемости пород, определять динамику изменения физико-химических условий рудообразования на различных этапах тектогенеза.

Ключевые слова: гидротермальные растворы, микротектоника, микроструктурный анализ, термобарогеохимия, планарные системы флюидных включений.

The space-time regularities of formation of fluid transfer channels of ore-forming hydrothermal systems in the field of stress-deformations-temperatures are considered. As indicators of transformations the fluid inclusion planes (FIP) are used. It is shown that the combination of methods of structural geology, the microstructural analysis and a termobarogeochemistry with attraction of data on geodynamics and explosive tectonics allows to reconstruct ways and conditions of migration of ore-bearing hydrothermal solutions, to establish chronology of fluid permeability of rocks, to define dynamics of change of physical and chemical conditions of ore formation at various tectogenesis stages.

Keywords: hydrothermal solutions, microtectonics, microstructural analysis, thermobarogeochemistry, fluid inclusion planes.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-00504).
The work was financially supported by RFBR (grant № 12-05-00504).

ПЕТРОВ Владислав Александрович,
доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва.
Vladislav A. PETROV,
Dr. Sci. (Geol.–Miner.), Corresponding Member of RAS, Deputy Research Director at the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, e-mail: vlad243@igem.ru.

ПОЛУЭКТОВ Валерий Викторович,
научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва.
Valery V. POLUEKTOV,
research scholar at the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, e-mail: vapol@igem.ru.

УСТИНОВ Степан Андреевич,
младший научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва.
Stepan A. USTINOV,
Junior Research Fellow at the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, e-mail: stevesa@mail.ru.

ПРОКОФЬЕВ Всеволод Юрьевич,
доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва.
Vsevolod Y. PROKOFYEV,
Dr. Sci. (Geol.–Miner.), leading research scientist at the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, e-mail: vpr@igem.ru

Решение проблемы эволюции рудообразующих гидротермальных систем при неоднократной активизации тектономагматических процессов во многом связано с установлением механизмов формирования протяженных субвертикальных флюидопроводящих каналов и определением условий фильтрации гидротермальных рудоносных растворов из области их зарождения на больших глубинах при высоких P-T параметрах в область рудоотложения в верхней части земной коры.

Образование транскоровых флюидопроводящих каналов – процесс сложный, многостадийный и во многом не до конца изученный. Предполагается, что на глубинах нижней-средней коры деформирование пород происходит по законам пластичности, а в верхней части земной коры реализуется механизм упруго-хрупкого разрушения пород. Следовательно, разломно-трещинно-поровый канал, проницаемый для гидротермальных рудоносных растворов, обладает специфическими чертами строения на различных глубинах рудообразующих флюидно-магматических систем [1, 2]. Установить характер изменения структуры флюидопроводящего канала на всем его протяжении – задача, несомненно, важная. Однако, не менее, а может быть, и более важным (с точки зрения фундаментальных и прикладных аспектов) является реконструкция пространственно-временной связи между деформацией массивов пород, их флюидной проницаемостью и минералообразованием в трещинно-поровом объеме зоны рудоотложения.

Один из путей решения этого вопроса – реконструкция динамики формирования деформационных микроструктур в зависимости от параметров поля напряжений в сочетании с определением свойств палеофлюидов, которые фиксируются (запечатываются) в микроструктурах как вторичные газо-жидкие включения. Под вторичными понимаются такие включения, которые образуются в течение какого-либо процесса, имевшего место после того, как кристаллизация минерала-хозяина была завершена [3].

Цепочки флюидных включений (ФВ) группируются в отчетливо проявленные системы, что свидетельствует о длительности процесса прохождения флюидов через матрицу горной породы на фоне ориентированного стресса [4, 5]. Данные системы в практике структурно-геологических исследований получили название «планарные системы флюидных включений» (ПСФВ) [6, 7]. Они используются нами в качестве индикаторов эволюции рудообразующих гидротермальных систем, т.к. формируются в породообразующих минералах как микротрещины отрыва, которые в зависимости от этапа тектонического развития массива пород аккумулируют флюиды разного состава и свойств [8, 9]. ПСФВ очень хорошо визуально отличаются в шлифе от других типов микротрещин, в том числе открытых (ОТ) или частично заполненных минерализацией (рис. 1).

Кристаллографические особенности минералов практически не сказываются на ориентировке ПСФВ [10], поэтому их сохранность в породах, и, следовательно, возможности изучения, как правило, высоки. Это особенно характерно для кварца, ко-

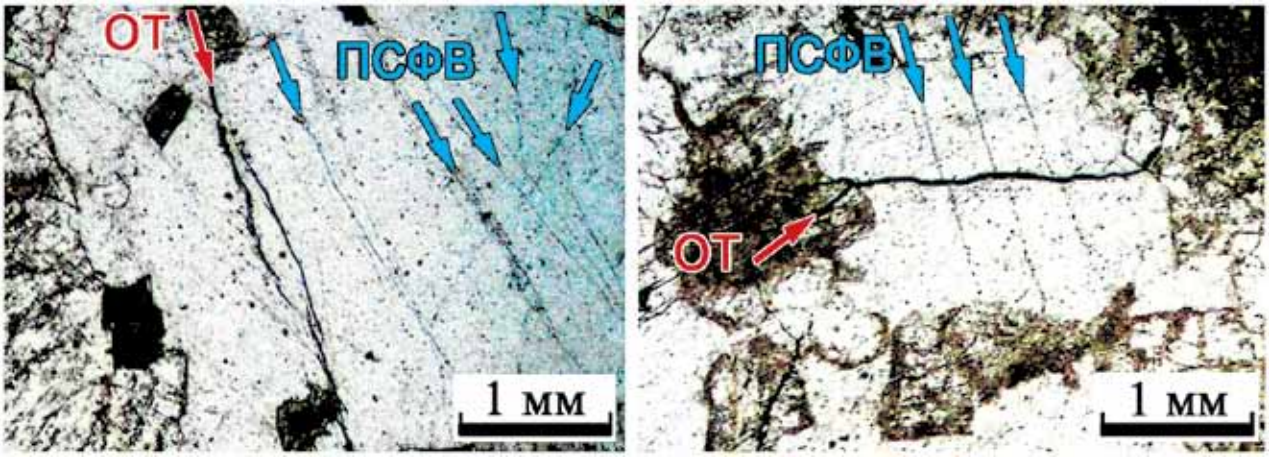


Рис. 1. Внешний облик различных генетических типов микротрещин в шлифах: открытые микротрещины (ОТ) или микротрещины, выполненные рудной минерализацией и планарные системы флюидных включений (ПСФВ)

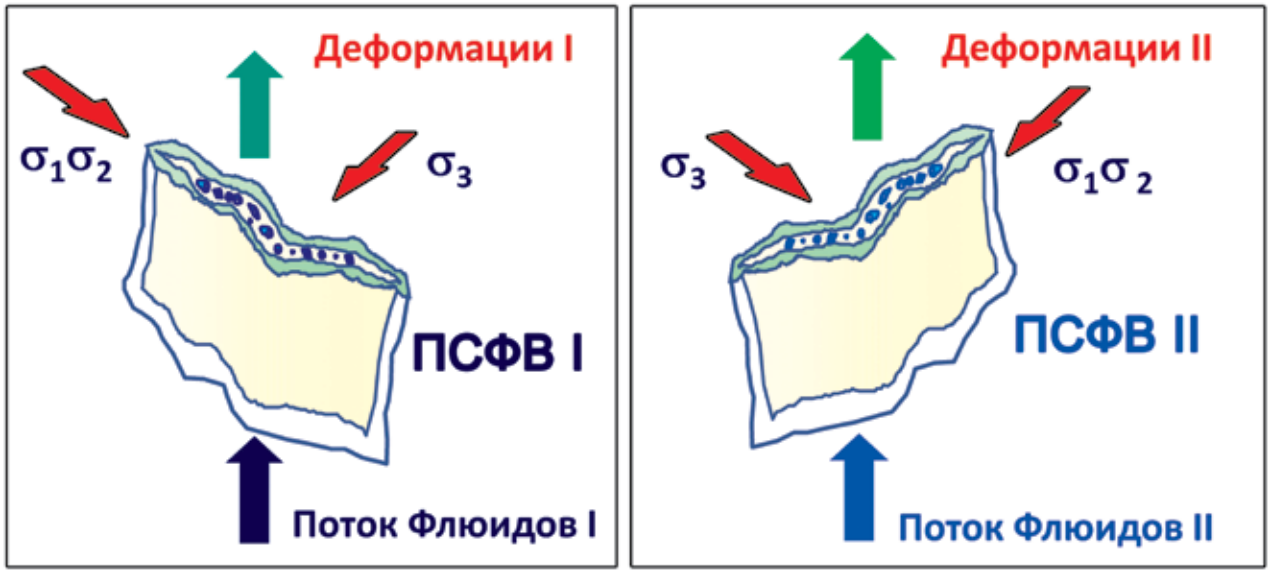


Рис. 2. Взаимосвязь между ориентировкой планарных систем флюидных включений (ПСФВ) различных генераций и этапами изменения поля напряжений-деформаций: σ_3 – ось наименьшего сжатия, σ_1 σ_2 – плоскость вектора максимальной проницаемости, вдоль которой происходит миграция флюидов

торый демонстрирует наиболее соотносимую с геологическим временем скорость формирования включений [11]. В полевых шпатах и карбонатах сохранность ПСФВ не столь высока в связи с меньшей устойчивостью этих минералов к гидротермально-метасоматическим преобразованиям, процессам выщелачивания, выветривания и т.д.

Пространственная ориентировка ПСФВ меняется при перестройке поля напряжений. На начальных этапах деформаций в породах формируются микротрещины отрыва, ориентированные перпендикулярно к оси наименьшего сжатия σ3 (принято, что сжимающие напряжения положительные: σ1 ≥ σ2 ≥ σ3). Вектор максимальной проницаемости структур лежит в плоскости σ1 σ2, вдоль которой происходит миграция флюидов. С течением времени и в результате изменения тектонической обстановки флюидопроводящие микротрещины испытывают компрессию и закрываются, «запечатывая» ПСФВ первой генерации.

Смена тектонической обстановки приводит к новому этапу деформаций, что неизбежно отражается на ориентировке ПСФВ второй генерации (рис. 2), а изменение термобарических и физико-химических условий – на составе и свойствах включений. В случае нового этапа деформаций формируются ПСФВ третьей генерации и т.д. Как правило, планарные системы каждой последующей генерации секут системы предыдущих генераций.

Хронология развития ПСФВ и их пространственные параметры (простирание, угол падения) устанавливаются методом микроструктурного анализа (используется универсальный столик Федорова) [12] или с помощью специального компьютерного программного обеспечения. Оно разработано для статистического анализа двумерных цифровых изображений шлифов, изготовленных из ориентированных образцов пород [13, 14], что в дополнение к пространственным параметрам позволяет рассчитать основные фильтрационные (апертура, пористость, проницаемость) характеристики пород.

Состав и свойства ГЖВ (температура, давление, соленость, содержание H_2O, CO_2, CH_4, N_2 и т.д.), связанные с физико-химическими процессами в системе «флюид-порода», устанавливаются с помощью микротермометрических измерений и рамановской спектроскопии [15].

Определение ориентировки осей палеонапряжений на региональном и локальном уровнях с помощью методов стресс-анализа разрывных структур [16, 17, 18 и др.] завершает процедуру воссоздания тектонической истории региона и путей миграции флюидов.

В этом контексте в районе Стрельцовской кальдеры (Юго-Восточное Забайкалье), которая вмещает уникальные по запасам уран-молибденовые

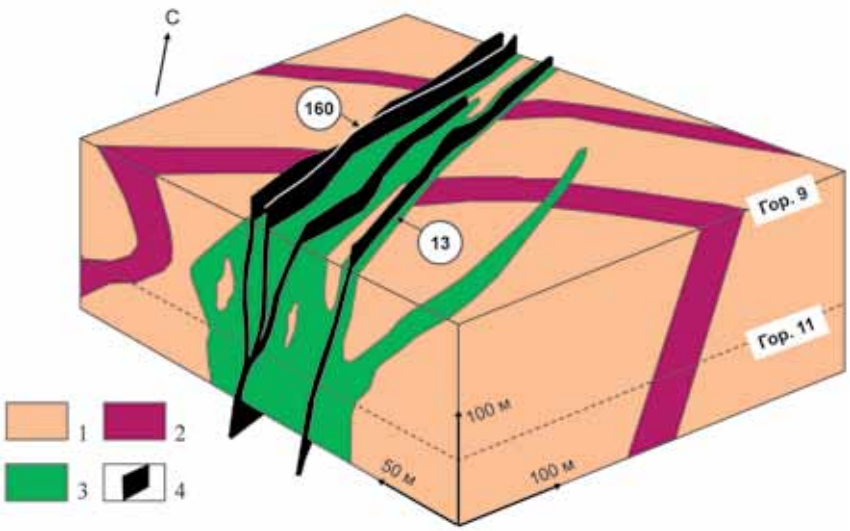


Рис. 3. Упрощенная трехмерная структурная модель нижней части месторождения Антей:
1 – вмещающие граниты,
2 – палеозойские калишпатиты и альбититы,
3 – мезозойские гидрослюдизиты,
4 – плоскости разломов (указаны номера)

месторождения Стрельцовского рудного поля [19], проведено изучение глубинных, среднеглубинных и приповерхностных сегментов флюидопроводящих разломов. Основное внимание уделим результатам изучения приповерхностных сегментов разломов в гранитном фундаменте кальдеры, так как именно здесь они становятся рудовмещающими, локализуя жильно-штокверковые зоны с богатой урановорудной минерализацией.

Пространственно-временные закономерности формирования таких зон изучены на уникальном по запасам месторождении Антей, которое сформировалось в позднем мезозое в фундаменте кальдеры

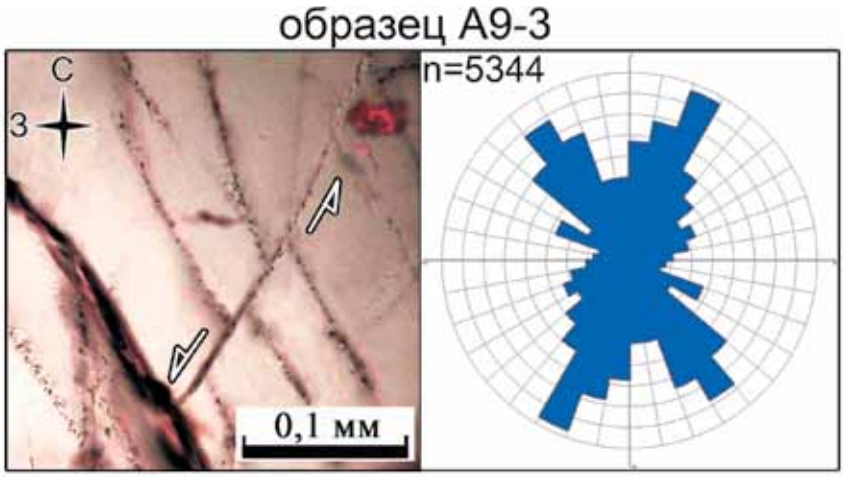


Рис. 4. Пример взаимоотношений различных генераций ПСФВ, наблюдаемых в шлифах: система микротрещин СЗ-ЮВ простирания, образованная в первую очередь, сечется системой микротрещин СВ-ЮЗ простирания, что приводит к микросдвиговым тектоническим смещениям

под чехлом выполняющих ее вулканогенных пород. Наибольшее внимание в исследованиях было уделено физико-химическим условиям минералообразования на различных этапах деформаций пород с использованием методов микроструктурного и микротермометрического анализов.

Вмещающие породы месторождения представлены в основном биотитовыми и лейкократовыми гранитами, а также палеозойскими высоко- и мезозойскими низкотемпературными метасоматитами – гидрослюдизитами [20]. Последние прослеживаются вдоль субмеридиональных копланарных разломов, которые вмещают жильно-штокверковые урановые руды. Ориентированные в пространстве образцы для изучения параметров микроструктур (апертура, ориентировка, минерализация и др.) отбирались по профилям. Профили располагались друг над другом на глубинах от поверхности ~550 м (9 горизонт) и 670 м (11 горизонт) от поверхности вкрест простирания рудовмещающих разломов 13 и 160 (рис. 3).

Для микроструктурного анализа ПСФВ использовался микроскоп Olympus BX-51 (Япония) с цифровой камерой Olympus Camedia C7070zoom, что обеспечило изучение микроструктур с апертурой более 5 мкм. По двумерным цифровым изображениям шлифов строились розы-диаграммы микроструктур, на которых выделись системы (генерации) ПСФВ разных направлений. В ряде случаев обнаружены микроамплитудные смещения одной системы другой (рис. 4).

При построении роз-диаграмм учитывалось не только количество ПСФВ той или иной ориентировки, но и их протяженность (длина луча пропорциональна сумме длин ПСФВ определенного направления). Изучение флюидных включений, «захваченных» в каждой планарной системе, проводилось с помощью микротермометрического анализа на измерительном комплексе, включающем микротермокамеру THMSG-600 (фирма Linkam, Англия) и микроскоп Olympus BX-51

(Япония), снабженный длиннофокусными объективами, видеокамерой и управляющим компьютером. Комплекс имеет автоматический режим нагревания-охлаждения образца со скоростью от 0,1 до 90 °/ мин и позволяет в режиме реального времени производить измерения температур фазовых переходов внутри включений в рабочем температурном интервале от –196 до 600°С, наблюдать за ними при больших увеличениях и получать цифровые микрофотографии фазовых переходов в исследуемых включениях. Приборная точность измерений соответствовала ± 0,1°С.

В итоге результаты микроструктурного анализа ПСФВ были дополнены информацией о свойствах флюидных включений, захваченных в планарных системах микротрещин различных генераций, которые группируются в четыре кластера (рис. 5).

Микротрещины первого (I) кластера имеют субширотную (ВСВ-ЗЮЗ) ориентировку. Эти микротрещины, образовавшиеся вначале гидротермального процесса в обстановке субширотного сжатия, захватили флюидные включения с самыми высокими из установленных температурами гомогенизации (350–320°С). По уровню температур данный кластер соответствует процессам грейзенизации или стадии формирования высокотемпературных метасоматитов (калишпатитов и альбититов), что еще предстоит уточнить.

Второй кластер (II) образован микротрещинами СЗ-ЮВ простирания. Температуры гомогенизации флюидов, захваченных в этих планарных системах, варьируют от 280°С до 240°С. В третий (III) кластер входят микротрещины СВ-ЮЗ простирания, в которых сконцентрированы флюидные включения с температурами гомогенизации от 260 до 200°С. Совокупный интервал температур II и III кластеров соответствует температурам протекания метасоматического процесса – предрудной гидрослюдизации (250–200°С) [21]. Характерно, что микротрещины этих кластеров были сформированы в поле напряжений с соответствующи-

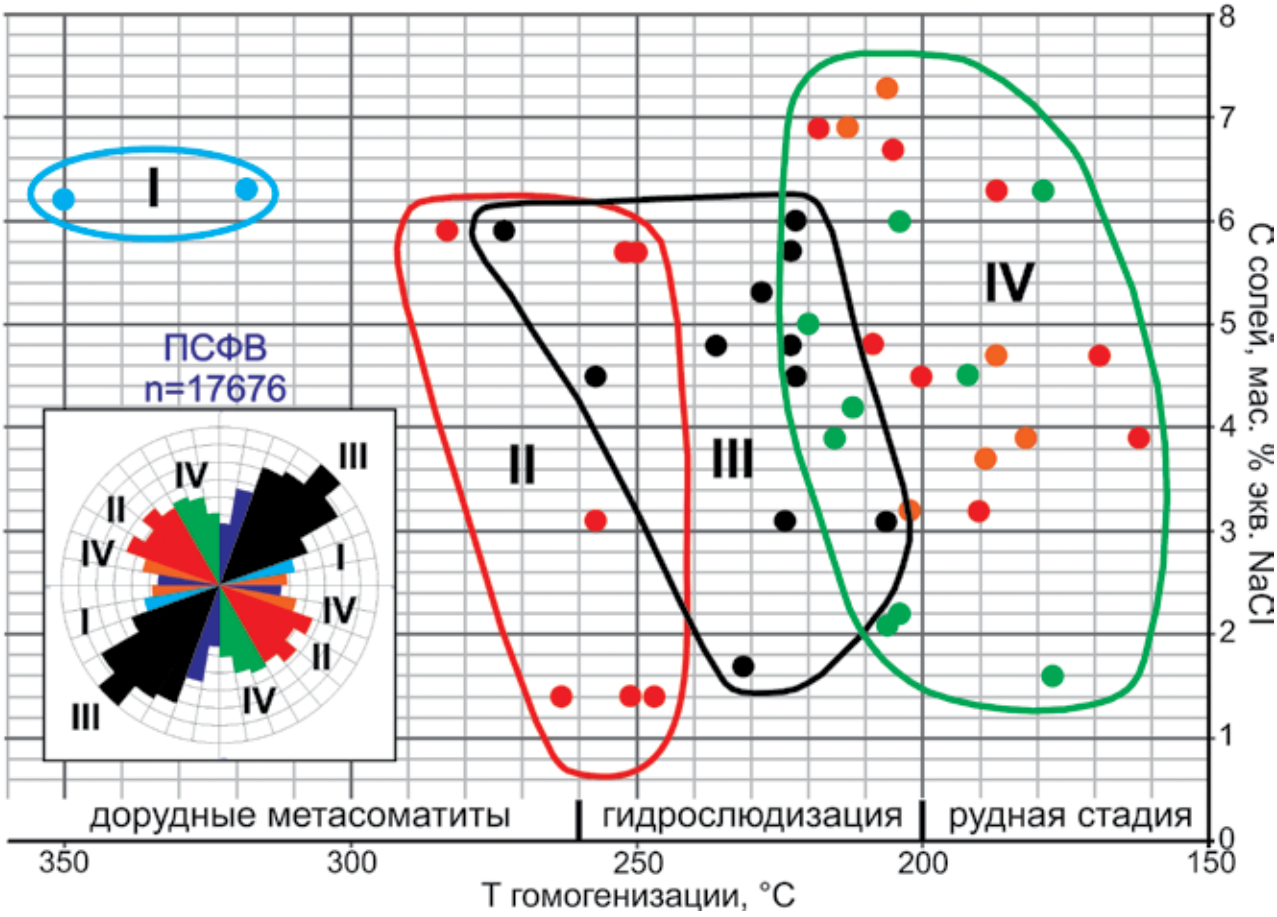


Рис. 5. Кластеризация (I – IV) флюидных включений в кварце месторождения Антей по ориентировке в пространстве, солености (масс. % экв. NaCl) и температуре гомогенизации (С°).
На врезке представлена роза-диаграмма ПСФВ соответствующих кластеров

ми СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ ориентировками векторов сжатия. Однако возможен вариант, когда микроструктуры формировались как «динамопара» при субмеридиональной ориентировке вектора сжатия.

Четвертый (IV) кластер составляют микротрещины трех направлений: СЗ-ЮВ, ССВ-ЮЮЗ и ВСВ-ЗСЗ. Все они «захватили» флюидные включения, имеющие температуру гомогенизации в интервале от 220 до 160°С, что соответствует начальным стадиям уранового минералообразования [22]. Сочетание в одном кластере разноориентированных планарных систем указывает на то, что рудовмещающая разломно-трещинная структура вступила в режим объемной дезинтеграции на фоне гидроразрыва. В этих условиях мог реализоваться пульсационно-ритмичный («клапанный») механизм поступления рудоносных растворов в сегменты растяжения, оптимально ориентированные в поле напряжений [23], обеспечивающий подток обогащенных кислородом метеорных вод и их смешение с нагретыми гидротермальными растворами в зоне рудоотложения при наличии гидравлической связи разломов с поверхностью. На то, что в формировании гидротермальных минеральных ассоциаций помимо магматических флюидов участвовали и метеорные растворы, указывают данные по изотопному составу кислорода и водорода в серицитах и иллитах месторождения [21].

Таким образом, приповерхностные сегменты флюидопроводящих разломов, вмещающие богатые урановые жильно-штокверковые руды месторождения Антей в фундаменте Стрельцовской кальдеры, формировались, развивались, переходили в латентное состояние и вновь реактивировались в нестационарном поле напряжений-деформаций в соответствии, очевидно, со стадиями сейсмического цикла. Изменения напряженно-дефомированного состояния колонны флюидопроводящих пород в сочетании с вариациями температурного режима создавали условия для пульсационно-ритмичного и фокусированного поступления потоков рудоносных растворов в сегменты растяжения разломно-трещинных структур, оптимально ориентированные в тектоническом поле напряжений, и смешение этих потоков с метеорными водами в зоне рудоотложения.

Сочетание методов структурной геологии, микроструктурного анализа планарных систем флюидных включений и термобарогеохимии с привлечением данных по геодинамике и разрывной тектонике позволяет реконструировать пути и условия миграции рудоносных гидротермальных растворов, устанавливать хронологию флюидопроницаемости пород, определять динамику изменения термобарических и физико-химических условий рудообразования на различных этапах тектогенеза. Этот испытанный на практике подход будет использоваться нами в дальнейшем при изучении пространственно-временных закономерностей формирования глубинных и среднеглубинных сегментов флюидопроводящих разломов рудообразующих флюидно-магматических систем.

Все фотографии, используемые в статье, предоставлены авторами.

Литература

1. ***Шерман С.И., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И.***
Вертикальная зональность и флюидная проница-емость зон развивающихся разломов // Геология рудных месторождений. – 1991. – № 5. –С. 13–20.

2. ***Летников Ф.А.***
Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика. – 2006. –Т. 47, № 12. – С. 1296–1308.

3. ***Roedder E.***
Fluid Inclusions // Reviews in Mineralogy. – 1984. – N 12. – 644 p.

4. ***Wilkinson J.J.***
Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Lithos. – 2001. –N 55. – P. 229–272.

5. ***Boullier A.M.***
Fluid inclusions: tectonic indicators // Journal of Structural Geology. – 1999. – N 21. – P. 1229–1235.

6. ***Tuttle O.F.***
Structural petrology of planes of liquid inclusions. Journal of Geology. 57. – 1949. – P. 331–356**.**

7. ***Lespinasse M.***
Are fluid inclusion planes useful in structural geology? // Journal of Structural Geology. – 1999. – N 21. –P. 1237–1243.

8. ***Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й.***
Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 2. – С. С. 99–126.

9. ***Петров В.А.***
Тектонофизические и структурно-петрофизические индикаторы процессов миграции флюидов в разломных зонах и методы из изучения // Современная тектонофизика: Методы и результаты. – М.: ИФЗ РАН. – 2011. – С. 94–108.

10. ***Lespinasse M., Cathelineau M.***
Fluid percolations in a fault zone: a study of fluid inclusion planes (FIP) in the St Sylvestre granite (NW French Massif Central) // Tectonophysics. – 184. – 1990. – P. 173–187.

11. ***Smith D.L., Evans B.***
Diffusional crack healing in quartz // J. Geophys. Res. – 1984. – N 89. – V.P.4125–4135.

12. ***Лукин Л.И., Чернышев В.Ф., Кушнарев И.П.***
Микроструктурный анализ. – М.: Наука. – 1965. – 124 с.

13. ***Lespinasse M., Désindes L., Fratczak P., Petrov V.***
Microfissural mapping of natural cracks in rocks: implications on fluid transfers quantification in the crust // Chemical Geology Spec. Publ. – 2005. – 223. – P. 170–178.

14. ***Устинов С.А., Петров В.А.***
Метод картирования и определения фильтрационных параметров систем микротрещин в горных породах на основе применения ГИС-технологий // Сб. тезисов конференции молодых ученых и специалистов. – СПб: ВСЕГЕИ. – 2011. –С. 40–45.

15. ***Мельников Ф.П., Прокофьев В.Ю., Шатагин Н.Н.***
Термобарогеохимия: Учебник для вузов. –М.: Академический проект. – 2008. – 222 с.

16. ***Гзовский М.В.***
Основы тектонофизики. – М.: Наука. – 1975. – 536 с.

17. ***Angelier J.***
Determination of the mean principal stresses for a given fault population // Tectonophysics. – 1979. – N 56. – P. 17–26.

18. ***Расцветаев Л.М.***
Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. – М.: Наука. – 1987. – С. 173–230.

19. ***Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В.***
Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. – Иркутск: ГК «Геологоразведка». – 2007. – 260 с.

20. ***Лаверов Н.П., Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Хаммер Й., Бурмистров А.А., Щукин С.И.***
Урановое месторождение Антей - природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 5. – С. 387–413.

21. ***Андреева О.В., Головин В.А.***
Метасоматические процессы на урановых месторождениях тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40, №3. – С. 205–220.

22. ***Наумов Г.Б., Мироненко М.В., Салазкин А.Н. и др.***
Новые данные по геохимическим условиям образования месторождений Стрельцовского рудного поля и их практическое значение //Материалы по геологии урановых месторождений. Вып. 93. – М.: ВИМС. – 1985. – С. 65–82.

23. ***Петров В.А.***
Роль сейсмодеформаций в формировании жильно-штокверковых гидротер-мальных месторождений // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования.– М.: ИГЕМ РАН. – 2010. – С. 290–291.

Особенности аккумулирования молибдена, вольфрама, меди и рения в биогеохимической пищевой цепи

Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Данилова В.Н., Хушвахтова С.Д., Буряк А.К., Пыцкий И.С., Хабаров В.Б.

В процессе биогеохимических исследований W-Mo и Mo-Cu рудных ландшафтов Северного Кавказа (Тырныауз) и Забайкальского края, а также фоновых территорий было установлено, что вольфрам и рений накапливаются не только в растениях или почве, но и включаются в фермент ксантиноксидазу животных. При увеличении концентраций металлов в среде, их миграция в организмы заметно возрастает в рудных зонах.

Ключевые слова: биогеохимия, вольфрам, молибден, медь, рений, ксантиноксидаза.

In the course of biogeochemical studies of W-Mo ore landscapes of the North Caucasus (Tyrnyauz) and background areas tungsten and rhenium were found to accumulate not only in plants or soil, but also the element incorporation into an enzyme xanthine oxidase in animals was first determined. In case of increase in molybdenum and/or tungsten (rhenium levels in the environment, the migration of the latter metals enhances significantly in ore zones.

Keywords: biogeochemistry, tungsten, molybdenum, copper, rhenium, xanthine oxidase.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-00081).
The work was financially supported by RFBR (grant № 09-05-00081).

ЕРМАКОВ Вадим Викторович,
доктор биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии окружающей среды Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.
Vadim V. YERMAKOV,
Dr. Sci. (Biol.), Chief of the Environmental Biogeochemistry Laboratory, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, e-mail: vad-ermak@yandex.ru.

ХУШВАХТОВА Сабзбахор Давлатовна,
кандидат химических наук, научный сотрудник лабораторией биогеохимии окружающей среды Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.
Sabzbakhor D. HUSHVAKHTOVA,
Candidate of Chemical Sciences, research scholar at the Environmental Biogeochemistry Laboratory, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, e-mail: ermakov@geokhi.ru.

ТЮТИКОВ Сергей Федорович,
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.
Sergey F. TYUTIKOV,
Dr. Sci. (Biol.), Senior Research Fellow at the Environmental BiogeochemistryLaboratory, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, e-mail:ermakov@geokhi.ru.

БУРЯК Алексей Константинович,
доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией физико-химических основ хроматографии и хромато-масс-спектрометрии Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.
Alexey K.BURYAK, Doctor of Chemistry, Professor, Chief of the Laboratory of Physicochemical Principles of Chromatography and Chromatography-Mass Spectrometry, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, e-mail: AKBuryak@mail.ru.

ДАНИЛОВА Валентина Николаевна,
младший научный сотрудник лаборатории био-геохимии окружающей среды Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.
Valentina N. DANILOVA,
Junior Research Fellow at the Environmental Biogeochemistry Laboratory,Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, e-mail: valentinka19106@qip.ru.

ПЫЦКИЙ Иван Сергеевич,
кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических основ хроматографии и хромато-масс-спектрометрии Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.
Ivan S. PYTSKY,
Candidate of Chemical Sciences, research scholar at the Laboratory of Physicochemical Principles of Chromatography and Chromatography-Mass Spectrometry, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, e-mail: AKBuryak@mail.ru.

В.И. Вернадский предполагал, что живое вещество содержит практически все элементы таблицы Д.И. Менделеева [1]. Тем не менее, в течение длительного периода многие из них не были определены в составе организмов. В настоящее время не вызывает сомнения жизненно важная роль микроэлементов в многообразных функциях организма, что стало возможным благодаря современным физико-химическим методам исследования вещества (атомная абсорбция, ИСП-масс-спектрометрия и другие).

Молибден – необходимый микроэлемент практически для всех форм жизни. Существует ряд биогеохимических провинций с избытком молибдена в среде, где среди населения распространена особая форма эндемической подагры, а у животных диагностирован «молибденозис» – хронический молибденовый токсикоз [2].

На молекулярном уровне молибден и медь конкурируют за активный центр в изоферментах ксантиноксидазы (КСО) – ЕС 1.17.3.2 [2, 5, 6, 10]. Имеются данные об антагонизме молибдена, меди и вольфрама при действии их на активность КСО [2, 3]. Полагают, что в период дефицита кислорода в начальной биосфере вольфрам широко использовался микроорганизмами, но в последующем в кислородной атмосфере многие организмы утратили использование вольфрама в каталитических процессах [4]. Тем не менее, существует группа термофильных бактерий, где вольфрам-содержащие ферменты играют важную роль в их жизнедеятельности [6, 10].

Цель данной работы состояла в выяснении особенностей аккумулирования вольфрама и рения в растениях и организме животных на фоне различного содержания молибдена и меди в среде и кормах и возможного включения микроэлементов в КСО млекопитающих. При этом одна из задач исследования состояла в поиске территорий, обогащенных в разной степени молибденом, медью, вольфрамом и рением.

Полевые биогеохимические исследования были проведены летом 2009–2012 гг. на территории рудных ландшафтов W-Mo и Mo-Cu месторождений и фоновых территорий Восточного Забайкалья (Жирекенский, Бугдаинский, Шахтаминский карьеры) и Северного Кавказа (Тырныауз). Молоко, сливки и пахта были предоставлены нам жителями п. Кудиново (Московская область, фон), п. Заюково и г. Прохладный (Кабардино-Балкария, фон), а также с. Былым и г. Тырныауз (территории с повышенным содержанием молибдена и вольфрама в среде и кормах).

Определение меди, молибдена и железа в большинстве образцов проводилось методом атомной абсорбции и по стандартным методикам. Точность методик контролировали посредством анализа стандартных образцов почв, растений и волос. При элементном анализе почв, растений, тканей и жидкостей животных и фракций растворов использовали также масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой (модель 7500 CE фирмы “Aglient Technologis”, США). Измерения проводили в сканирующем режиме и количественно, используя стандартные растворы Cu, Mo, W, Re и Fe.

Проводились эксперименты с целью оценки воздействия металлов на активность КСО молока. Использовали фермент, выделенный из сливок (пахта). В этом случае применяли известный метод [5]. Последующую очистку КСО осуществляли на препаративной колонке (2,5 см x 30 см с TSKGEL HW-65F) и на полупрепаративной колонке TSKGEL G3000SW (0,78 см x 30 см, зернение сорбента 10 мкм). Фракции анализировали посредством гель-эксклюзионной ВЭЖХ на колонке BioSep-SEC-2000 (5 мкм, 145 А, 0,6 см x 30 см, ООН-2145-ЕО) с УФ-детектированием (212, 220, 260 и 280 нм). Элюент – 0,1 М фосфатный буфер (pH=6,8), расход – 0,35 мл/мин. Часть фракций с этой колонки анализировали посредством ААС и ИСП-масс-спектрометрии.

Анализ почв рудных районов показал значительное их обогащение молибденом (2–60 мг/кг), воль-

ХАБАРОВ Виктор Борисович,
кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических основ хроматографии и хромато-масс-спектрометрии Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.
Viktor B. KHABAROV,
Candidate of Chemical Sciences, Senior Research Fellow at the Laboratoryof Physicochemical Principles of Chromatography and Chromatography-Mass Spectrometry, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS,
e-mail: Khabarov@phyche.ac.ru.

Таблица 1. *Уровень содержания металлов в укосах растений из различных районов (в мг/кг сухой массы)*

Место отбора	Fe	Mo	Cu	W	Re
Кудиново (1)*	390	0,32	3,3	0,01	0,0016
Заюково (12)	234-392	0,5-2,2	3,0-13,4	0,03-0,22	0,0010-0,0018
Былым (6)	242-832	0,7-4,2	3,0-12,1	0,19-1,20	0,011-0,130
Тырныауз (18)	228-500	1,2-31,0	2,3-13,4	0,1-5,40	0,050-0,540

* В скобках – число образцов.

фрамом (10–102 мг/кг) и рением (0,002–0,054 мг/кг) что связано с гипергенными процессами. Латеральная миграция молибдена (и, возможно, вольфрама или рения) связана с некоторым увеличением водорастворимых форм микроэлементов, экстрагируемых ацетатным буфером [7, 9].

При биогеохимических исследованиях W-Mo рудных ландшафтов Северного Кавказа (Тырныауз) и фоновых территорий (Подмосковье) установлено не только аккумулирование металлов почвами, но и пастбищными растениями (табл. 1).

Концентрации железа в растениях отдельных территорий не имеют резких отличий и изменяются в пределах 200–500 мг/кг. По уровню содержания меди также не наблюдается заметных отличий между обследуемыми территориями. Однако по содержанию молибдена и вольфрама отличия весьма существенны. Наиболее интенсивно вольфрам и молибден аккумулируются в пределах рудной аномалии (Тырныауз, Былым). При этом Былым представляет собой вторичную биогеохимическую провинцию в результате сноса большого объема терригенного материала с рудных карьеров и участков Тырныауза.

Таким образом, как почвообразующие породы, так и почвы аномальных участков в различной степени содержат медь, молибден и вольфрам. При этом наиболее высокими концентрациями вольфрама характеризуются породы и почвы Тырныаузского рудного поля.

Указанные металлы были обнаружены не только в молоке коров, но и в пахте. При этом содержание их в пахте увеличивалось в 5–10 раз как в рудных, так и в контрольных районах. Так, в пахте из контрольного района (Кудиново) обнаружено (в мкг/л):

Таблица 2. *Содержание железа, меди, молибдена, вольфрама и рения в пахте животных из аномальных (Тырныауз, Былым) и фоновых (Кудиново, Заюково) территорий (мкг/л)*

Место отбора	Микроэлементы, мкг/л				
	Fe	Cu	Mo	W	Re
Кудиново	84	130	93	0,4	0,03
Заюково	102	148	189	0,1	0,02
Былым	68	110	174	2,0	0,32
Тырныауз	112	684	556	4,3	0,86

Cu – 130, Mo – 93, W – 0,4, Re – 0,03, а в пахте, полученной из молока коров в Тырныаузе: Cu – 684, Mo – 556, W – 4,3, Re – 0,86 мкг/л (табл. 2).

Учитывая известную связь молибдена и меди с ферментом ксантиноксидазой молока, данный энзим был выделен из пахты животных из контрольных районов (Кудиново, Заюково) и аномальных по молибдену и вольфраму территорий (Тырныауз, Былым). Был использован как известный способ выделения и очистки фермента [5], так и модифицированный нами. В этом случае для очистки фермента применяли последовательное хроматографирование экстракта на препаративной и полупрепаративной колонках TSKGEL HW 65F и TSKGEL G3000SW, поставляемых фирмой TOSOH BIOSCIENCE (Япония). Данный сорбент обладал большей эффективностью при разделении белков. Ряд фракций фермента был очищен посредством колоночной хроматографии на сорбенте TSKGEL и проанализирован на содержание белка, активность фермента КСО и содержание металлов. Очищенный фермент имел параметры, свойственные КСО молока (табл. 3).

В таблице приведены сравнительные данные по характеристике образцов КСО, выделенных нами и другими исследователями [5]. В последнем случае результаты исследований фермента на содержание вольфрама и рения отсутствуют в связи с использованием мало чувствительного и неселективного фотометрического метода (определение молибдена с цинк-дитиолом).

Следует заметить, что содержание вольфрама в ферменте сравнительно меньше, чем молибдена, но оно практически сравнимо с количеством меди. Количество вольфрама в очищенной фракции фермента снижается по сравнению с содержанием его в субстрате (пахте). Если учесть общее содержание вольфрама в пахте и во всей фракции очищенного фермента, то возникает предположение, что не весь металл включается в КСО молока. Возможно также, что часть вольфрама теряется в процессе очистки фермента. Кроме того, в процессе хранения выделенного фермента часть его гидролизуется до субъединиц, так как при ВЭЖХ энзима на хроматограммах появляются пики, соответствующие молекулярной массе 130 и 40 КДа, что согласуется с существующими данными [3].

Множественные формы КСО является важным механизмом регулирования процессов в организме и адаптаций. По-видимому, КСО (содержащая дитиоленовые связи), по аналогии с металлотионеинами, обогащенными SH-группами, образует многочисленные изоформы с рядом металлов (молибден, медь, вольфрам и рений). Активные центры изоферментов КСО заметно трансформируются в зависимости от геохимических условий (содержания и форм миграции молибдена, меди, вольфрама и рения) в конкрентных биогеохимических провинциях.

Таблица 3. *Сравнительный химический состав КСО молока из различных районов (мкг/мг белка)*

Местообитание	ФАД	Fe	Mo	Cu	W
Сибай*	0,70	0,26	0,12	0,02	-
Армения*	1,20	0,40	0,40	<0,01	-
Кудиново	1,15	0,44	0,31	0,03	0,002
Заюково	1,50	0,64	0,47	0,06	0,005
Былым	0,80	0,60	0,44	0,01	0,010
Тырныауз	0,80	0,56	0,60	0,03	0,080

* По данным Г.Г. Цой [5]; ФАД – флавинадениндинуклеотид

Кроме того, гены, ответственные за формирование или Re-содержащих КСО или других металл-содержащих белков, возможно, сохранились в процессе эволюции организмов, и они присутствуют не только у термофильных бактерий, но и у млекопитающих. Тем не менее, включение вольфрама и рения в КСО молока, как и молибдена и меди, доказано. При дальнейшем анализе КСО необходимо определить дифференциацию фермента на ряд его изоформ и доказать биологическую роль существующих вольфрам и рений-содержащих КСО.

Таким образом, в ходе проведения биогеохимических исследований в W-Mo-Cu рудных и фоновых районах, установлено заметное аккумулирование металлов не только растениями, но и млекопитающими. При этом впервые обнаружено включение вольфрама и рения в фермент КСО молока. При увеличении уровней молибдена, меди, вольфрама и рения в окружающей среде, миграция W и Re резко возрастает в рудных районах, что является основой разработки биогеохимических технологий поиска и извлечения редких элементов. Полученные данные существенно меняют современные представления о биологической роли вольфрама и рения у млекопитающих и подтверждают идеи В.И. Вернадского о причинном включении микроэлементов в живое вещество биосферы [1]. Тем не менее, более глубокие исследования в области механизма включения W и Re в КСО и другие металл-содержащие белки – впереди.

Литература

1. ***Вернадский В.И.***
Об условиях проявления жизни на Земле. Избранное собр. сочинений. – Т V. – М.: Изд-во АН СССР. – 1960. – С. 147–159.
2. ***Ермаков В.В., Тютиков С.Ф.***
Геохимическая экология животных/ Под. ред. Самохина В.Т. – М.: Наука. – 2008. – 325 с.
3. ***Сумбаев В.В., Розанов А.Я.***
Ксантиноксидаза как компонент системы генерирования активных форм кислорода// Современные проблемы токсикологии. – 2001. – № 1. – С. 16–22.
4. ***Федонкин М.А.***
Сужение геохимического базиса жизни и эвкариотизация биосферы: причинная связь// Палеонтологический журнал. – 2003. – № 6. – С. 33–40.
5. ***Цой Г.Г.***
Адаптивные изменения ксантиноксидазы в условиях медных и молибденовых биогеохимических провинций: Дис.: канд. биол. наук. – М. – 1974. – 138 с.
6. ***Boll M., Schink B., Messerschmidt A., Kroneck M.H.***
Novel bacterial molybdenum and tungsten enzymes: three-dimensional structure, spectroscopy, and reaction mechanism// Biological Chemistry. – 2005. – Vol. 386. – P. 999–1006.
7. ***Bozhkov O., Tzvetkova Chr., Borisova L., Ermakov V., Ryabukhin V***.
Study of rhenium accumulation in plants (review)// Trends in Inorganic Chemistry. – 2006. – Vol. 9. – P.1–10.
8. ***Brondino C.D., Romao M.J., Moura I., Moura J.J.***
Molybdenum and tungsten enzymes: the xanthine oxidase family// Current Opinion in Chem. – Biology. – 2006. – Vol. 10. – P. 109–114.
9. ***Ermakov V., Jovanovic L., Degtyarev A., Danilova V., Krechetova E., Tjutikov S., Khushvakhtova S.***
The interrelation of copper and molybdenum in biogeochemical processes// Ecologica. – 2011. – Vol. 18. – P. 363–367.
10. ***Josbi H.K., Cooney J.J., Incore F.E., Gruhn N.E., Lichtenberger D.L., Enemark J.H.***
Investigation of metal-dithiolate fold angle effects: implications for molybdenum and tungsten enzymes// PNAS. – 2003. – Vol. 100. – P. 3719–3724.

Нарушения паритета «правого» и «левого», четного и нечетного в живой и неживой природе

Урусов В.С.

Концепция симметрии-диссимметрии вещества и пространства-времени всегда занимала в научных и философских исканиях великого естествоиспытателя В.И. Вернадского особое положение. Среди многих других вопросов, относящихся к этой области его размышлений, важное место отводилось им проблеме правого и левого, или правизны-левизны, которую он рассматривал как ключевую в резком различии свойств пространства неживого (косного) и живого вещества и происхождении последнего, которое он выразил в принципе Реди («все живое от живого»). В настоящей работе с позиций единой концепции симметрии-диссимметрии рассматривается современное состояние этих проблем и даны некоторые возможные пути решения наиболее сложных и дискуссионных моментов.

Ключевые слова: симметрия, диссимметрия, законы четности, нарушения симметрии (четности) в естественных науках.

Conception of symmetry-dissymmetry of substances and space-time was always one of the most special in the scientific and philosophical searches of the outstanding naturalist V.I. Vernadsky. Amongst many other questions of this field of his thinking a very important position was occupied by the problem of “right and left” which he considered as key one in the sharp boundary between properties of substances of inorganic and organic origin. Vernadsky expressed this difference in the so called Redi’s principle (all living are f rom living).In the paper, presented below, the author analyses from the position of single conception of symmetry-dissymmetry the modern state of all these problems and proposes some possible ways of solution of most complicated and disputable points.

Keywords: symmetry, dissymmetry, parity laws, violations of symmetry in natural sciences.

Правое и левое» в единой концепции симметрии-диссимметрии

Великий естествоиспытатель Владимир Иванович Вернадский (1963–1945), 150-летие которого отмечается широкой научной общественностью в 2013 г., придавал науке о симметрии исключительно большое значение в понимании законов неорганического мира и эволюции живого вещества. Вот как он выразил свое понимание всеобщности концепции симметрии [1]: «*Изучающая это состояние (твердое – В.У.) наука, вся проникнутая учением о симметрии, – кристаллография – достигла стройности и глубины, не превзойденной другими областями точного знания. Но в кристаллографии симметрия проявляется не во всей полноте. И это ясно указал, но не успел развить для других разделов физики Пьер Кюри. Еще ярче это проявляется для наук биологических*».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-00983).
The work was financially supported by RFBR (grant № 12-05-00983).

УРУСОВ Вадим Сергеевич,
доктор химических наук, академик РАН, профессор, заведующий кафедрой кристаллографии и кристаллохимии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
Vadim S. URUSOV,
Doctor of Chemistry, Academician of the RAS, Professor, the Head of the Department of Crystallography and Crystal Chemistry at M.V. Lomonosov Moscow State University, e-mail: urusov@geol.msu.ru.

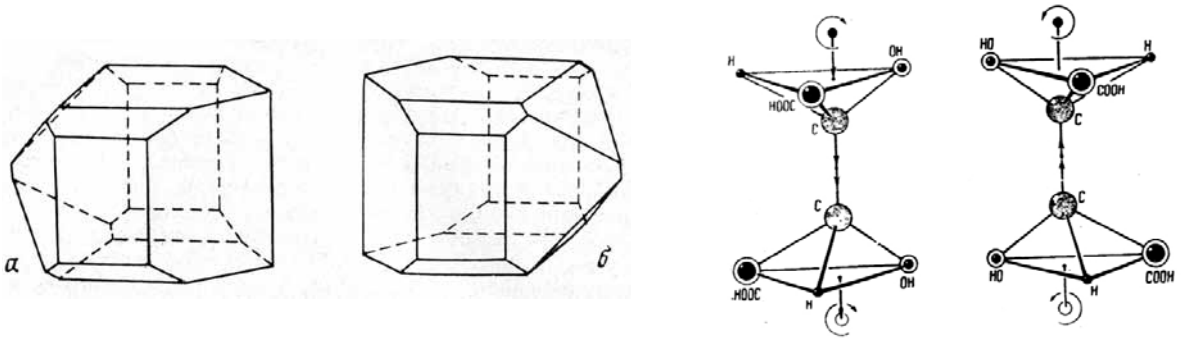


Рис. 1. Кристаллы правой (а) и левой (б) винной кислоты (энантиоморфизм) и молекулы правой и левой винной кислоты (хиральность)

Одно из его определений симметрии таково: «*В науках о природе симметрия есть выражение геометрических пространственных правильностей, эмпирически наблюдаемых в природных телах (и явлениях)*» [1]. При более строгом подходе [2] теория симметрии совпадает с теорией автоморфизмов (букв. – самоподобие) математических или физических объектов. Все преобразования, сохраняющие некий объект инвариантным (равным самому себе) образуют группу симметрии (автоморфизма). Симметричная фигура (объект, система и др.) состоит из равных частей, расположенных абсолютно одинаково одна относительно другой. Это расположение частей подчиняется операциям *симметрии* (поворотам вокруг некоторой оси/осей, отражениям в плоскости/плоскостях и инверсии в центре симметрии), которые обменивают местами равные части и тем самым совмещают фигуру саму с собой. Фигура, не имеющая других элементов симметрии, кроме единичной операции 1, называется *асимметричной.* Она не делится на равные части и совмещается сама с собой просто оставлением ее на месте[1].

Понятие о диссимметрии впервые ввел в 1853 г. великий Луи Пастер (1822–1895), который называл диссимметричной такую фигуру, которая не может быть совмещена простым наложением со своим зеркальным отображением. Это значит, что в ней самой отсутствует плоскость зеркальной симметрии, которая делит фигуру на две равные части. Две диссимметричные фигуры, которые являются зеркальными отображениями одна другой, называются *энантиоморфными* (или зеркально равными) модификациями. Одну из них (безразлично, какую) называют правой, а другую – левой (рис. 1). Зеркальное равенство двух частиц (обычно структур молекул) называют *хиральностью* (от греч. cheir – рука), а соответствующие правые и левые формы – *хиральными* («однорукими»).

Диссимметрия, приводящая к энантиоморфизму, т.е. правым и левым модификациям, присуща всем фигурам, не имеющим элементов симметрии второго рода: плоскостей, центра симметрии, зеркальных осей симметрии (сочетания поворота и отражения в перпендикулярной плоскости). Это значит, что такие фигуры могут совмещаться сами с собою только операциями первого рода – простыми поворотами вокруг осей разного порядка. И наоборот, фигуры с элементами симметрии второго рода правых и левых модификаций не дают, так как они сами состоят из правых и левых частей в одинаковых пропорциях.

Одно из важнейших открытий Л. Пастера, сделанное им в 1960 г., состоит в обнаружении того, что все энантиоморфные вещества (кристаллические или молекулярные), играющие основную роль в жизненных процессах, являются диссимметричными, т.е. представлены либо правыми, либо левыми формами. В отличие от этого, энантиоморфные вещества неорганического происхождения содержат правые и левые формы в одинаковых пропорциях *(рацемические смеси)*. Например, при кристаллизации отходов винного производства образуются кристаллы только левой винной кислоты, тогда как в лабораторных условиях кристаллизуются обе формы в равных долях.

Обобщения концепции симметрии-диссимметрии в работах П. Кюри

Важнейшие обобщения концепции симметрии-диссимметрии по-

[1] *От асимметрии следует отличать понятие диссимметрии, под которой понимают пониженную симметрию, характеризующуюся отсутствием некоторых элементов симметрии или их частичной потерей. К сожалению, несмотря на неоднократные указания крупнейших ученых (П. Кюри, В.И. Вернадский, А.В. Шубников и др.) эти два понятия часто смешиваются, точнее говоря, использование понятия асимметрии ошибочно считается вполне адекватным для определения любого процесса понижения симметрии.*

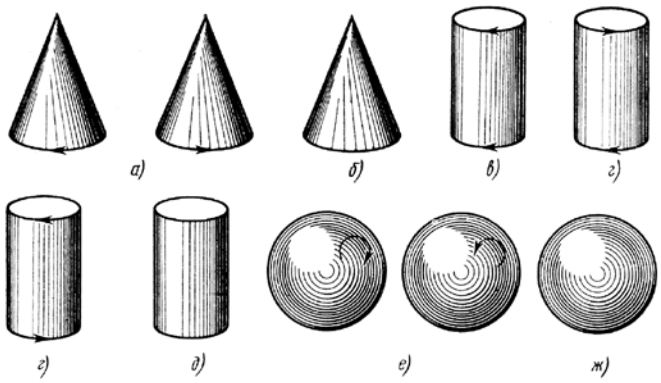


Рис. 2. Фигуры вращения, изображающие предельные группы симметрии Кюри:

а)∞, правая и левая;
б) ∞m;
в) ∞/m;
г) ∞2, правая и левая;
д) ∞/mmm;
е) ∞/∞, правая и левая;
ж) ∞/∞m

сле открытий Пастера принадлежат другому великому французскому ученому – Пьеру Кюри (1859–1906). В 1884 г. он поставил перед собой задачу объединить геометрические законы симметрии с направлением некоторого воздействия на объект и его движением [3]. Это привело его к выводу так называемых *предельных точечных групп симметрии*[2], содержащих оси симметрии бесконечного порядка (рис. 2). К симметрии конуса ∞m (одна ось бесконечного порядка ∞ и бесконечное число вертикальных плоскостей симметрии m) он добавил две энантиоморфные разновидности вращающихся (вправо и влево) конусов, имеющих только одну ось симметрии бесконечного порядка ∞. Кроме симметрии покоящегося цилиндра (∞/mm) – вертикальной оси бесконечного порядка ∞, бесконечного числа вертикальных плоскостей симметрии m и одной поперечной плоскости симметрии, обозначаемой символом /m, Кюри ввел группу симметрии вращающегося цилиндра (∞/m)[3] и две энантиоморфные формы скрученного цилиндра с вертикальной осью симметрии бесконечного порядка и бесконечным числом поперечных осей второго порядка (∞/2).

Кроме высшей группы симметрии покоящегося шара (∞/∞m), содержащей бесконечное множество осей бесконечного порядка, бесконечное множество плоскостей симметрии, проходящих через его центр (центр симметрии), существуют еще две энантиоморфные разновидности вращающегося шара без плоскостей и центра симметрии, но с бесконечным множеством осей (диаметров шара) бесконечного порядка (∞/∞). Можно представить себе, что в правом шаре все диаметры как бы «скручены» по правому винту, а в левом – по левому винту. Таким образом, в предельных группах симметрии все основные виды (конусы, цилиндры и сферы) имеют энантиоморфные, т.е. зеркально равные, пары.

Другие важнейшие идеи Кюри в краткой форме могут быть сведены к двум основным положениям. Первое из них утверждает, что *«некоторые элементы симметрии среды могут сосуществовать с явлением, но они не являются обязательными. Обязательным является отсутствие некоторых элементов симметрии. Это она – диссимметрия – творит явление»*.

Второе важнейшее положение в формулировке Кюри гласит: *«Когда несколько различных явлений природы накладываются друг на друга, образуя одну систему, диссимметрии их складываются. В результате остаются лишь те элементы симметрии, которые являются общими для каждого явления, взятого отдельно»*. Эта формулировка составляет содержание принципа суперпозиции симметрий (диссимметрий). Этим общим принципом устанавливаются связи между причинами и следствиями: «элементы симметрии причины должны содержаться в порожденных (этими причинами) следствиях»; «когда некоторые следствия обнаруживают диссимметрию, то последняя должна содержаться и в причинах, породивших эти следствия».

Алексей Васильевич Шубников (1887–1970) [4] так резюмировал свой анализ концепции диссимметрии: *«Какой бы трактовки мы ни придерживались, одно остается обязательным: нельзя рассматривать симметрию без ее антипода – диссимметрии. В симметрии отображается та сторона явлений, которая соответствует покою, в диссимметрии – та их сторона, которая отвечает движению. Единое понятие симметрии-диссимметрии неисчерпаемо»*.

---

[2] *Эти группы симметрии называются точечными, так как действие элементов симметрии такой группы на некоторую фигуру оставляет на месте по крайней мере одну точку, которая называется особенной.*

[3] *Вращающийся цилиндр не имеет двух энантиоморфных форм, так как вращающийся вправо цилиндр переходит в левовращающийся при простом переворачивании его «с ног на голову».*

Еще раньше на громадное значение этих идей прозорливо обратил внимание великий естествоиспытатель В.И. Вернадский, когда в начале 30-х гг. прошлого века он начал углубленно думать о проблеме пространства и времени. Его «Размышления натуралиста» были впервые (и со значительными купюрами) опубликованы в 1975 г., через 30 лет после смерти их автора и почти через 50 лет после их написания, а затем переизданы в более полном виде к 125-летию ученого под другим названием [1]. Вторая часть «Философских мыслей натуралиста», названная «Пространство и время в неживой и живой природе», особенно близко связана с идеями Кюри. Вернадский писал: «*Кюри охватил значение симметрии в физических явлениях тогда, когда связь симметрии с фактами физики не сознавалась. Он указал его там, где его не видели. После 1906 г., года смерти Кюри, перед нами открылась огромная новая область фактов, регулируемых симметрией, но не нашлось ума, который бы указал и захотел указать на общее значение этого явления и сделал бы из этих фактов неизбежные научные, а затем и философские выводы. Иное было бы, если бы был жив в эти годы Кюри, так как новые факты явились блестящим подтверждением его предвидения*».

Законы четности (парности) в естественных науках

Зеркальное равенство двух объектов (фигур, явлений и т.д.), четность или парность свойств многих объектов и явлений имеет множество проявлений в природе и поэтому часто играет ключевую роль в естественных науках (и математике). В целом ряде случаев парность сводится просто к соотношениям правого и левого: правые и левые (энантиоморфные) кристаллы, правые и левые (хиральные) молекулы, правые и левые спирали. В других случаях парность описывается соотношениями антисимметрии, как в случае противоположных векторов сил притяжения и отталкивания. Тогда правые и левые составляющие одного сложного объекта переходят друг в друга либо с помощью антиплоскости зеркального отражения, либо путем отражения в центре симметрии, либо с применением винтовых осей, сочетающих поворот и отражение в центре симметрии. Например, спины электронов (и любых других фермионов) принимают только два значения: + ½ и – ½. Ясно, что они связаны друг с другом операцией изменения знака, т.е. умножением на –1. Подобные же парные связи антисимметрии существуют между положительным и отрицательным электричеством, между северным и южным магнитными полюсами и т.д.

Очевидно, свойства, которые описываются четными числами, включают в себя парность (множитель 2) имманентно, по определению. Поэтому вполне естественно ожидать, что свойства, отвечающие четным и нечетным числам, имеют существенные различия между собой, а именно: четные свойства, отражающие более высокую их симметричность, обнаруживают существенное преимущество перед нечетными в частоте появления и устойчивости. Можно начать с известных фактов стабильности и распространенности изотопов химических элементов. На диаграмме (рис. 3) показана распространенность относительно легких химических элементов в наблюдаемом Космосе (в звездах и на Солнце). Она наглядно выражает правило Оддо-Гаркинса: преобладание атомов четных порядковых номеров (зарядов ядер Z) над атомами нечетных номеров Периодической системы элементов. Эта пилообразная диаграмма отражает относительную устойчивость ядерных структур, связанных с взаимодействием нуклонных пар – протонов и нейтронов. Наиболее устойчивыми являются постройки, в которых имеется четное число а-частиц – ядер He^4, состоящих из двух протонов и двух нейтронов. Такое ядро обладает, очевидно, наиболее высокой симметрией. Космическая распространенность химических элементов (нормированная на 1 атом Si) образует следующий ряд в порядке уменьшения распространенности (под символом элемента слева указан его порядковый номер Z): $_1$H (26000), $_2$He (1800), $_8$O (18,4), $_6$C (11,7), $_7$N (2,3), $_{12}$Mg (1,06), $_{14}$Si (1,0), $_{26}$Fe (0,9), $_{24}$Cr и $_{28}$Ni (0,06). Большинство этих элементов, кроме самого легкого водорода и азота, являются четными. Другие легкие элементы ($_3$Li, $_4$Be, $_5$B), из которых только бериллий Be – четный, выпадают из закономерности Оддо-Гаркинса и находятся в глубоком минимуме кривой распространенности. Это связано с тем, что они неустойчивы в недрах звезд и сгорают экзотермически (с выделением тепла) с образованием более

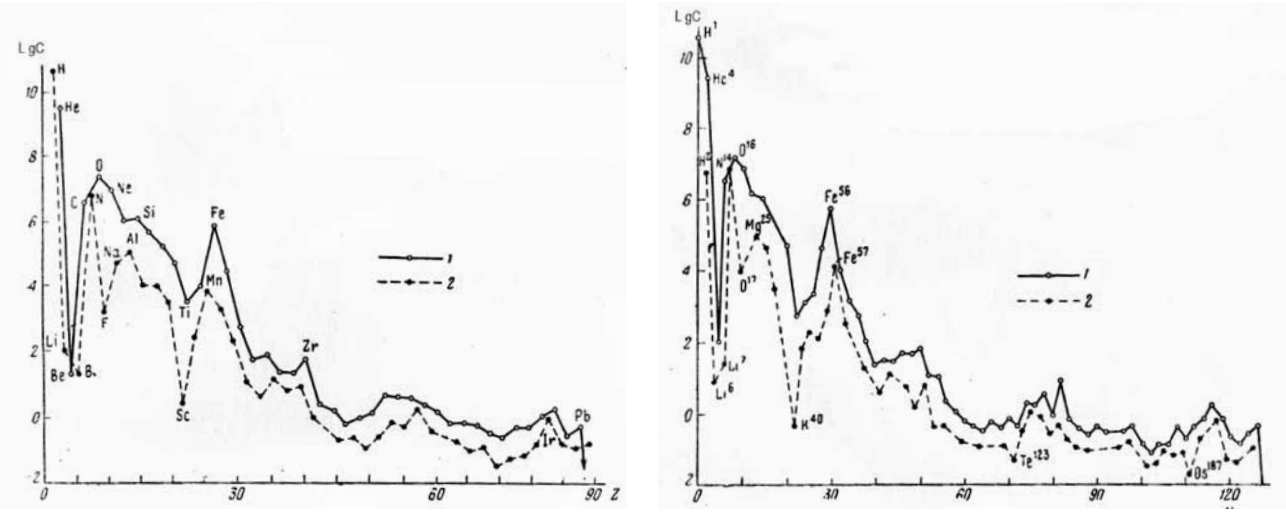


Рис. 3. ***Относительная атомная распространенность lgC четных (1) и нечетных (2) химических элементов в Солнечной системе в зависимости от порядкового номера (заряда ядра) Z (слева) и от числа нейтронов (справа)***

тяжелых элементов, вплоть до четного элемента – железа $_{26}$Fe. Атомы, более тяжелые, чем железо, образуются с поглощением тепла (эндотермически). Поэтому распространенность железа на Солнце и в ядрах планетах земной группы образует относительный максимум (рис. 3).

Построение Периодической Системы элементов, объясненное квантовыми законами строения атомов, является еще одной яркой иллюстрацией повышенной стабильности четных свойств. Во-первых, в соответствии с принципом Паули, каждая отдельная орбиталь заполняется парой электронов, имеющих противоположные направления спиновых моментов (парность). Кроме того, все электронные уровни разной симметрии заполняются четным числом электронов: на s-уровнях 2 электрона, на p-уровнях 6 электронов, на d-уровнях 10 электронов, на f- уровнях – 14 электронов. Благодаря этому все периоды заключают четное число элементов (2, 8, 8, 18, 18, 32, 32 и т.д.). Последние элементы каждого периода (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) – все четные и имеют в последней оболочке 8 электронов – ns^2p^6, где n – главное квантовое число, или номер периода, n^32 (гелий He, для которого n = 1, второй после водорода H и последний элемент первого периода, имеет законченную электронную оболочку $1s^2$). Хорошо известно, что именно эти элементы наиболее устойчивы и почти не принимают участия в химических реакциях (отсюда их общее название инертные газы).

Законы четности играют большую роль в химии молекул и кристаллов (кристаллохимии). Каждая отдельная химическая связь образуется парой электронов с противоположными спинами, т.е. при образовании связи происходит спаривание электронов двух разных атомов на одной молекулярной орбитали. В типичной стабильной конфигурации связей в молекулах и кристаллах каждый отдельный атом в обычном случае стремится окружить себя 8 электронами (правило октета), частично отдавая свои электроны партнерам или, наоборот, присваивая их электроны и имитируя тем самым строение оболочки инертного газа предшествующего периода (катионы) или своего периода (анионы). Так объясняется образование, в частности, ионной химической связи, но и другие типы связей подчиняются этому простому и ясному принципу. Например, в ионном кристалле галита Na^+Cl^- катион Na^+ отдает свой валентный электрон аниону Cl^-, причем первый приобретает 8-электронную оболочку инертного газа Ne, заканчивающего предшествующий 2-ой период, а последний – 8-электронную оболочку инертного газа Ar, заканчивающего тот же 3-ий период Системы Менделеева. В ковалентном кристалле алмаза C четыре ближайших соседа каждого из атомов углерода образуют с ним двухэлектронные ковалентные связи, в результате чего все атомы углерода оказываются на равных правах обладателями электронного октета, имитирующего стабильную электронную оболочку Ne.

Наиболее стабильные молекулы имеют четное число химических связей и четное число ближайших соседей. Впечатляющей иллюстрацией этого правила является строение и симметрия фуллеренов – соединений углерода C_n (n ^{3}60). Чтобы понять своеобразную сфе-

роидную форму этих молекул, начнем с рассмотрения геометрии икосаэдра – многогранника с треугольными гранями, которые сходятся по пять в одной вершине. Этот многогранник имеет редкие для веществ неорганической природы шесть осей 5-го порядка, 12 вершин, 30 ребер и 20 треугольных граней. Если провести усечение всех вершин икосаэдра, так чтобы на месте каждой из 12 вершин оказалась пятиугольная грань, получится многогранник Архимеда, 60 вершин которого соответствуют позициям атомов углерода в фуллерене $C_{60.}$ В нем имеется 90 ребер и 32 грани, из которых 12 – пятиугольные. И все другие стабильные фуллерены с той же икосаэдрической симметрией и 12 пятиугольными гранями содержат четное число вершин, ребер и граней. Например, в фуллерене C_{80} – 120 ребер и 42 грани (30 шестиугольных), в фуллерене C_{180} – 270 ребер и 92 грани (80 шестиугольных).

Законы четности играют большую роль в кристаллографии и кристаллохимии. Еще в 1891 г. Е.С. Федоров показал, что только пять топологически различных типов выпуклых многогранников, грани которых попарно равны и параллельны, могут заполнять без промежутков все трехмерное пространство. Он назвал их *параллелоэдрами*: в наиболее симметричных формах это куб (6 пар параллельных граней, 8 вершин, 12 ребер), гексагональная призма (4 пары граней, 12 вершин, 18 ребер), усеченный октаэдр (7 пар граней, 12 вершин, 24 ребра), ромбододекаэдр (6 пар граней, 14 вершин, 24 ребра) и многогранник с четырьмя шестиугольными и восемью ромбическими гранями (6 пар граней, 18 вершин, 28 ребер). Путем аффинных преобразований, т.е. однородных растяжений и сжатий, а также сдвигов, или путем удлинения или укорочения параллельных ребер, можно заполнить все пространство с геометрией более низкой симметрии, чем кубическая или гексагональная.

Легко проверить, что все такие (и другие выпуклые) многогранники подчиняются формуле Л. Эйлера:

$$F - E + V = 2,$$

где F – число граней, E – число ребер, V –число вершин. Из формулы Эйлера следует, что при четном числе вершин V, как во всех параллелоэдрах Федорова, разность (E – F) есть также четное число, т.е. либо и число ребер, и число вершин – оба четные, либо они оба нечетные. Для всех параллелоэдров Федорова и для большинства полиэдров, обычных для кристаллографии и кристаллохимии (тетраэдр, октаэдр, кубооктаэдр и т.п.) выполняется первое условие. Таким образом, во всех этих случаях четные формы геометрических фигур имеют очень отчетливое преимущество перед теми, которые характеризуются нечетными числами. Другими словами, четность и нечетность проявляют явную диссимметрию, состоящую в том, что четное свойство имеет большую устойчивость и распространенность по сравнению с нечетным.

Рис. 4. Великая диссимметрия Большого Взрыва. Начало всего – 14 млрд лет назад

«Великая диссимметрия» Большого взрыва

По современным космологическим представлениям (так называемая *стандартная космологическая модель* [5]) Большой Взрыв положил начало нашей Вселенной примерно 14 млрд лет назад. Этот гигантский Взрыв разметал во все стороны вещество и пространство от исходного состояния бесконечного сжатия и предельно высокой симметрии точки в пространстве. Великий взрыв оказался и началом «великой» диссимметризации пространства-времени и вещества. Прежде всего, в самый первый миг была разрушена антисимметрия между частицами и античастицами, которая «разрешила» существование первых и отсутствие вторых в нашей Вселенной и отделила их пространственно друг от друга. Это было той абсолютно необходимой диссимметризацией, которая предотвратила немедленную аннигиляцию вещества и превращение его в фотонный газ (рис. 4).

Антимир собрался в некую отдельную область «антипространства-

антивремени», которая эволюционирует самостоятельно и следы которой можно фиксировать в редких античастицах, посещающих нашу Вселенную (например, в позитронах, обнаруженных в космических лучах). Трехмерное пространство Антимира можно представить себе как связанное антицентром симметрии с нашим трехмерным пространством, или инвертированное по отношению к нему (рис. 5).

Время потекло в одну сторону – от прошлого к будущему, возникла так называемая «*стрела времени*», которая определила эволюционное развитие нашей Вселенной (рис. 6).

Эти события развивались на фоне колоссального понижения температуры, от значений порядка 10^{32} К в так называемое *планковское время* 10^{-43} с после Большого Взрыва, что примерно в 10^{25} раз выше температуры в недрах Солнца, до температуры реликтового микроволнового излучения, заполняющего сейчас космос, которое точно измерено и составляет всего 2,7 К. Электромагнитное излучение отделилось от слабых и сильных взаимодействий при температуре порядка 10^{15} К, нуклеосинтез стал возможным при температурах не выше 10^{10} К, а атомы стали образовываться, когда температура опустилась еще на несколько порядков. Под влиянием гравитации стали образовываться локальные скопления вещества в виде газово-пылевых облаков, а Земля и другие планеты появились только тогда, когда температура пространства Солнечной системы упала до десятков тысяч градусов и ниже.

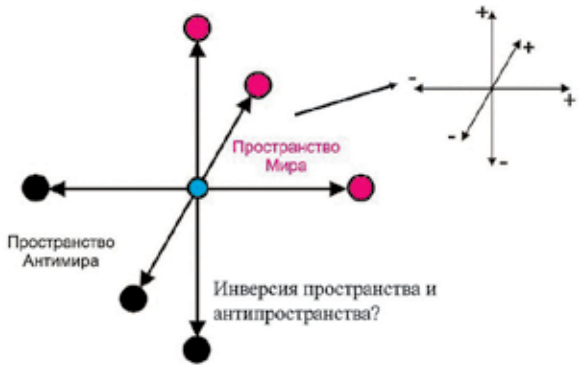


Рис. 5. Пространства Мира и Антимира связаны центром антиинверсии

Рис. 6. Великая диссимметризация времени. Стрела времени

Диссимметрия Солнечной системы и Земли

Сгустки материи во Вселенной – туманности, звезды, планеты и т.п. – являются продуктами гигантских флуктуаций и длинной цепи бифуркаций, в которых самоорганизованное развитие сопровождается непрерывным понижением энтропии за счет выброса избыточной энергии и энтропии в окружающее пространство. Таким образом, планета Земля «живет за счет отрицательной энтропии», точно так же, как это делает любой живой организм и живое вещество в целом.

Солнечная система возникла из одного из газово-пылевых облаков, образовавших вращающийся в одну сторону диск. Этим движением была положена первопричина нарушения симметрии правого и левого (гомохиральности) всех последующих процессов. Все планеты, возникшие путем аккреции этого вещества, получили вращение в одну и ту же сторону и унесли с собой большую часть момента инерции, тогда как 99 % всей массы оказалось собрано в центральной звезде – Солнце.

Крупномасштабной иллюстрацией процесса разделения, т.е. уменьшения симметричности распределения вещества Земли, является дифференциация исходно более или менее однородного вещества на самых ранних этапах его аккреции из протопланетного облака и выделение оболочек – ядра, мантии, земной коры, гидросферы и атмосферы. Этот процесс продолжается и поныне, о чем непрерывно свидетельствуют такие явления, как глобальные изменения климата, вулканические извержения, землетрясения, накопление новых слоев осадков, перемещения границ океанов и суши и многое другое. Все эти события требуют в конечном счете огромного расхода энергии, запасенной в недрах Земли (главным образом за счет гравитационной энергии и радиоактивного распада), и выноса ее сначала на поверхность, в жидкую и газовую оболочки Земли с их биосферой, а затем в окружающее пространство.

Свидетельств развития Земли в сторону непрерывного понижения симметрии достаточно на любом уровне ее познания и в любой науке о Земле и жизни. В глобальном масштабе это переход от симметрии однородной вращающейся сферы ∞/∞ к симметрии вращающегося цилиндра ∞/m (рис. 3)[4] и затем нескольких вложенных друг в друга цилиндров (точнее, эллипсоидов вращения), заполненных различным по плотности и составу веществом. Движение вещества в каждой из оболочек (например, конвекция в жидком внешнем ядре или в мантии) более или менее независимо друг от друга, и поэтому общая (суммарная, или «суперпозиционная») симметрия Земли существенно ниже симметрии вращающегося эллипсоида, но при этом сохраняет высокую степень псевдосимметрии и гомохиральности, поскольку вращение масс вокруг земной оси и планеты вокруг Солнца сохраняет приближенную симметрию вращающегося в одну сторону цилиндра ∞/m.

Диссимметризация минерального вещества в процессе эволюции

Существенно, что, несмотря на внешние отличия, история минерального вещества Земли в целом следует по тому же пути постепенного усложнения, дифференциации и диссимметризации, как это неоспоримо устанавливается для живого вещества. Это становится очевидным, если сопоставить минеральный мир окружающего нашу планету космоса и ее собственный минеральный мир. Действительно, число различных минеральных видов, обнаруженных в метеоритах разного типа и на поверхности Луны – не более 150, тогда как число минеральных видов, открытых на Земле, приближается к 4000. Таким образом, если исходным веществом для образования планет земной группы и Луны служило вещество метеоритов, то разнообразие минеральных видов Луны, рано закончившей свою эволюцию, изменилось незначительно, в то время как на Земле произошло (и происходит) весьма существенное увеличение разнообразия минеральных видов, т.е. осуществилась гораздо более глубокая дифференциация одного и того же (или близкого) по химическому составу вещества. Тем не менее, число минеральных видов остается намного (по крайней мере, на два порядка) меньшим, чем число возможных и уже полученных в лаборатории химических соединений. Это является следствием действия ряда факторов, осуществляющих отбор наиболее стабильных в каждой конкретной обстановке сочетаний атомов химических элементов, который автор [6] предложил называть «естественным отбором» минеральных видов. В свете рассмотренного выше следует ожидать постепенного понижения симметрии в процессе эволюции твердого вещества Земли, а также при переходе от вещества ближнего космоса (метеоритов и Луны) к Земле и от ядра Земли к ее верхней твердой оболочке – земной коре. Факты подтверждают это с полной определенностью [7].

Правизна-левизна в минеральном веществе

В.И. Вернадский в своих трудах и заметках, посвященных проблеме пространства-времени, неоднократно обращался к мысли о принципиальном различии свойств пространства-времени живого и неживого (косного) веществ. Он основывал свою точку зрения на признании того, что симметрия правого и левого нарушается только жизнью, но нет признаков ее нарушения в неживой природе. Он писал, в частности, в 1938 г.: *«В симметрии живых организмов чрезвычайно резко выражены правизна и левизна, которые для кристаллов являются частным случаем…[1, с. 265]. Между симметрией косного вещества нашей биосферы и симметрией живого вещества существует резкое различие, без всяких переходов и исключений…»* [1, с. 284].

В связи с этими фактами Вернадский заключал: *«Логически правильным выводом из принципа Пастера-Кюри является принцип: «Omne vivum e vivo»*. Этот принцип (*«все живое происходит только от живого»*), который был назван им в 1924 г. принципом Реди, ведет к представлению о вечности жизни. *«Организмы размножаются поколениями, благодаря чему все их тела как бы обособлены от окружающей их природы, абиогенеза нет, т.е. получение их от косной природы иным путем не наблюдается»* [1, с. 296]. Каким именно путем возникла жизнь на Земле, например, возможен ли ее перенос на Землю из космоса метеоритами или под действием светового давления

4 Ось симметрии бесконечного порядка ∞ направлена по оси вращения Земли, а поперечная плоскость симметрии m (псевдосимметрии) совпадает с экваториальной плоскостью.

(панспермия Ю. Либиха, Г. Гельмгольца, лорда Кельвина, С. Аррениуса), этот вопрос Вернадский по существу оставлял без ответа, указывая лишь на отсутствие фактов абиогенеза. Он отвергал как ошибочное объяснение Пастера открытой им диссимметрии молекул живого вещества тем, что *«жизнь началась на нашей планете в один из прошлых периодов геологической истории, когда солнечная система проходила через левое космическое пространство»*, хотя признавал *«гениальной интуицией идею Пастера о связи этого явления с геометрическим пространством живых организмов» [1, с. 261].*

Размышления Вернадского об особом геометрическом пространстве, в котором существует жизнь, оказали большое влияние на современную ему научную мысль, правда, в основном в России. В частности, в его Биогеохимической лаборатории Г.Г. Леммлейн [8] проделал тщательные измерения частоты встречаемости правых и левых разновидностей одного из наиболее распространенного минералов – кварца (рис. 7). Он сделал вывод о равенстве этих частот, т.е. о полном паритете правизны-левизны в минеральном мире, хотя его численные результаты свидетельствовали о некотором небольшом преобладании левых разновидностей кварца (50,87±0,69%). Эти наблюдения использовал Вернадский, как подтверждение своей точки зрения, что *«число образующихся … правых и левых многогранников при кристаллизации (в отсутствие в ее среде живых организмов) одинаково»* [1, с. 261].

Однако через несколько лет, уже после смерти Вернадского, тщательный статистический анализ [9] показал, что эмпирические данные Леммлейна и некоторых других исследователей достоверно показывают, что частота встречаемости левых разновидностей кварца примерно на 1 % больше, чем правых. Этот же вывод следует из сводки, приведенной в известном минералогическом справочнике [10].

Возможно ли в принципе небольшое, но заметное нарушение симметрии правое-левое в веществах неорганического происхождения, например, в кварце? Ясно, что никаких внутренних причин для появления такого феномена нет, поскольку тригональные кристаллические структуры правого и левого кварцев отличаются только направлением вращения винтовой оси третьего порядка, соответственно, влево (3_1) или вправо (3_2) на угол 120°. Во всем остальном химические и физические свойства обеих модификаций совершенно тождественны. Поэтому искать причины возможной диссимметризации кристаллов кварца можно только в процессах его кристаллизации под

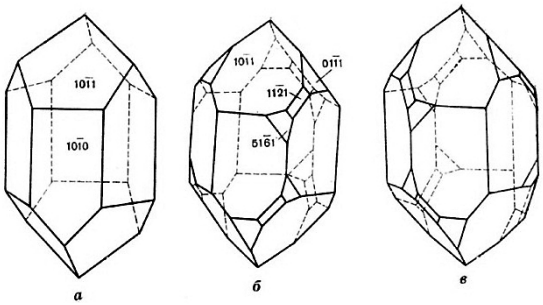


Рис. 7. Обычная (а), правая (б) и левая (в) формы кристалла кварца

влиянием некоторых специфических черт симметрии маточной среды.

Обратимся к давно известным фактам поведения кристаллизационной среды вокруг растущего кристалла. Еще в своей докторской диссертации 1895 г. Ю.В. Вульф наблюдал и фотографировал восходящие концентрационные токи вокруг растущего кристалла [11]. Если кристаллизация протекает достаточно быстро, то диффузия не успевает выровнять концентрации в окружающем кристалл растворе, и он может стать настолько легким, что под действием силы тяжести начинает подниматься вверх, а на его место притекает новая порция более концентрированного раствора. Это действие может усиливаться тем, что процесс кристаллизации обычно сопровождается выделением тепла, и относительно более теплый раствор вокруг кристалла стремится вверх

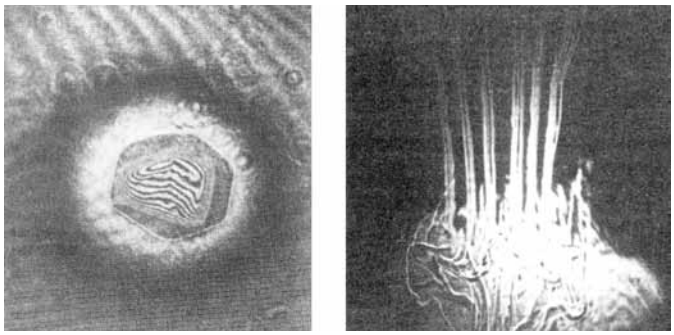
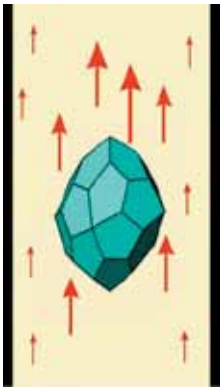


Рис. 8. Слева – концентрационное поле растущего кристалла, справа – область интенсивного перемешивания концентрационных токов



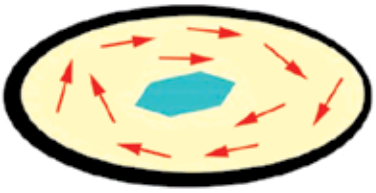


Рис. 9. Схема роста кристаллов и концентрационных токов во вращающемся гравитационном поле: слева – вид сбоку; справа – вид сверху

благодаря меньшему удельному весу (рис. 8). Теперь нам остается внести в эту картину следующий штрих: если кристалл вращается относительно раствора, то в силу принципа суперпозиции симметрий может возникать предпочтительный рост тех граней кристалла, которые более интенсивно обтекаются концентрационными токами. В случае энантиоморфных кристаллических форм этот эффект может повысить относительную вероятность роста одной из двух возможных форм. Теперь нужно представить себе, какие внешние факторы могут вызвать относительное вращение растущего кристалла и обтекающих его концентрационных токов. Используем для понимания происхождения этого возможного феномена аналогию с движением водных потоков в поле силы тяжести и вращения Земли вокруг своей оси. Согласно известному закону Бэра, реки, текущие в меридиональном направлении, подмывают в Северном полушарии правый берег, а в Южном полушарии – левый. Это происходит благодаря инерционной силе Кориолиса, которая действует против вращения Земли и старается вернуть водный поток в направлении его движения в сторону понижения рельефа.

Гораздо менее известна одна из работ А. Эйнштейна [12], посвященная более детальному рассмотрению природы закона Бэра. Это исследование позволяет более глубоко понять причины того, что тот берег, который подмывается, становится обычно более крутым и высоким. Эйнштейн учел тот простой факт, что из-за сил трения скорость водного потока всегда больше в его середине, чем у дна и берегов. В результате сложения силы Кориолиса и скоростей воды возникает вращение потока вокруг его средней, более быстрой струи. Именно это вращение и играет роль своеобразного «ротора», который вгрызается в берег, эродирует его и выносит породу, создавая крутизну подмываемого берега и образуя диссимметрию ложа реки.

Во время интенсивного роста кристалла обтекающие его концентрационные токи имеют подобное же распределение скоростей: наиболее обедненные части маточной среды оказываются ближе к кристаллу и движутся вверх быстрее, тогда как более далекие слои меньше отличаются по концентрации растворенного вещества от среднего состава и поэтому поднимаются медленнее (рис. 9). Теперь достаточно наложить на это движение силы инерции, которые могут быть связаны с тем же вращением Земли, чтобы заставить вращаться концентрационные токи вокруг кристалла или наоборот.

В опытах по росту кристаллов Ю.В. Вульф часто использовал установки с горизонтально вращающимся кристаллизатором (или кристаллом) для исключения влияния на форму кристаллов односторонне вертикально направленной (с симметрией покоящегося конуса ∞m) силы тяжести, определяющей соответствующую ориентацию концентрационных токов. Он считал, что *«только кристаллы, выросшие во вращающихся сосудах, обнаруживают форму, зависящую исключительно: 1) от внутренних сил кристалла и 2) от сил взаимодействия кристалла и его маточного раствора»* [11]. Действительно, в результате суперпозиции симметрий обеих сил среда кристаллизации становится асимметричной и перестает навязывать какую-либо симметрию растущему кристаллу.

Если же ось вращения совпадает (или приблизительно совпадает) с направлением силы тяжести, то суммарная симметрия среды становится симметрией вращающегося влево ∞ или вправо ∞ конуса. Если, кроме того, допустить, что собственная левая или правая винтовая ось некоторого энантиоморфного кристалла (3_2 или 3_1, 4_3 или 4_1, 6_5 или 6_1, 6_4 или 6_2) направлена вдоль оси вращения бесконечного порядка, то принцип суперпозиции симметрий требует выбора только одного из двух возможных направлений винтовой оси, оставляя предпочтительной кристаллизацию лишь одной из двух возможных энантиоморфных модификаций кристалла. Даже малого воздействия этого направленного возмущения на движение концентрационных токов достаточно, если это воздействие продолжается длительное время. В случае длительного действия такой внешней силы возможно

некоторое предпочтительное зарождение и дальнейший рост одной из энантиоморфных форм кристаллов кварца, кристаллизующихся из расплава. Действительно, рост кристаллов в природных условиях в слабо пересыщенной среде часто занимает весьма длительное время, намного большее, чем в лабораторных или заводских установках.

Диссимметрия (гомохиральность) жизни

Со времен великих открытий Пастера, т.е. более 150 лет тому назад, не вызывает сомнения отчетливое предпочтение организмами только одной из энантиоморфных разновидностей органических молекул, составляющих живое вещество: правых (d-сахара) или левых (l-белки) – рис. 10 и 11. Те же вещества, полученные искусственно в химической лаборатории, являются рацемическими смесями, т.е. содержат поровну d- и l-энантиомеры.

Гомохиральность – одно из наиболее замечательных свойств молекулярного строения живого вещества. Она играет кардинальную роль в процессе воспроизводства жизни. Для правильной пространственной ориентации нуклеиновых оснований (аденина А, гуанина Г, цитозина Ц и тимина Т) в правозакрученной двойной спирали молекулы ДНК, хранилище генетического кода, необходимым условием является, чтобы молекула сахара была представлена во всей цепи одним и тем же энантиомером. При произвольном чередовании d- и l-сахаров нуклеиновые основания не смогут образовать так называемые комплементарные пары А-Т и Г-Ц, соединенные друг с другом водородными связями. Кроме того, соответствующие нуклеотиды в двух цепях спирали расположены антипараллельно. Таким образом, последовательность оснований в одной цепи однозначно определяет последовательность оснований в другой (комплементарной) цепи молекулы ДНК.

Одной из наиболее важных и интересных особенностей пространственной организации молекулы ДНК является ее высокая псевдосимметричность. Действительно, двойная спираль подчиняется действию винтовой оси псевдосимметрии, поскольку в каждом новом шаге спирали, захватывающем длину около 34 Å и 10 нуклеотидов, порядок взаимного расположения пар А-Т и Г-Ц несколько отличается от соседнего шага. Именно по этой причине хромосомную нить Э. Шредингер назвал «*апериодическим кристаллом*» [13].

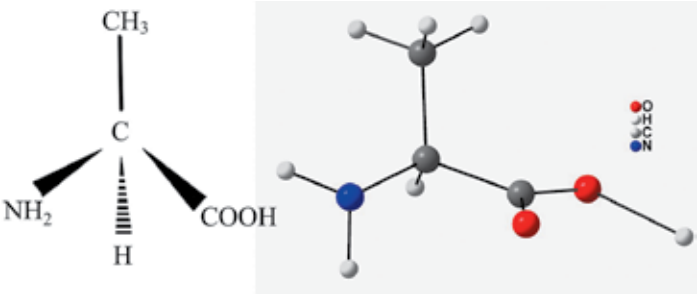


Рис. 10. Структурно-химическая формула (слева) и атомная структура (справа) аминокислоты l-аланина

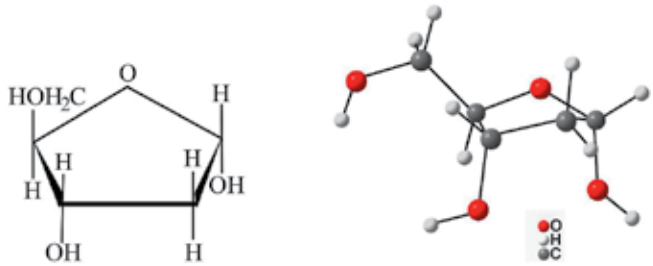


Рис. 11. Структурно-химическая формула (слева) и атомная структура (справа) сахара d-рибозы

Нарисованная выше схематическая и упрощенная картина указывает на радикальную диссимметризацию молекул живого вещества, резко отличающую его от веществ неорганической природы. Природа такого крутого поворота в симметрии вещества при переходе от косной к живой материи до сих пор до конца не разгадана. Нельзя сказать с уверенностью, возникла ли хиральная диссимметрия в предбиологический (до зарождения жизни) период или некоторые примитивные формы жизни использовали обе d- и l-формы, и только последующая эволюция привела к гомохиральности, выбрав d-сахара и l-аминокислоты. Оба взгляда имеют своих сторонников и противников.

В связи с этим возникает естественный вопрос, как быстро совершился переход к гомохиральности жизни, был ли он результатом случайности или это было следствием чрезвычайно малой, но систематически и длительно повторяющейся хиральной диссимметрии.

В этом вопросе также отсутствует согласие из-за отсутствия убедительных экспериментальных фактов. Однако, имеются некоторые теоретические соображения, которые склоняют к мысли, что предбиологический процесс нарушения симметрии может быть вызван небольшим воздействием с пониженной симметрией (слабые электрические силы, спин-поляризованные электроны радиоактивного распада, электромагнитное излучение некоторых звезд с круговой поляризацией). Такое слабое, но постоянное воздействие приводит к тому, что скорости производства или уничтожения одного из энантиомеров становятся больше, чем другого. Например, теоретически показано, что диссимметрия слабых электростатических взаимодействий способна вызвать в одном акте избыточное образование одного из энантиомеров в соотношении $1:10^{17}$. Тогда уже через 10^4–10^5 лет преобладающим окажется тот энантиомер, образование которого предпочтительно под действием слабых электростатических сил [14].

Для объяснения тайны происхождения биологической гомохиральности предложено много различных сценариев. Однако в контексте нашего анализа общего хода диссимметризации в ходе эволюции Земли как целого наиболее интересными представляются соображения о связи нарушений симметрии в неорганическом мире Земли, точнее, земной коре и мировом океане, как субстратах, на которых развилась жизнь, и в органических молекулах, построивших собственно живое вещество.

Модель возникновения гомохиральности в силовом поле Земли

В своей небольшой книге «Симметрия» [2] Г. Вейль сумел коснуться поразительно многих проблем, в том числе и загадки гомохиральности жизни. Он отмечал, что Паскуаль Йордан (1902–1980) связывал происхождение жизни не со многими событиями, а с событием совершенно особым, которое привело к тому, что число подобных случаев стало нарастать лавинообразно, за счет того, что одно событие влекло за собой, как в цепной реакции, множество таких же событий. Ведь если бы гомохиральные молекулы живых организмов возникали в разных местах и в разное время независимо друг от друга, то относительное количество их правых и левых разновидностей должно было бы быть примерно (или точно) одинаковым. Обсуждая эти соображения Йордана, Г. Вейль говорил, что хотелось бы найти менее радикальное (и более обоснованное) решения вопроса, «например, на пути сведения асимметрии земных обитателей к какой-то внутренней, хотя и случайной, асимметрии самой Земли или же к асимметрии падающего на Землю солнечного света. Но ни вращение Земли, ни совместное действие магнитных полей Земли и Солнца не могут оказать в этом отношении непосредственной помощи. Другая возможность состоит в предположении, что развитие на самом деле началось с равномерного распределения энантиоморфных форм, но что такое распределение представляет собой неустойчивое равновесие, нарушающееся при самом незначительном случайном внешнем воздействии» [2].

Из сказанного выше следует, что в объяснении резкого нарушения хирального равновесия в природе нельзя обойтись без привлечения естественных факторов, нарушающих право-левую симметрию среды. Здесь снова нужно напомнить наше гипотетическое объяснение небольшого нарушения в соотношении левых и правых форм кварца (рис. 9), которое заключается в учете возможного влияния левовинтового (если смотреть с Южного полюса) или правовинтового (если смотреть с Северного полюса) постоянного суточного вращения Земли на рост кристаллов. Так или иначе, но в соответствии с принципами Кюри необходимо искать причины нарушения хирального паритета в таких процессах, где существует диссимметрия причин, т.е. среды, в которой разворачиваются эти события.

Для объяснения тайны происхождения биологической гомохиральности было предложено много различных сценариев [14]. Однако в контексте нашего анализа общего хода диссимметризации в ходе эволюции Земли как целого наиболее интересными представляются соображения о связи нарушений симметрии в силовом поле Земли, точнее, земной коре и мировом океане, как субстратах, на которых развилась жизнь, и в органических молекулах, построивших собственно живое вещество в условиях диссимметризации Земли как планеты и ее космического окружения.

Эти соображения симметрии рождают еще одну гипотезу, которая, насколько нам известно, еще не рассма-

тривалась в качестве возможного сценария происхождения гомохиральности. Как можно видеть из рис. 10 и 11, правая и левая стороны молекул l-аминокислот и d-сахаров различаются по молекулярному весу M, причем, и это особенно важно, в разные стороны: правая сторона l-аланина намного тяжелее (M(COOH) = 45), чем левая (M(H) = 1) и «средняя» ($M(NH_2) = 16$, $M(CH_3) = 15$) (рис. 12), а правая сторона сахара – d-рибозы в 2,5 раза легче ($M(OH_4) = 20$), чем левая ($M(CO_2H_6) = 48$). Ясно, что для d-аланина и l-рибозы соотношение молекулярных весов обратное.

В атмосфере и первичных мелких водоемах ранней Земли, где эти молекулы появились вначале, вероятно, в относительно свободном состоянии и в рацемических соотношениях, окружающая среда и силовые поля, в которых оказались эти молекулы, должны были разрушать соотношение энантиомеров 1:1 именно в том направлении, которое наблюдается сейчас, т.е. вызвать преобладание l-аминокислот и d-сахаров над своими хиральными двойниками. Такое воздействие могли оказать силы притяжения и вращения Земли, которые поворачивали тяжелые радикалы аминокислот и сахаров вниз, вдоль направления силы тяжести (рис. 13), тем самым создавая этим конфигурациям дополнительную потенциальную энергию. Кроме того, преимущество в частоте образования обеспечивается для тех изомеров, наиболее тяжелые из трех остальных радикалов которых (верхний «зонтик») направлены по вращению Земли вокруг ее оси, т.е. для левой молекулы аланина на рис. 13.

Если учесть действие вращения молекул вокруг оси Земли на обе формы, то и правая молекула будет стремиться повернуться тяжелой стороной также вдоль направления вращения, и в тот момент, когда она повернется вокруг оси 2-го порядка, т.е. на 180°, она окажется тождественной «перелицованной» молекуле левого энантиомера (рис. 14). Теперь следует учесть эффекты инерции (центробежной

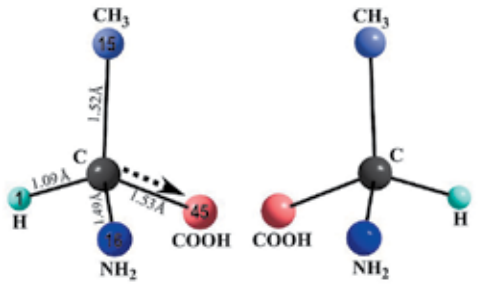


Рис. 12. Схематическое изображение структур левой и правой молекул аланина с длинами связей C-C, C-N и C-H и молекулярными весами всех четырех радикалов

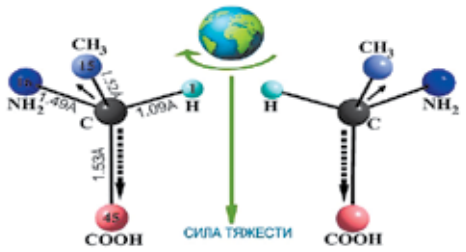


Рис. 13. Ориентация молекул левого и правого аланина в поле силы тяжести и под действием вращения ее вокруг оси. Стрелки вниз – направление силы тяжести, а стрелки в верхней части рисунка показывают смещение центра тяжести в «зонтике» из трех лигандов при вращении вокруг вертикальной оси

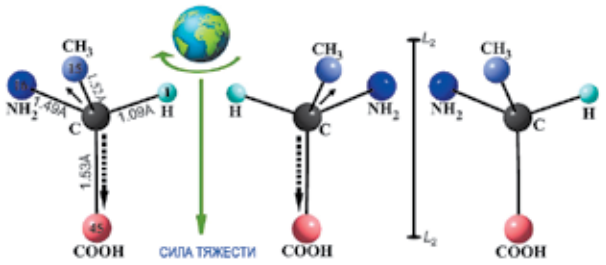


Рис. 14. Иллюстрация «флюгер-эффекта», в результате которого может возникнуть гомохиральность аланина

силы), чтобы самый легкий лиганд – атом водорода – оказался в «хвосте» молекулы. Этот эффект, который можно назвать *флюгер-эффектом,* может оказаться главной причиной происхождения гомохиральности молекул аминокислот и сахаров. Однако он требует более детального анализа и количественной оценки физических эффектов, которые сопровождают такой процесс.

Возможная роль минеральных подложек в катализе и репликации живого вещества

Догадки о возможной роли кристаллического вещества земной коры в первичном синтезе и появлении гомохиральности предбиологических органических веществ высказывались неоднократно. А.И. Опарин в своей известной книге о происхождении жизни [15] высказывал мнение, что на самые простые формы неживой материи может быть распространен

дарвиновский принцип отбора и эволюции. Связь между двумя мирами – живым и неживым – может быть установлена при их совместном историческом анализе. В частности, он обращал внимание на то, что кристалл рождается, растет и развивается (изменяется) в течение всей своей жизни. С другой стороны, вирусы (молекулы РНК) могут принимать кристаллическую форму и сохранять ее неопределенно долгое время. Вирус размножается за счет метаболизма того живого организма, в котором он паразитирует. В этих отношениях вирусы представляются образованиями, в каком-то смысле промежуточными между неорганическими кристаллами и живыми организмами.

Соглашаясь принципиально с рассуждениями Опарина об отдаленной аналогии между процессами роста кристаллов и размножением организмов, Дж. Бернал в своей книге на ту же тему [16] говорил, что «*обобщенная кристаллография дает нам ключ к молекулярной биологии*». С тех пор не прекращаются попытки биологов, кристаллографов и минералогов найти в минеральном мире предшественников мира живого. В качестве подложек, на которых, как на матрицах, могли концентрироваться и упорядочиваться (полимеризоваться) белковые молекулы, рассматривались различные минералы (глины, в том числе, каолинит и монтмориллонит, амфиболы, слюды и др.), на поверхностях или в межслоевых пространствах которых обнажаются активные центры, и прежде всего, ионы гидроксила OH^-, способные образовывать водородные связи. Литература на эту тему довольно богата и представлена, в том числе, относительно недавними работами.

В этой связи стоит также заметить, что полуаморфные и скрытокристаллические разновидности кремнезема, содержащие воду (халцедоны, опалы и др.) обладают большим сродством к органическим веществам, биологическим тканям и микроорганизмам и легко образуют совместные постройки. Достаточно напомнить о диатомовых водорослях, которые строят свой панцирь из кремнезема[5]. Наши микроструктурные исследования [17] плохо раскристаллизованных кремнеземов – гейзеритов, образующихся из современных термальных источников, например, на Камчатке, показывают, что они постоянно содержат в себе значительные количества следов микроорганизмов. Древнейшие пластовые строматолиты (возраст 3,5 млрд лет) имеют биогенную природу и считаются аналогами современных цианобактериальных матов. В более молодых протерозойских породах обычны остатки индивидуальных мумифицированных клеток и замещенных кремнеземом микрофоссилий [18].

Попытки осуществить синтез органических веществ с нарушением хиральной симметрии предпринимались неоднократно. Многие из ранних результатов, описанных в книге [19], указывают на возможность использовать энантиомеры неорганических кристаллов и минералов, в частности, кварца, для частичного разделения рацемических смесей органических молекул. Вот несколько примеров такого синтеза: рацемическая смесь (+) и (-)-форм бутанола-2 разделяется измельченным кварцем, причем левый кварц адсорбирует (+)-форму бутанола активнее, чем (-)-форму; правый кварц адсорбирует оптически активный изоамиловый спирт на 2,3 % больше, чем левый кварц; оптически активные цис-формы многих комплексных соединений разделяются на правом и левом кварцах и т.п. Несмотря на то, что достигнутые в лаборатории степени разделения энантиомеров обычно невелики и составляют только доли процента, подобных и даже намного меньших эффектов должно быть вполне достаточно природе для того, чтобы запустить свой вековой механизм спонтанного выделения одной из форм энантиомеров и последующего «оживления» (создания специфических функций жизни) органического вещества. Таким образом, нельзя отрицать, что связь между нарушением симметрии правого и левого в неорганической природе, если она существует, и запуском механизма нарушения хиральности первичной жизни минеральным веществом вполне допустима.

В связи с упомянутыми ранее высказываниями В.И. Вернадского о принципе Реди и его точке зрения о непреодолимом различии симметрии правизны-левизны в косном и живом мирах следует указать на то, что в последние годы своей жизни он уже не был столь убежден в их верности.

[5] *Диатомовые водоросли – важнейшие продуценты органического вещества, которые дают почти четверть всей первичной растительной массы.*

В одной из последних своих работ [20] он писал: «*В наше время этот вопрос едва ли мог так просто трактоваться, как это было возможно в прошлом столетии, когда вопрос об абиогенезе, казалось, был окончательно решен в отрицательном смысле после работ Л. Пастера*». А за четыре месяца до смерти в одном из последних своих писем он сообщал: «*Работы Н.Г. Холодного… заставили меня переменить мои представления о возможности синтеза живого вещества в природе*» (11 сентября 1944 г.) [21].

В заключение нужно заметить, что многие проблемы, поднятые В.И. Вернадским в его трудах в связи с его непреходящим и активным интересом к радикальной роли симметрии-диссимметрии в естествознании и философии, наряду с теми, которые рассмотрены в настоящей работе, явились результатом анализа в недавней книге автора, посвященной 150-летнему юбилею этого великого ученого [22].

Литература

1. ***Вернадский В.И.***
Философские мысли натуралиста. – М.: Наука. – 1988. – 520 с.
2. ***Вейль Г.***
Симметрия. – 1968.
3. ***Кюри М.***
Избранные труды (Серия «Классики науки). – М.-Л. – 1966. – 400 с.
4. ***Шубников А.В.***
Проблема диссимметрии материальных объектов. – М.: Изд. АН СССР. – 1961. – 54 с.
5. ***Грин Б.***
Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. – М.: Изд. URSS. – 2005. – 288 с.
6. ***Урусов В.С.***
Естественный отбор минеральных видов. Зап. Рос. минер. об-ва. – Ч.138, №1. – 2010. – С. 108–129 .
7. ***Урусов В.С.***
Симметрийная статистика минералов и эволюционная диссимметризация минерального вещества. Зап. Рос. минер. об-ва. – 2006. – Ч.135, №6. – С.2–20.
8. ***Леммлейн Г.Г.***
Относительное число правых и левых кристаллов кварца. Зап. мин. общ. – 1944. –Ч.73, вып.2–3. – С. 94–100.
9. ***Вистелиус А.Б.***
О распространенности энантиоморфных типов кварца. Зап. мин. общ. – 1950. – Ч.79, вып.3. – 191–195.
10. ***Дэна Дж., Дэна Э.С., Фрондель К.***
Система минералогии. – Т.3. – Минералы кремнезема. – М.: Мир. – 1966. – 430 с.
11. ***Вульф Ю.В.***
Избранные работы по кристаллофизике и кристаллографии. – М.-Л.: Изд. техн.-теор. лит. – 1952. – 342 с.
12. ***Einstein A.***
Die Ursache der Maanderbildung der Flusslaufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes. Naturwiss. – 1926. – Bd.14. – 223–224.
13. ***Schrodinger E.***
What is life? The physical aspects of the living cells. Cambridge. Cambridge University Press. – 1944.
14. ***Пригожин И., Кондепуди Д.***
Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. – М.: Мир. – 2002. – 461 с.
15. ***Опарин А.И.***
Возникновение и начальное развитие жизни. – М. – 1966.
16. ***Бернал Джон.***
Возникновение жизни. – М.: Мир. – 1969.
17. ***Урусов В.С., Шванская Л.В., Бычков А.Ю. и др.***
Микроструктурные исследования гейзеритов Камчатки. – Вестн. МГУ. – 2008. – Сер. 4, №5. – С. 19–26.
18. ***Федонкин М.А.***
Две летописи жизни: опыт сопоставления. (Палеобиология и геномика оранних этапах эволюции биосферы). В сб.: Проблемы геологии и минералогии. – Сыктывкар. –Геопринт. – 2006. – С.331–350.
19. ***Кублановский Е.И.***
Асимметрический синтез. – М.: Изд. хим. лит. – 1960. – 230 с.
20. ***Вернадский В.И.***
О значении почвенной атмосферы и ее биогенной структуры. – Почвоведение. – 1944. – №4/5. – С.137–143.
21. ***Урусов В.С.***
Вернадский и «прочность научного факта». Вопросы истории естествознания и техники. – 2005. – Вып.2. – С.134–146.
22. ***Урусов В.С.***
Симметрия-диссимметрия в эволюции Мира. От рождения Вселенной до развития жизни на Земле. – Москва. – Изд. URSS. – 2012. – 260 с.

Эволюционные процессы в современной биосфере: идеи В.И. Вернадского, реальность и перспективы развития

Моисеенко Т.И.

Человеческая деятельность привела к интенсивному развитию антропогенно-индуцированных процессов и эволюционным изменениям биосферы. В статье приводятся примеры каскадного развития ряда негативных явлений под влиянием: нарастания содержаний углекислого газа, кислотообразующих агентов, обогащения природных сред металлами, загрязнения стойкими органическими веществами, биогенными элементами. Приводятся доказательства, что органический мир реагирует на антропогенные преобразования активными микроэволюционными процессами. Рассматривается методология определения критических нагрузок как научно обоснованная стратегия ограничения антропогенных воздействий на природу и экологической гармонизации.

Ключевые слова: биосфера, ноосфера, антропогенные воздействия, биогеохимические циклы, эволюционные процессы, критические нагрузки.

Human activity has led to intensive development of the antropogenno-induced processes and evolutionary changes of biosphere. In article examples of cascade development of some the negative phenomena under influence are resulted: increase of maintenances of carbonic gas, acid formation compound, enrichment of environments by metals, pollution by toxic organic substances, nutrient's elements. Proofs are furnished that the biota of world reacts to anthropogenic transformations by active microevolutionary processes. The methodology of definition of critical loads, as the scientifically-proved strategy of restriction of anthropogenous influences on the nature and ecological harmonisation is considered.

Keywords: biosphere, noosphere, human impacts, biogeochemical cycles, evolutionary processes, critical loads.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-00664).
The work was financially supported by RFBR (grant № 13-05-00664).

Учение о биологической эволюции – одна из наиболее актуальных теорий естествознания. Основные исследования посвящены изучению возникновения и развития биосферы в прошлом, эволюции видового разнообразия. Большая часть научных публикаций посвящена изложению новых или развитию устоявшихся воззрений на развитие органического мира в прошлом. Однако чрезвычайно важным для современной науки является «взгляд в будущее». Биосфера организована биогеохимическими циклами необратимых и незамкнутых круговоротов вещества и потоков энергии сквозь ее сферы и уровни организации живого. В историческом срезе происходило вовлечение в миграционные циклы вещества и энергии путем преобразования и усвоения солнечной энергии, которое привело к эволюции биосферы, возрастанию и усложнению многообразия живых организмов.

Стремительный рост численности населения на планете, экстенсивное вовлечение в эксплуатацию минерально-сырьевых ресурсов и технический прогресс драматическим образом отразились на состоянии окружающей среды к середине прошлого столетия. Тысячи новых химических соединений с токсичными свойствами синтезированы в настоящее время и сотни ежегодно добавляются, многие природные элементы, извлеченные из недр и обогащенные в тех-

МОИСЕЕНКО Татьяна Ивановна,
доктор биологических наук, заместитель директора Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, член-корреспондент РАН.**Т.**
Tatiana I. MOISEENKO
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci.(Biol.), Deputy Director of Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry,-
mail: moiseenko.ti@gmail.com.

нологических циклах, включаются в биогеохимические циклы. В.И. Вернадский [1] в начале прошлого столетия отмечал, что человеческая деятельность резким и радикальным образом изменяет течение естественных процессов и преображает то, что мы называем законами природы.

В различных отраслях естествознания, связанных с изучением биосферы, накапливается все больше данных о том, что антропогенное воздействие изменяет геохимическое строение и энергетику биосферы, ее биогеохимические функции и круговорот веществ, приводит к эволюции органического мира. Достаточно много появилось примеров того, что эволюционный процесс захватывает не только отдельные организмы, виды, экосистемы, но и высший уровень организации живого – биосферу. В свою очередь эти преобразования биосферы в целом становятся факторами дальнейшей эволюции ее важнейшего компонента – органического мира [2].

Актуальной задачей современности стало понимание, каким образом антропогенные изменения окружающей среды, которые активно проявились в последние сто лет, повлияют на эволюцию органического мира и биосферы в целом?

Прошлое в индустриальной деятельности на планете не столь длительно, чтобы в настоящий момент можно было бы предсказать все сценарии антропогенной эволюции биосферы и ее элементов в будущем. Тем не менее – основные катастрофы и адаптация выживших организмов в прошлом, их поведение в кризисных ситуациях может дать нам ответы для прогноза будущих сценариев, в свою очередь, настоящее дает ключ к пониманию механизмов изменчивости в прошлом. Загрязнение окружающей среды предоставило нам уникальную модель исследования эволюционного процесса в действии [3]. Огромный эмпирический материал как о негативных воздействиях человека на органический мир, так и о попытках как-то изменить биосферные процессы в сторону улучшения качественного состава экосистем, увеличения их продуктивности, повышения скорости накопления биомассы и т.д. остается критически не проанализированным и мало обобщенным.

Появление человека и влияние его деятельности на окружающую среду представляет собой новое явление в развитии биосферы, закономерный этап ее эволюции. В понимании В.И. Вернадского этот этап должен привести к тому, что под влиянием научной мысли и коллективного труда объединенного человечества, направленных на удовлетворение всех его материальных и духовных потребностей, биосфера Земли должна перейти в новое состояние, которое он предложил назвать «*ноосферой*» (от греческого слова «ноос» – разум) – сферой человеческого разума. Сам термин «ноосфера», как и термин «биосфера», не принадлежит В.И. Вернадскому. Термин «ноосфера» возник в 1927 г. в статьях французского математика Эдуарда Леруа, написанных после прослушанных в 1922–1923 гг. курса лекций В.И. Вернадского по проблемам геохимии и биогеохимии. Однако смысловое наполнение понятия о ноосфере принадлежит В.И. Вернадскому.

В.И. Вернадский начал использовать термин «ноосфера» не как отвлеченное царство разума, а в смысле исторически неизбежной стадии развития биосферы. «*Биосфера XX столетия превращается в ноосферу, создаваемую прежде всего ростом науки, научного понимания и основанного на ней социального труда человечества... Взрыв научного творчества <...> создает переход биосферы в ноосферу*», – пишет Вернадский в 30-е гг. в книге «Научная мысль как планетное явление» [4]. Именно научное знание – проявление ноосферы, которая, в свою очередь, является геологически новым состоянием биосферы, вызванным знанием. «*Научная мысль*, – писал он, – о*хватила всю планету, все на ней находящиеся государства. Всюду создались многочисленные центры научной мысли и научного искания. Это – первая основная предпосылка перехода биосферы в ноосферу*».

Такие признаки формирования ноосферы, как: расселение человечества по всей поверхности Земли; создание единой информационной системы; разработка новых источников энергии; повсеместное создание интеллектуальных центров и вовлечение «*широких народных масс*» в занятие наукой проявились в настоящий период особенно ярко.

В то же время исходные посылки в учении о ноосфере несли в себе элементы утопии, поэтому современники окрестили его концепцию как идеалистическую философию [5]. В понимании В.И. Вернадского ноосфера – это гармоническое соединение природы и общества, это торжество разума и гуманизма, это

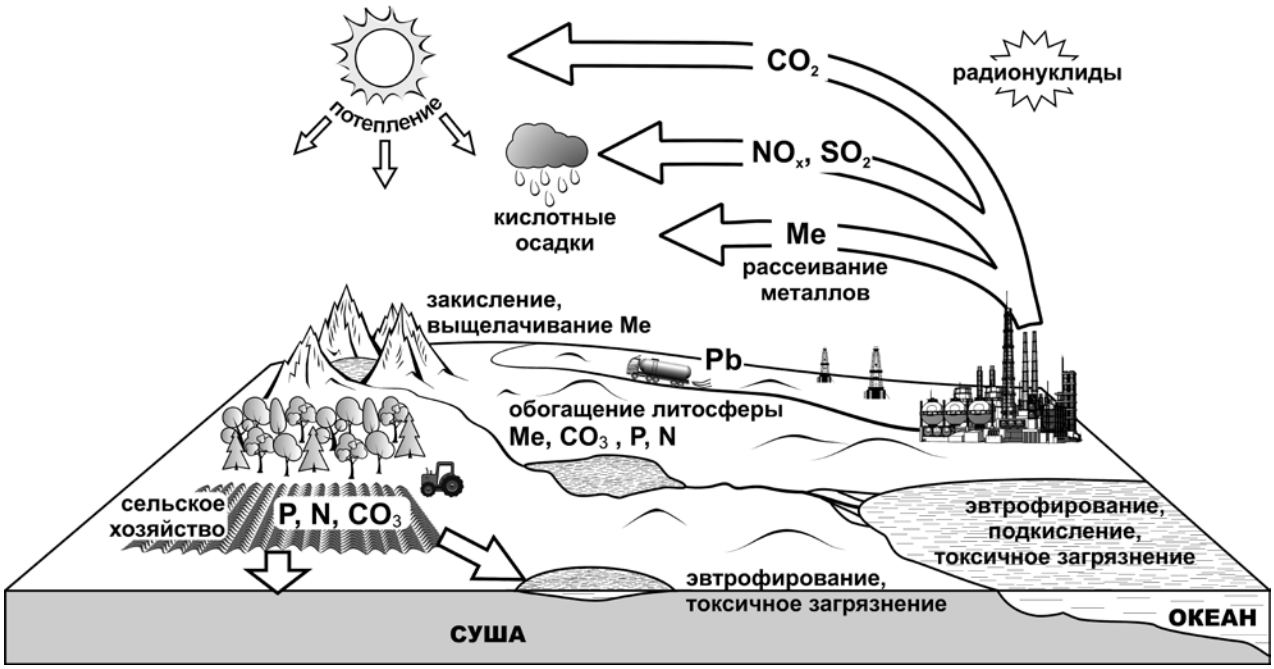


Рис. 1. Схема основных антропогенно-индуцированных процессов в биосфере: Me – металлы с экотоксичными свойствами; CO_3 – стойкие органические загрязняющие вещества (суперэкотоксиканты); NO_x, SO_2 – кислотообразующие газы; P – фосфор и N – азот, элементы, стимулирующие эвтрофирование водных систем

слитые воедино наука, общественное развитие и государственная политика на благо человека, это – мир без оружия, войн и экологических проблем, это – мечта, цель, стоящая перед людьми доброй воли, это – вера в великую миссию науки и человечества, вооруженного наукой.

Так ли утопичны были идеи В.И. Вернадского? В провозглашенной стратегии устойчивого развития стран заложены сходные принципы сбалансированных социальных, экономических и экологических отношений. В современный период, осмысливая наследие великого ученого и мыслителя, мы понимаем, что он сформулировал основные принципы гармоничной ко-эволюции человечества и природы. Мысль В.И. Вернадского о ноосфере опередила свое время и даже настоящее.

Основные антропогенно-индуцированные процессы

Реальность такова, что человек изменял, изменяет и впредь будет изменять окружающую среду в процессе технического прогресса и своей жизнедеятельности. Антропогенно-обусловленные изменения в биосфере происходят под воздействием многих сопряженных факторов, наложение которых может усиливать или нивелировать действие каждого из них, к тому же развивается каскадная реакция последовательных преобразований биогеохимических циклов в биосфере, захватывающая все оболочки Земли и их население. Изменения биогеохимических циклов порождают следующие основные факторы (рис.1):

- добыча и сжигание углеводородного топлива, приводящее к увеличению парниковых газов и нарушению цикла углерода;
- извлечение из недр, обогащение руд и выплавка металлов, приводящая к их рассеиванию в окружающей среде и выбросам кислотообразующих газов;
- синтез тысяч новых химических соединений с токсичными свойствами, которые включаются в биогеохимический круговорот;
- искусственное внесение в почву биогенных веществ в виде удобрений, приводящее к нарушению цикла фосфора и азота;
- нарушение природных ландшафтов: опустынивание из-за неправильного использования земель; расширение площади антропогенных пустошей вокруг крупных производств; ветровая и водная эрозия почв; заболачивание и вторичное засоление; отчуждение земель для строительства и других целей; ак-

тивизация оползней, карста, селей, подтопления, мерзлотных и других неблагоприятных процессов.

Приведенный перечень факторов, определяющих нарушение биогеохимических циклов, далеко не полон, но достаточен, чтобы сформулировать главный вопрос: каким образом антропогенные изменения окружающей среды, которые активно проявились за последние сто лет, повлияют на эволюцию органического мира и биосферы в целом? Приведем характеристику наиболее значимых антропогенно-индуцированных процессов, которые развиваются в современной биосфере.

Потепление климата и нарушение цикла углерода

Наибольшее внимание научная мысль в последние годы сосредоточила на изучении потепления климата, как следствие увеличения парниковых газов в атмосфере. Результаты последних исследований подкрепляют гипотезу о том, что в глобальное потепление климата в современный период большой вклад вносит и человеческая деятельность. Согласно таковым, с 1980 г. средняя температура воздуха на планете увеличилась на 0,5 градуса по Цельсию, и Земля продолжает нагреваться примерно на 0,16 градуса за десятилетие. Наиболее доказанными эффектами потепления биосферы являются неустойчивость погоды, изменение осадков и нарушение гидрологических циклов – увеличение засушливых периодов и опустынивание в теплом климате; увеличение осадков – в гумидных зонах. Возрастание содержания углерода в сочетании с температурой приводит к повышению биопродуктивности лесов, океана, рек и озер [6].

Известно, что в результате прошлых событий на Земле теплые эпохи сменялись похолоданиями, затем вновь наступало потепление. 60–70 млн лет назад концентрация CO_2 была вдвое выше, чем теперь [7]. На этом фоне современные процессы в геологичес-ком срезе, казалось бы, ничтожны, но они запускают каскад сложных необратимых процессов в биосфере, изменяя круговорот вещества и энергии. Например, одним из побочных эффектов потепления климата является феномен подкисления поверхностных слоев океана. До начала индустриализации значение pH океанической воды было 8,16, сейчас – 8,05. Как указано в работе [6], в течение XXI в. показатель кислотности (pH) поверхностных вод океана может снизиться на 0,14–0,4 единицы, то есть до значений 7,96–7,7. Причины этого феномена до конца не поняты, но большая часть ученых связывает подкисление океана с увеличением содержания углекислоты в атмосфере. CO_2 растворяется в океане, вступает в реакцию с морской водой и снижает уровень pH. По мнению J.Bijma et al.[8], закисление мирового океана происходит быстрее, чем когда-либо в истории Земли, и если взглянуть на уровни парциального давления двуокиси углерода, которых мы уже достигли, то нужно вернуться на 35 млн лет назад, чтобы найти эквиваленты.

Изменение этого показателя среды обитания влечет цепную реакцию перестроек в морских экосистемах. Исследователи предполагают, что повышение кислотности океана негативно отразится на многих организмах, таких как кораллы, ракушки, водоросли и планктон, поскольку становится меньше доступных ионов карбоната, а значит, уменьшит степень кальцификации организмов. Несомненно, что снижение значений pH океанических поверхностных вод повлияет и на более высокие морские формы жизни, что может вызвать изменение всей пищевой цепи [8]. Вместе с тем, механизмы ответных реакций биологических систем очень сложны, и часто возникающие явления в природе противоречит устоявшимся гипотезам. Например, недавние исследования зарегистрировали вспышки развития в Северных морях одноклеточной водоросли кокколитофоры с известковым скелетом, на развитие которых должно бы негативно отразиться подкисление океана. По данным M.D. Iglesias-Rodriguez et al. [9] наряду с высокой интенсивностью развития этой водоросли наблюдается и увеличение размеров их клеток. Эти показатели хорошо согласуются с данными по тенденции роста температуры и концентрации CO_2 в атмосфере, что свидетельствует о стимулирующем влиянии потепления климата на развитие этой водоросли. Этот процесс индуцирован наряду с потеплением климата и поступлением биогенных элементов в океаны.

Еще один феномен, связанный с повышением интенсивного развития кокколитофоры. Наряду с фотосинтезирующей активностью, эти водоросли для повышения свой плавучести вырабатывают диметил-

сульфат, который в атмосфере может переноситься на дальние расстояния и преобразовываться в атмосфере в серную кислоту, вызывая в местах разгрузки и выпадения кислот нарушения биогеохимических циклов: выщелачивание катионов, включая металлы, из подстилающих пород, нарушение кислотно-щелочного равновесия в водах суши и локальное закисление пресных вод.

К явлениям, возникающим в тех или иных участках планеты вследствие разбалансировки климатической системы, можно отнести усиление штормовых ситуаций, как широко известного явления [6]. К новым процессам следует отнести феномен появления кислотных эпизодов на небольших реках в прибрежных зонах. Наиболее ярко этот феномен проявился в северных провинциях Англии и Скандинавских странах, также был установлен на Кольском Севере. Природа этого явления объясняется повышенным поступлением морских аэрозолей в течение шторма на прибрежные водосборы, почвы которых обеднены кальцием и ионно-обменного преобразования NaCl в соляную кислоту[10]. Особо этот процесс опасен в период захода анадромных рыб (лососей) в зону смешения подкисленной пресной воды с морской.

Одним из значимых опосредованных последствий потепления климата в Северных широтах является локальное повышение содержания органического вещества в водотоках. По нашим исследованиям, за двадцать последних лет содержание углерода в водотоках Российского Севера увеличилось на 11% при одновременном снижении содержания кальция. Исходя из этих данных можно ориентировочно рассчитать, что сток углерода в арктические моря за последние 20 лет увеличился ориентировочно на 350 т/ год. Несколько гипотез было предложено, чтобы объяснить увеличение органического вещества в водотоках, большая часть ученых связывает это явление с потеплением климата, другие – с нарушениями биогеохимических циклов в системе «водосбор-водоем» под влиянием кислотных осадков [11]. Тем не менее, увеличение экспорта органического углерода в океаны может повлечь локальные экосистемные перестройки в прибрежных зонах.

Эти примеры наглядно демонстрируют каскадную реакцию биосферных процессов под влиянием незначительного в историческом срезе увеличения содержания парниковых газов. Очевидно, что с каждым годом по мере развития исследований мы будем все больше понимать природу происходящих явлений и последствий антропогенного изменения цикла углерода и потепления климата как при сопряжении с другими процессами, так и каскадную последовательность проявления различных феноменов.

Биогенное загрязнение, цикл фосфора и азота

Природный фосфор попадает в окружающую среду в результате химического выветривания пород, около 1 млн тонн ежегодно добавляется в естественный круговорот этого элемента. На полях или в виде минеральных удобрений используют около 20 млн тонн фосфора, усваивается растениями только 60%, остальное смывается в реки и океан, рассеивается с пылевыми частицами, что приводит к обогащению сфер этим элементом, повышению продуктивности и эвтрофированию водных систем [12]. Если взять пример по добычи апатита, то менее 1% концентрата фосфора от переработанной руды достигает полей и еще меньше усваивается растениями. Остальное рассеивается в окружающей среде, приводя к эвтрофированию водных объектов, включая окраинные моря.

Глобальное нарастание содержания азота на суше и в морях происходит вследствие их загрязнения удобрениями, хозяйственно-бытовыми сточными водами, сжигания топлива и выпадения из загрязненной атмосферы. Всего человечеством мобилизуется около 150 млн тонн азота ежегодно. В историческом срезе выбросы NO_X начали увеличиваться в конце 1800-х гг., и особенно в начале 1900-х гг. Эмиссия NH_3 в окружающую среду от использования удобрений стала стремительно нарастать в последние три десятилетия, особенно в азиатских странах, и превысила NO_X эмиссию уже в конце 1980-х. По оценкам J.N. Galloway et al. [13] производство окислов азота от сжигания топлива определяется в 20 млн тонн N/год, что вдвое выше естественной эмиссии, оцененной в 9 млн тонн N/год. За счет минеральных удобрений в окружающую среду добавляется еще около 80 млн тонн N/год. Дополнительно около 50 млн тонн N/год высвобождается в атмосферу в виде NH_3, что в 2,5 раза больше по сравнению с поступлением NO_X от сгорания

каменного угля. Выбросы NO_X превалируют в странах с высоким валовым национальным продуктом, а эмиссия NH_3 – в странах, ориентированных на производство продовольствия. Бесспорно, приведенные глобальные оценки являются приближенными, но позволяют осознать значимость вовлечения этого элемента в биогеохимические циклы.

Несмотря на то, что человечество научилось контролировать процесс эвтрофирования для водных систем, сопряженное влияние обогащения гидросферы фосфором и азотом в ряде озер и прибрежных зон приводит к катастрофическому размножению сине-зеленых водорослей, способных выделять природные токсины нейропаралитического действия, обуславливать заморы гидробионтов, что ведет к цепной реакции необратимых изменений в экосистемах. Глобальное потепление и рост температуры воды в океанах, который наблюдается сейчас, могут дополнительно стимулировать размножение водорослей и формировать бескислородные условий у дна эвтрофируемых озер и заливов в морях.

Если проанализировать прошлые эпохи, то можем найти свидетельства сходных экологических катастроф. J.W. Castle, J.H. Rodgers [14] обнаружили интересное свидетельство в пользу того, что водоросли способны вызывать и глобальные катастрофы. Анализ геологических слоев показал, что удары астероида сопровождались массовым вымиранием не только наземных и морских организмов со сдвигом по времени. Была выдвинута гипотеза, что вследствие огромного выбросов пыли при взрывах и пожарах резко возрастал поток биогенных элементов в окружающую среду, в озерах и морях формировались толстые маты из сине-зеленных водорослей, которые могли отравлять все вокруг выделяемыми токсинами. Из водных систем токсины могли попадать в грунтовые воды, проникать в растения и далее по пищевым цепям попадать в организмы травоядных животных, приводя к масштабным вымираниям. Ученые отмечают, что полученные ими результаты касаются не только истории жизни на Земле, но и ее будущего. Вследствие нарушения биогеохимических циклов азота и фосфора, нарастания их содержаний в биосфере отмечается практически повсеместно интенсивное развития сине-зеленных водорослей. Известно, что выделяемые ими токсины относятся к ядам нервно-паралитического действия.

Азот в биосфере имеет более сложный цикл, индуцируя процессы различной экологической направленности, в которых обогащение биосферы азотом играет ключевые функции: эвтрофирующие, закисляющие и экотоксичные [15]. Остановимся кратко на наименее известных эффектах загрязнения азотом гидросферы – его свойствах образовывать как в водной среде, так и эндогенно в самих организмах очень токсичных органических азотных соединений – нит-розаминов. Присутствие нитрозаминов даже в незначительных количествах, не превышающих допус-тимых уровней, может отрицательно отразиться как на здоровье рыб, так и на здоровье их потребителей, включая человека. Нитрозамины могут вызывать опухоли практически любого органа у животных и человека, обладают мутагенным и трансплацентарным эффектами. В ряде локальных мест Черного моря обнаружены в воде и в мышцах промысловых рыб высокие концентрации нитрозамина, как следствие обогащения азотом водной среды [15]. Сократить поток антропогенного азота и фосфора в биосферу весьма затруднительно, поскольку именно минеральные удобрения являются необходим условием дальнейшего обеспечения человечества продовольствием.

Кислотные осадки

Глобальное загрязнение атмосферы кислотообразующими веществами (окислами серы и азота) в течение прошлого столетия, главным образом от сгорания мазута, каменного угля и в процессе выплавки металлических руд, привело к формированию кислотных осадков, которые обусловили закисление почв и вод. Уровень эмиссии антропогенной серы в Европе и Северной Америке быстрого нарастал в начале прошлого века и к его середине достиг максимальных значений [13]. В последние 20 лет, несмотря на существенные снижение выбросов SO_2 в Европе и Северной Америке, выпадения сульфатов на водосборы превышают уровень доиндустриального периода по крайней мере в 10 раз (табл.1). Как отмечалось, выбросы азота – возрастают.

Несмотря на наметившуюся в последние годы тенденцию снижения выбросов в развитых странах, по

Эквиваленты кислот	1990	2000	2025	2050	2100
Природные					
SO_x, млн т-экв	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
NO_x, млн т-экв	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Антропогенные					
SO_x, млн т-экв	1,8	1,9	2,9	3,8	3,6
NO_x, млн т-экв	1,4	1,5	2,3	3,0	4,1
ВСЕГО	4,6	4,8	6,6	8,2	9,1

Таблица 1. Поступление химических элементов (тыс. т./год) в окружающую среду и озера за счет природных процессов, а также объемы антропогенного поступления в озера и окружающую среду по оценкам различных авторов. Цитируется из работы [17]

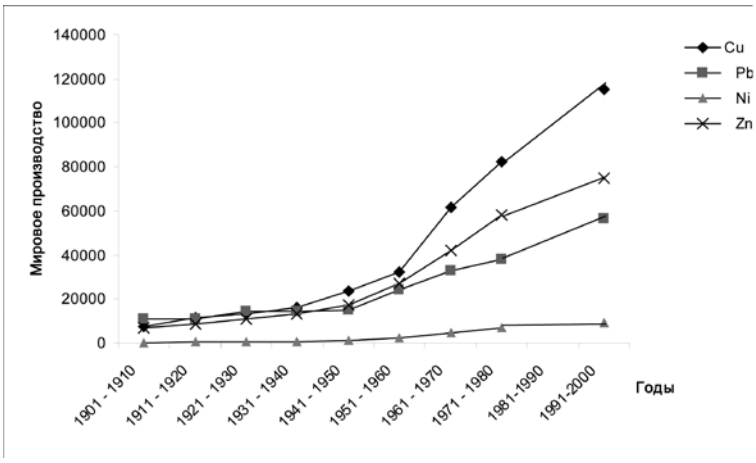
прогнозным данным эмиссия кислотообразующих газов в глобальной шкале увеличится как следствие наращивания производства развивающимися странами, в особенности Китаем. Кислотные осадки изменяют транспортные потоки элементов в оболочках Земли, ускоряют химическое выветривание основных катионов и металлов, изменяют биогеохимические циклы элементов в литосфере и пресноводной гидросфере. Под влиянием выпадения кислотообразующих веществ и их сухого поглощения подстилающей поверхностью: снижается насыщение почв на водосборе обменными основаниями и соответственно их содержания в поверхностных и подземных водах, уменьшается щелочность вод как следствие вытеснения гидрокарбонатов более сильными техногенными кислотами, происходит выщелачивание металлов из слагающих водосборы пород (Al, Cd, Zn, Mn и др.). На всех уровнях закисленных экосистем отмечается снижение биоразнообразия вследствие элиминации наиболее чувствительных к низким pH видов. Причиной деградации популяций рыб в закисленных водных системах является не столько воздействие низких pH, сколько Al^{3+} и других металлов, которые выщелачиваются и мигрируют в водные системы в наиболее токсичных ионных формах[16].

Обогащения тяжелыми металлами

Добытые из недр Земли и обогащенные в технологических циклах, многие элементы в окружающей сре-

Таблица 2. Прогнозный сценарий антропогенной эмиссии кислотообразующих веществ из природных и антропогенных источников, пересчитанный на эквиваленты продуцированных кислот. Цитируется по [13]

Элемент	Поступление за счет химического выветривания		Антропогенное поступление	
	Речной сток	Сток из озер за счет природных процессов	В озера	В окружающую среду
Cr	60,0	37	63	54–130
Mn	440	271	2903	-
Fe	25000	15375	31925	-
Ni	300	184	161	47,4; 43–98
Cu	375	231	229	56; 56–263
Zn	370	227	693	314; 315–840
Mo	13	8	92	-
Ag	5	3,1	3,9	-
Cd	4,6	2,9	43	7–11
Sn	1,5	1	26	-
Sb	1,3	0,8	22,2	-
Pb	180;	111	119	449; 360–440
Hg	3	1,8	-	5–10



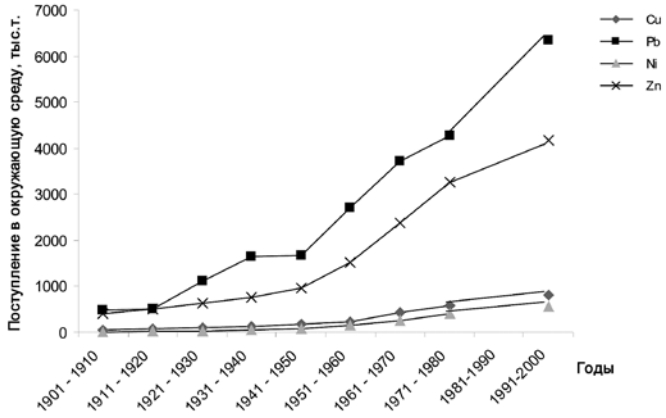


Рис. 2. Мировое производство, тыс. тонн за 10 лет (а) и глобальное поступление в окружающую среду Cu, Pb, Ni, Zn за период 1901–2000 гг. (б)

де приобретают токсичные свойства. Технофильность многих металлов, т.е. отношение их ежегодной добычи к Кларку в земной коре, достигает высоких значений: Pb – 2×10^9, Cu – 1,1×109, Cd – 1×108, Zn – 4×107, Sr – 7×106, Ni – 7×106 [16]. Металлы поступают в окружающую среду в составе стоков и выбросов различных производств, отвалов пород, диффузных источников, выщелачиваются кислотными осадками. Это хорошо иллюстрируется на примере анализа динамики кривых роста мирового производства металлов, и поступления этих же элементов в окружающую среду в течение XX в., например, по Cu, Pb, Zn и Ni (рис.2).

Все металлы подразделяются на эссенциальные, т.е. жизненно-необходимые (Co, Zn, Cu, Mn и др.), но способные в высоких концентрациях оказывать токсичное действие, и не-эссенциальные: Hg, Pb, Cd. Не-эссенциальные металлы могут быть токсичными при очень низких уровнях содержаний в окружающей среде. Поток элементов в биосферу за счет антропогенной деятельности по оценкам различных авторов приведен в таблице 2. Несмотря на некоторые различия в оценках, очевидно, что техногенные потоки превышают природные процессы химического выветривания элементов. Ярким примером является наиболее токсичный элемент – ртуть.

В таблице 3 представлены содержания ртути в основных

Таблица 3. Потоки и содержание ртути в основных сферах Земли, их увеличение за счет антропогенной деятельности. Составлена по данным [18]

Потоки, Ммоль	Доиндустриальный период	Современный период
Эмиссия в атмосферу		
Вулканы	0,45	0,45
Дегазация мантии	4,0	8,0
Эвапорация с поверхности океана	6,5	13
Промышленные выбросы	0	12,0
Выпадение на поверхность и сток в океан		
Речной сток	0,2	1,0
Атмосферные выпадения	6,7	15,4
Поступление на сушу		
Атмосферные выпадения	4,25	12,9
Отходы производств (стоки, свалки и т.д.)	0	4,7
Содержание в сферах Земли		
Атмосфера	8	25
Литосфера	4700	5000
Гидросфера	1320	1440
Увеличение содержания в год		
Атмосфера	–	0,5
Литосфера	–	8,6
Гидросфера	–	2,4

сферах Земли и их увеличение за счет антропогенной деятельности [18]. Анализ территориального распределения элементов и коэффициентов их водной миграции в водах суши подтвердил, что вследствие техногенного рассеивания элементов в глобальном (региональном) масштабе и выщелачивания кислотными осадками имеет тенденция обогащения вод такими опасными элементами, как Pb, Cd, Al, Cr. Заслуживают большего внимания исследования таких опасных анионногенных элементов, как As и особенно Se. Известно, что целый ряд массовых заболеваний человека связан с образованием техногенных геохимических аномалий: ртуть обладает нейрологическими эффектами, кадмий и свинец обладают канцерогенными и гонадотоксичными свойствами; избыток микроэлементов в организме приводит к эндемичным заболеваниям: стронций к патологиям костных тканей, молибден – к подагре, медь – к анемии и др. В последние годы широкую известность получают новые токсикологичес- кие свойства элементов. В результате широкого развития электронной индустрии отмечается рост таких элементов как Pt, Rh, Pd, Ga, и Ir с неисследованными экотоксичными их свойствами. Следует отметить, что экотоксичность многих элементов для живых организмов определяется как свойствами самих металлов, так и формами нахождения в природных средах. Примером может служить алюминий, который широко представлен в литосфере, но в ионных формах (например, при выщелачивании кислотными осадками) обладает токсичными свойствами для живых организмов и может вызывать ряд нейрологических заболеваний человека. Ртуть обладает высокой приникающей способностью в форме метилртути, которая образуется более активно при наложении других процессов, таких как закисление вод, или обогащении их органическими кислотами [17]. Эти примеры демонстрируют, что сопряжение ряда антропогенно-индуцированных процессов в биосфере, интегральный эффект которых мало исследован, может приводить к ускорению биогеохимической миграции элементов в сферах земли, формированию токсичных условий.

В истории Земли неоднократно возникали ситуации, как, например, извержения вулканов, когда в окружающую среду поступали огромные количества металлов, включая ртуть. В настоящее время извержения вулканов добавляют от 0,7 до 3,0 тонн ртути в год [18]. Органический мир в этих ситуациях или погибал или приспосабливался. Феномен адаптации организмов к высоким концентрациям металлов являются своеобразные морские глубоководные биоценозы вокруг «черных курильщиков», где встречаются аномально высокие концентрации металлов в воде и приспособившихся к этим условиям организмов.

Синтезированные органические ксенобиотики

Высокую опасность для окружающей среды представляют токсичные органические соединения, включающие синтезированные новые вещества и активированные из природных источников, полученные в процессе сгорания углеводородного сырья или как побочные продукты различных производств. Их содержание в окружающей среде стремительно нарастает. По оценкам EPA [19], общее число используемых синтезированных химических веществ насчитывается более 5 млн наименований, включающих: 100 тыс. – в оптовой и розничной торговле, 72 тыс. – в промышленных производствах (в миллионах видов продуктов), 8,7 тыс. – в качестве пищевых добавок, 7,5 тыс. – как косметических ингредиенты в 40 тыс. видов продуктов, 3,3 тыс. – в фармацевтические препаратах, 600 – при производстве пестицидов (21 тыс. различных производных), и более 2 тыс. ежегодно создается новых веществ.

Новые органические синтезированные вещества, вовлекаясь в глобальные транспортные потоки веществ в биосфере, способны долго циклировать, отравляя воздух, воду и продукты питания. К суперэкотоксикантам относятся стойкие органические загрязнения (CO_3): хлорорганические пестициды, диоксины, фураны и другие. Они распространяются в окружающей среде далеко за пределы своего первоначального местонахождения. Остатки хлорорганических пестицидов найдены в жире тюленей и грудном молоке женщин из районов Крайнего севера: Гренландии, Канаде и Сибири. В начале 1990-х гг. было осознано, что содержание CO_3 в окружающей среде неуклонно возрастает. Во многих странах мира были введены специальные меры по ограничению распространения этих веществ в окружающей среде, однако загрязнение природных сред суперток-

сикантами продолжало увеличиваться. Если в европейских странах и Америке их использование запрещено уже давно, то многие развивающиеся страны продолжают их использование.

В 1992 г. была принята Стокгольмская конвенция по ограничению CO_3 и было выделено 12 наиболее токсичных веществ, которые условно делятся на: 1) пестициды: альдрин; дильдрин; эндрин; гептахлор; ДДТ; мирекс; токсафен; хлордан; гексахлорбензол (является также промышленным CO_3 и отходом производства); 2) промышленные вещества (полихлорированные бифенилы – ПХБ); 3) побочные продукты (диоксины и фураны). Однако под этим списком не подведена окончательная черта.

Следует отметить, что практически все известные стойкие органические загрязнители образуют некие системы (по-разному сформированные и структурированные в зависимости от их генезиса). В данных оценках предполагается, что в перспективе накопление этих веществ в биосфере будет продолжаться, более 20 тыс. тонн опасных веществ будет накоплено в странах Африки, более 80 тыс. тонн – в Азии и Латинской Америке и более 200 тыс. тонн в Центральной и Западной Европе. Чтобы удалить пестициды только из Африки и Ближнего Востока, потребуется 24 млн $[19].

Радиологическая нагрузка на биосферу

Глобальное радиоактивное загрязнение составляло к середине 70-х гг. более 1,5 Гкюри (гигакюри) в результате ядерных взрывов и более 5 Мкюри (мегакюри) – вследствие поступления в Мировой океан радиоактивных отходов. Наиболее загрязнены районы умеренных широт, особенно в Северном полушарии. Характерные антропогенные радиационные воздействия на окружающую среду: загрязнение атмосферы и территорий продуктами ядерных взрывов при испытаниях ядерного оружия в 60-е гг.; отравление воздушного бассейна выбросами радиоактивной пыли, загрязнение территорий шлаками, содержащими радиоактивные вещества, выбросы при сжигании ископаемых топлив на электростанциях; загрязнение территорий при авариях на атомных станциях и предприятиях [20]. Включаясь в многообразные биогеохимические циклы, радиоактивные вещества распространяются в окружающей среде, попадают в растения, в организмы животных и человека. Научная литература по различным аспектам негативного воздействия радионуклидов на живые организмы огромна.

Подводя итог возможно неполному анализу факторов изменения биогеохимических циклов веществ в биосфере, очевидно, что предсказанное В.И. Вернадским влияние человеческой деятельности на биосферу, как геологического фактора эволюции, огромно и протекает в многократно более сжатые временные отрезки по сравнению с геологическими процессами и периодом формированием современного облика биосферы.

Эволюционно-определенные механизмы адаптаций живых организмов

Несмотря на очевидный прогресс в познании природных явлений, сложно сказать, что все протекающие процессы в биосфере поняты до конца, и тем более законы преобразования природы под влиянием человеческой деятельности. Современный период антропогенных преобразований на планете можно сопоставить с переломными моментами в развитии биосферы и ее преобразования, антропогенные изменения средообразующих факторов становятся факторами дальнейшей эволюции ее важнейшего компонента – органического мира.

Одним из первых В.И. Вернадский обосновал идею об эволюции поверхностной оболочки Земли как о целостном процессе взаимодействия живых организмов и косной материи [1]. Загрязнение окружающей среды в современных условиях входит в ряд ведущих абиотических факторов, воздействующих на популяции растений и животных. В последнее время в биологии все чаще появляются примеры, показывающие, что живые организмы реагируют на антропогенное загрязнение активными адаптивными процессами [21, 22, 23].

В эволюции биосферы происходили природные катаклизмы и возникали экстремальные условия. Живые организмы сталкивались с преодолением тех или иных неблагоприятных воздействий и у них выработались механизмы защиты и сохранения жизнеспособности в процессе эволюционного развития. Загрязнение окружающей среды, бесспорно, создает

экстремальные условия для жизни. С.С. Шварц [24] отмечал, что при изменениях образа жизни, которые связаны с обитанием в более суровом климате, или в условиях пониженного атмосферного давления, или же требующим вести более активный образ жизни, т.е. в любых экстремальных условиях, животные несут дополнительные энергетические затраты. Закономерности подобного характера выражены столь отчетливо, что они возводятся в ранг «законов». Способность выживать в условиях загрязнения регулируется различными механизмами: избегание, снижение чувствительности и клеточной проницаемости к ядам, повышение активности функциональных оксидаз, индукция металлотионенинов, секвестрование, усиленная экскреция экотоксикантов [25].

Универсальность главного адаптационного синдрома у животных, выработанная в процессе эволюционного развития, на действие любого стрессового фактора широко известна. На первой стадии происходит быстрое увеличение адреналина и норадреналина с одновременной мобилизацией и высвобождением гликогена в кровь, повышение сахара в крови, подъем давления, учащение сердцебиения. Эти физиологические реакции мобилизуют организм на «борьбу» или «избегание». Если стрессовые условия продолжаются, стимулируется кора надпочечников и высвобождается кортизол, который поддерживает изменения, вызванные адреналином, а также приводит к прогрессированию катаболических процессов, поступлению в плазму крови аминокислот и развитию целого комплекса физиологических изменений [25].

Наиболее опасными явлением в биосфере является появление синтезированных токсичных веществ и обогащение сфер токсичными элементами, такими как ртуть, кадмий, свинец. Накоплены многочисленные научные факты о генетических изменениях в популяциях животных под влиянием токсичного загрязнения, которые подтверждают существование антропогенной микроэволюции [21, 22, 23, 25]. Основным выводом этих работ является то, что в условиях загрязнения, с одной стороны, будет происходить потеря генетического разнообразия и накопление рецессивных мутаций; с другой – высокие концентрации загрязняющих веществ будут являться фактором селекции, которая направлена на отбор наиболее устойчивых генотипов, что неизбежно отразится на генетическом пуле. Редукция генетического разнообразия может увеличить устойчивость к определенному виду токсиканта, но снизить адаптивные возможности в целом популяций животных к другим стрессовым условиям. Селекция толерантных генотипов к действию загрязняющих веществ может сигнализировать, что популяция находится под давлением загрязнения длительный период.

Такие биохимические механизмы поддержания гомеостаза, как активация ферментов, осуществляющих в организме биотрансформацию и коньюгацию органических ксенобиотиков, продуцирование белков теплового шока или специфических белков – металлотионенинов, с помощью которых осуществляется детоксикация и выведение металлов из организма, и многие другие механизмы противодействия токсичных веществ выработаны организмами в процессе переживания кризисных ситуаций, которые в прошлом не раз происходили на планете.

Вместе с тем, вопросы, каким образом влияние токсичных веществ отразится на генетической структуре популяции, к каким отдаленным последствиям приведут нарушения на молекулярно-клеточном и организменном уровне, пока не являются до конца выясненными и чрезвычайно важны в теоретической экологии.

Концепция критических нагрузок в ограничении антропогенных воздейсвий

В определении стратегии взаимодействия человека с природой все больше надо учитывать ныне идущий стихийный процесс эволюции биосферы, в котором сложно учесть все взаимообусловленные процессы и отдаленные последствия нашего вмешательства в природные механизмы. Основная задача в изу чении эволюции биосферы, по мнению В.И. Вернадского, заключалась в установлении связи «эволюции видов с механизмом биосферы, с ходом биогеохимических процессов» [4].

Вместе с тем, огромный эмпирический материал как о негативных воздействиях человека на сферы Земли, так и преобразованиях органического мира требуют решений об огра-

Рис. 3. Блок-схема определения критических антропогенных нагрузок на экосистемы

ничении нашего негативного влияния и сохранения благоприятных условий жизни. Очевидно, что развитие цивилизации остановить невозможно, поэтому биосфера будет эволюционировать и в дальнейшем, но направленность и скорость этого процесса во многом определяется и нашей деятельностью. Приведенные выше примеры показывают, что загрязнение приводит к каскадным изменениям глобальных биогеохимических циклов и соответственно – эволюции биосферы как необратимого процесса.

В.И. Вернадский, отмечая качественный перелом в истории биосферы, писал: «Мы живем в исключительное время в истории нашей планеты, в психозойскую эру, когда создается новое ее состояние – ноосфера и когда геологическая роль человека начинает господствовать в биосфере и открываются горизонты его будущего развития» [4]. Логичен вопрос: мысль В.И. Вернадского о ноосфере, как состоянии гармоничной ко-эволюции человечества и биосферы – это утопия или достижимая цель с позиций современной науки?

В 1970–1980-х гг., когда были осознаны все катастрофические последствия индустриальной деятельности на планете, была сформулирована концепция нормирования с учетом «ассимиляционной емкости», «самоочищения» или «буферной способности» природных систем [26]. Ряд западных ученых ее подвергали ожесточенной критике как легализующую загрязнение. Был выдвинут принцип «нулевого» сброса, который, в свою очередь, по нашему мнению, утопичен. Бесспорно, принцип предотвращения загрязнения, взамен борьбы с последствиями должен являться одним из руководящих. Как уже отмечалось, в процессе своей жизнедеятельности человек изменял, изменяет и впредь будет видоизменять среду обитания. Вопрос в том, как определить ту грань, «красную черту» именно допустимых с нашей точки зрения изменений?

До настоящего времени в российской практике, как и большинстве зарубежных стран, решение об ограничении антропогенных нагрузок принимается на основе сопоставления измеренных концентраций отдельных загрязняющих веществ и сравнения их с предельно допустимыми значениями (ПДК). Не ново мнение, что система ограничений поступления загрязняющих веществ, основанная на данных о ПДК вредных веществ, не совершенна, не дает адекватной оценки состояния природных сред.

В последние десятилетия развитие получает концепция критических нагрузок как научно обоснованная стратегия предотвращения деградации природных комплексов и управления состоянием природных объектов [27]. Под критическими нагрузками понимается максимально допустимый поток поступления одного или нескольких загрязняющих веществ в экосистему, не вызывающий негативных изменений в наиболее чувствительных ее звеньях. В основе

теории лежит решение сложных фундаментальных задач в области наук о Земле и о Жизни, таких как: закономерности поступления и поведения антропогенно-привнесенных элементов, взаимодействие с природными факторами, включение в естественный круговорот элементов в природе, а также механизмы антропогенной изменчивости биологических систем, устойчивость и пределы адаптации, отдаленные последствие влияния экотоксикантов на живые организмы. Без их изучения невозможно определить, сколь долго природная среда способна ассимилировать поток загрязнений без негативных последствий для живых систем, т.е. до каких разумных пределов можно воздействовать на окружающую среду. Блок-схема расчета критических нагрузок на рис. 3 отражает конвергенцию научных дисциплин в этих определениях, направленных на рациональное управление антропогенными воздействиями. Как показано выше, современный период характеризуется большим разнообразием антропогенно-индуцированных явлений в природе, когда на живые организмы воздействует результатирующая всех прямых и опосредованных эффектов комплекса загрязнений, климатических факторов, изменения ландшафтов и биогеохимических циклов. По мере развития науки и совершенствования аналитических измерений наши представления о происходящих процессах в окружающей среде и допустимости их воздействий на живые организмы будут постоянно развиваться и уточняться. Вместе с тем сложившаяся на сегодняшний день экологическая ситуация требует достоверных решений, приближающих нас к пониманию происходящих явлений в природе на современном уровне знаний и сохранению благоприятных условий жизнеобитания.

Можно привести ряд примеров из отечественной и международной практики, когда были выполнены расчеты по разработанным методам определения критических нагрузок и показан необходимый уровень снижения поступлений тех или иных опасных веществ в наземные и водные экосистемы. Полученные научно обоснованные данные ложились в основу принятия согласованных международных решений по снижению выбросов наиболее опасных загрязняющих веществ (Готебургская конвенция по снижению выбросов кислотообразующих газов, Стокгольмская конвенция по CO_3, готовятся решения по ртути и др.). Современная наука позволила рассчитать допустимый поток биогенных элементов в водные экосистемы, что привело к олиготрофикации ряда озер (включая Великие) и рек, восстановилось качество вод после закисления в ряде водоемов Скандинавии и Северной Америки, снизились содержания токсичных металлов в Европе и Северной Америке.

Заключение

Рост народонаселения на планете и технический прогресс предполагает вовлечение новых ресурсов, формирование отходов производства, что неизбежно будет в дальнейшем воздействовать на природу. Эволюция биогеохимических циклов будет протекать в дальнейшем, насколько катастрофично – зависит от нашей деятельности. Единственный механизм, который находится в руках человека, – модернизация технологий производства с учетом природоохранных требований. Однако на определенном этапе природоохранные решения вступают в противоречие с проблемами экономического и социального характера. Очевидно, что дешевые и соответственно «грязные» технологии увеличивают прибыль и ту ее часть, которая идет на зарплату. К сожалению, это проявило себя именно в России последнего периода ее капитализации.

В связи с юбилейной датой великого мыслителя В.И. Вернадского, отметим, что в современный период «научная мысль, как планетарное явление» должна сосредоточиться на предотвращении деградации нашей природы. Развитие природоохранных без- и малоотходных технологий с учетом научно обоснованных критических нагрузок на биосферу и ее экосистемы, реабилитация нарушенных территорий и акваторий – ключевое направление в сохранении жизнеобеспечивающих условий нашей планеты.

Дискуссионной является проблема: до какой степени мы допускаем изменение конкретных сред? При выработке понятия допустимой экологический нагрузки необходимо задаться условиями «сохранения среды», т.е., в каких условиях и до какой степени человечество должно ограничивать свое воздействие на те или иные объекты окружающей среды? Очевидно, что для заповедных и урбанизированных территорий значения критических уровней могут быть различными и от этого изменятся требования к ограничению нагрузок.

Литература

1. ***Вернадский В.И.***
Биосфера и ноосфера. М.: Наука. –1989. – 261 с.
2. ***Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К.***
Экология. Особи, популяции и сообщества. Перевод М.: Мир, под редакцией Гилярова. – 1989. – Т. 1, 667 с.
3. ***Колчинский Э.И.***
Эволюция биосферы. – Л: Наука, 1990. – 236 с.
4. ***Вернадский В.И.***
Научная мысль как планетное явление /Отв. ред. А.Л. Яншин. – М.: Наука. – 1991. – 270 с.
5. ***Малая советская энциклопедия.***
В 10 томах. Ред. Мещеряков Н.Л. и др.; – М.: Советская Энциклопедия. – 1929 г.
6. ***Climate Change 2007:***
Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds. Pachauri R.K., Reisinger A.). – Geneva: IPCC, 2008. – 104 p.
7. ***Нигматулин Р.И.***
Океан: климат, ресурсы, природные катастрофы // Вестник РАН. – 2010. Т.80 №8 – С. 675–689.
8. ***Bijma J., Barange M., Brander L.***
et al. Impacts of ocean acidification // Science. – 2008. – V. 320 – P. 336–340.
9. ***Iglesias-Rodriguez D.M., Halloran P.R., Rosalind E.M.***
et al. Phytoplankton Calcification in a High-CO2 World // Science. – 2008. – V. 320. – P. 336–340.
10. ***Evans C.D. Don T. Monteith D.T., Fowler D., Cape J.N., Brayshaw S.***
Hydrochloric Acid: An Overlooked Driver of Environmental Change //Environmental Science & Technology. – 2011. – V45, №5. – P. 1887–1895.
11. ***Monteith, D.T., Stoddard, J.L., Evans, C. D.***
et al. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry // Nature. – 2007. – V. 450. – C. 537.
12. ***Коплан-Дикс И.С., Алексеев В.Л.***
Географические закономерности структуры круговорота фосфора // Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод. – Л.: Наука. – 1988. – С. 19–21.
13. ***Galloway J.N.***
Acid deposition: perspectives in time and space // Water, Air and Soil Pollut. – V.85. – 1995. – P.15–24.
14. ***Castle J.W., Rodgers J.H.***
Hypothesis for the role of toxin-producing algae in Phanerozoic mass extinctions based on evidence from the geologic record and modern environments // Environmental Geosciences. – 2009. – № 16. – С. 1–239.
15. ***Моисеенко Т.И. Руднева И.И.***
Глобальное загрязнение и функции азота в гидросфере // Доклады Академии наук, –2008. – Т. 420, № 3. – С. 676–680.
16. ***Моисеенко Т.И.***
Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. – М: Наука, 2003. – 276с.
17. ***Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Гашкина Н.А.***
Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. – М.: Наука, 2006. – 261 с.
18. ***William F., Fitzgerald, Carl H.***
et al. Marine Biogeochemical Cycling of Mercury.// Chem. Rev. – 2007. – V.107. – 641–662.
19. ***EPA.***
(United States Environmental Protection Agency, http:\ www.epa.com) International Council on Metals and the Environment. Persistence, bioaccumulation and toxicity. – Washington: Parametrix Inc.. – 1995. – 93 p.
20. ***Радиация, жизнь, разум.***
– М.:«Росатом». – 2011. – 104 с.
21. ***Большаков В.Н., Моисеенко Т.И.***
Антропогенная эволюция животных: факты и их интерпретация // Экология. – 2009, № 5. – С.323–332.
22. ***Динамика популяционных генофондов при антропогенных воздействиях***
(под ред. Ю.П. Алтухова) – М.: Наука. 2004. – 619с.
23. ***Walker C.H., Hopkin S.P., Sibly R.M., Peakall D.B.***
Principles of Ecotoxicology (Second Edition). – London: Taylor&Francis Ltd. – 2001. – 307 p
24. ***Шварц С.С.***
Экологические закономерности эволюции. – М.: Наука. – 1980. – 278 с.
25. ***Моисеенко Т.И.***
Водная экотоксикология: фундаментальные и прикладные аспекты. – М.: Наука. – 2009. – 400 с.
26. ***Израэль Ю.А.***
Экология и контроль состояния природной среды. – М.:Гидрометеоиздат. – 1984. – 559 с.
27. ***Моисеенко Т.И.***
Теория критических нагрузок и ее приложение к определению воздействия кислотообразующих веществ на поверхностные воды // Доклады РАН. – 2001. – Т.378. – С. 250–253.

Юбилейная XV международная научная конференция «физико-химические процессы при селекции атомов и молекул»

Котов А.А., Адамяк Б.Ю.

В конце прошлого года в г. Звенигороде (дом отдыха «Ершово») Московской области проходила Юбилейная XV Международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». Конференция была организована и проведена ГНЦ РФ ТРИНИТИ совместно с НИЦ «Курчатовский институт» в соответствии с «Планом проведения научных и научно-технических конференций, совещаний, семинаров и школ предприятиями и организациями Госкорпорации Росатом на 2012 год». Проведению конференции и Школы молодых ученых в немалой степени способствовала поддержка грантами РФФИ (проекты № 12-02-06116-г и № 12-02-06827-моб_г).

Президентом конференции в течение ряда лет является академик Е.П. Велихов, сопредседателями Программного комитета – член-корреспондент РАН М.В. Ковальчук и академик РАН В.Я. Панченко, председателем Организационного комитета – профессор В.Е. Черковец. В течение пяти дней были проведены заседания 6 секций по следующим направлениям:

- К 80-летию открытия дейтерия;
- Селекция веществ кинетическими методами (центрифуги, газовая диффузия);
- Селекция веществ оптическими, электромагнитными и ИЦР методами. Диагностика и методы анализа веществ и примесей;
- Лазерные, плазменные и нанотехнологии в ядерной энергетике, материаловедении, микроэлектронике, медицине;
- Селекция и глубокая очистка трудноразделимых веществ физико-химическими методами;
- Применение изотопов в фундаментальных, прикладных физико-химических исследованиях и в медицине.

Отличительной чертой Юбилейной конференции стало то, что впервые в рамках конференции была проведена Школа молодых ученых с тематикой «Фундаментальные вопросы физики и химии в процессах селекции атомов и молекул», участниками которой стали более 35 молодых ученых из ГНЦ РФ ТРИНИТИ, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ МИФИ, РХТУ им. Д.И. Менделеева, ИПЛИТ РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева, УрФУ им Б.Н. Ельцина, ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина и других организаций.

Церемония открытия конференции традиционно состоялась в большом конференц-зале культурно-спортивного комплекса дома отдыха «Ершово» (Звенигород). В церемонии открытия принял участие ученый секретарь Госкорпорации «Росатом» профессор А.К. Будыка.

Во вступительном слове академик В.Я. Панченко особо отметил факт проведения в рамках конференции Школы молодых ученых, а также высокий уровень включенных в программу Школы лекций и приглашенных преподавателей – ведущих и авторитетных специалистов в различных областях по тематике Школы.

Первое заседание конференции (секция № 1) было совместным со Школой молодых ученых, председателями секции были академик РАН В.Я. Панченко и профессор В.Е. Черковец. Были заслушаны шесть докладов приглашенных ведущих спе-

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 12-02-06116, 12-02-06827).
The work was financially supported by RFBR (grants №№ 12-02-06116, 12-02-06827).

КОТОВ Александр Александрович,
кандидат физико-математических наук наук, начальник лаборатории ФГУП «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».
Alexander A. KOTOV,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, the Head of the Laboratory of State Research Center of FSUE "RF Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research",
e-mail: akotov@triniti.ru.

АДАМЯК Богдан Юрьевич,
кандидат физико-математических наук наук, главный инженер – заместитель директора отделения перспективных исследований ГНЦ РФ Троицкого института инновационных и термоядерных исследований.
Bogdan Y. ADAMYAK, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Chief Engineer-Deputy Director of Department of Prospective Research of State Research Center of RF "Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research",e-mail: adam@triniti.ru.

циалистов по направлениям тематики конференции. Стало хорошей традицией посвящать первое заседание конференции памятным датам фундаментальной науки, корифеям отечественного и зарубежного естествознания. Это помогает участникам ощутить свою сопричастность к бесконечному процессу познания окружающего мира, одновременно воздавая дань уважения первопроходцам науки. На этот раз научная конференция была посвящена 80-летию со дня открытия дейтерия.

Профессор Ю.А. Сахаровский (РХТУ им. Д.И. Менделеева) в своем докладе изложил историю открытия в 1932 г. дейтерия американским физиком Г. Юри, который, испаряя жидкий водород, обнаружил в спектре пара остатка линию, соответствовавшую тяжелому атому водорода ^{2}H. Автором отмечено, что уже через два года в 1934 г. была получена первая тяжелая вода в СССР, а в 1958 г. в СССР был построен первый в мире завод по ректификации жидкого водорода. В докладе были приведены характеристики основных современных методов разделения изотопов водорода (электролиз воды, химический изотопный обмен, ректификация). Наглядно были представлены основные трудности, имеющие место при производстве тяжелой воды: малое содержание дейтерия в сырье (0,015% ат.), высокая необходимая концентрация в продукте, крайне высокое отношение потока сырья к потоку продукта и др. В докладе было отмечено большое значение этого изотопа для атомной отрасли, в связи с чем методы разделения изотопов водорода постоянно совершенствуются.

Профессор Е.А. Рябов (Институт спектроскопии РАН) посвятил свой доклад лазерно-молекулярному методу разделения изотопов, его возможностям и перспективам. В докладе отмечено, что с использованием низкоэнергетических методов лазерного разделения изотопов (НЭМ ЛРИ) принципиально возможно получение энергетического урана с приемлемыми энергозатратами, что делает актуальными проведение расчетно-теоретических и экспериментальных работ в области НЭМ ЛРИ в России. Это особенно важно в связи с недавней выдачей лицензии на строительство в США разделительного завода с использованием лазерной технологии (метод SILEX) в Уилмингтоне, штат Северная Каролина. Теперь Global Laser Enrichment (GLE) имеет право построить завод и обогащать уран методом SILEX до 8 %. Обогащенный уран будет использоваться в производстве топлива для атомных станций США [«Страна Росатом», № 22, 2012 г.].

В докладе профессора Н.С. Марченкова были подробно рассмотрены ядерно-физические методы в современной медицине и исследованиях когнитивных процессов. Докладчик привел данные по динамике роста мирового рынка продукции и услуг ядерной медицины, за период 2005–2010 гг. он составил 35 % по экспертной оценке. Он отметил, что Россия занимает одно из первых мест по смертности от заболеваний сердечно-сосудистой системы и злокачественных новообразований в мире, а уровень ранней диагностики указанных заболеваний и вопросы их эффективного лечения остаются «слабым местом» отечественного здравоохранения. Указанные проблемы призваны решать центры высокотехнологичной медицинской помощи, одним из таких центров становится Комплекс ядерно-физических методов диагностики и исследования когнитивных процессов на базе НИЦ «Курчатовский институт». В нем предполагается развитие таких составных частей ядерной медицины, как производство радионуклидов, разработка, производство и дистрибуция радиофармпрепаратов, методики диагностики и лечения заболеваний.

Доклад Д.Ю. Чувилина (НИЦ «Курчатовский институт») был посвящен адресной доставке радиоизотопов – современному методу терапии в ядерной медицине. Суть адресной доставки состоит в том, что само лекарственное вещество, а чаще средство его доставки (вектор, контейнер) модифицируется молекулами, «узнающими» рецепторы на клетках-мишенях. Присутствие распознающих молекул на поверхности вектора позволяет ему сконцентрироваться в заданной области (опухоли, очаге воспаления и т.д.) и доставить туда лекарственное вещество. В отличие от обычного введения лекарственного вещества и его распространения по всему организму, направленная доставка позволяет снизить дозу вводимого лекарства и минимизировать его воздействие на другие клетки (побочное действие). В результате проведенной работы коллективом авторов (НИЦ «Курчатовский институт», ИБХ им. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова, МНИОИ им. П.А. Герцена, ООО «Технология медицинских полимеров») разработан метод получения олигомерных гибридных биосовместимых наноразмерных конструкций (ОГБНК) с радиоизото-

пами в качестве терапевтических агентов, получены опытные образцы такой конструкции и проведены их исследования. Основным результатом экспериментов in vitro явилось подтверждение повышенного, до 20 раз по сравнению со здоровой тканью, накопления в опухолевой ткани α-излучающих радионуклидов, доставленных с помощью ОГБНК.

В докладе В.А. Мищенко (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) было рассмотрено терагерцовое излучение различных диапазонов, его особенности и характеристики, а также многочисленные применения и технологии на его основе. В последнее время излучение терагерцового диапазона (0,1–10 ТГц) привлекает внимание исследователей своими уникальными свойствами и возможностью разнообразных применений. Его отличает прежде всего то, что не являясь ионизирующим, излучение обладает большой проникающей способностью во многих диэлектрических средах. Свойства излучения терагерцового диапазона определили широкий диапазон его возможных применений: научные исследования (диагностика плазмы, космос), материаловедение и микроэлектроника, безопасность, мониторинг загрязнения атмосферы, биология, медицина и т.д. Докладчик подробно рассмотрел элементы современной техники терагерцового диапазона, включая источники и приемники излучения, оптические элементы и др., привел примеры конкретных приложений.

В последующие два дня в двух уютных залах культурно-спортивного комплекса дома отдыха «Ершово» одновременно проходили заседания секций конференции и Школы молодых ученых. Слушателям Школы за два дня было прочитано 10 лекций ведущими и авторитетными специалистами по направлениям тематики Школы.

В лекциях был дан анализ фундаментальных основ традиционных, современных и перспективных методов разделения изотопов, а также их применения в научных исследованиях, медицине, промышленности и других областях. Особое внимание было обращено на современное состояние лазерно-молекулярного метода разделения изотопов, в котором были рассмотрены возможности и перспективы низкоэнергетических лазерных методов, в частности, SILEX и новые предложения по использованию для разделения изотопов полимолекулярных Ван-дер-Ваальсовых кластеров. Были также рассмотрены химические методы селекции, в том числе с применением современных наноматериалов и мембран, а также молекулярных комплексов, как рабочих систем для разделения изотопов, методы очистки от трития водных и газовых потоков объектов ядерной индустрии и др., а также последние достижения в компьютерном моделировании поведения сложных систем.

Лекции читали:

- ***А.А. Ежов*** (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) – «Сложные системы»,
- ***В.А. Гурашвили*** (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) – «Полимолекулярные Ван-дер-Ваальсовы кластеры»; Г.Ю. Григорьев (НИЦ «Курчатовский институт») – «Лазерное обогащение урана»;
- ***В.Д. Борисевич*** (НИЯУ МИФИ) – «К 100-летию открытия изотопов и 60-летию изобретения современной газовой центрифуги для разделения изотопов»;
- ***М.Б. Розенкевич*** (РХТУ им. Д.И. Менделеева) – «Методы очистки от трития водных и газовых потоков объектов ядерной индустрии»;
- ***В.Е. Юртов*** (РХТУ им. Д.И. Менделеева) – «Наноматериалы для процессов разделения»; А.П. Напартович (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) – «Метод лазерного разделения изотопов урана SILEX»;
- ***А.В. Варежкин*** (РХТУ им. Д.И.Менделеева) – «Мембранные методы разделения сложных гомогенных систем»;
- ***А.В. Хорошилов*** (РХТУ им. Д.И. Менделеева) – «Молекулярные комплексы как рабочие системы для разделения изотопов биогенных и других элементов».

Необходимо отметить, что эти лекции вызвали широкий интерес не только молодых ученых школы, но и других участников конференции. окончании Школы ее слушателям были вручены специальные Сертификаты.

Сертификат участника Школы молодых ученых «Фундаментальные вопросы физики и химии в процессах селекции атомов и молекул»

После окончания Школы был проведен анализ качества лекций и уровня организации проведения Школы. Вот некоторые из мнений участников Школы.

Преподаватели:

М.Б. Розенкевич, Ю.А. Сахаровский, профессора РХТУ им. Д.И. Менделеева:

Из бесед с молодыми участниками конференции и слушателями школы следует, что такую школу организовали своевременно, а может быть, с некоторым даже опозданием. Весьма удачен подбор лекторов.

В.Д. Борисевич, профессор НИЯУ МИФИ:

Считаю организацию Школы молодых ученых в рамках ежегодной Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» чрезвычайно важным и полезным мероприятием для студентов-старшекурсников и аспирантов ВУЗов, готовящих специалистов по этой тематике. Это предоставляет им уникальную возможность прослушать обзорные лекции ведущих ученых нашей страны по последним достижениям и существующим проблемам в области разделения и применения изотопов.

Молодые ученые, слушатели школы: :

Д.В. Коваленко, научный сотрудник ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Для меня Школа Молодых Ученых была полезна как в плане получения некоторого опыта по организации подобных мероприятий, так и в научном плане. Было интересно слушать доклады ученых, непосредственно занимающихся теми исследованиями, о которых рассказывают, можно сказать, получение информации из первых уст. Дружелюбная атмосфера мероприятия способствовала обретению новых знакомств и закреплению старых.

Считаю, что Школа Молодых Ученых прошла успешно и должна стать традиционной для конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул».

Е.М. Занозина, научный сотрудник ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Как участник Школы молодых ученых в рамках проведения XV Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» хотела бы отметить хорошее сочетание этих двух мероприятий. Молодые специалисты имели возможность поучаствовать не только в программе Школы, отлично подобранной специально для них, но и в работе конференции, пообщаться с ведущими специалистами в этой области.

Очень понравилась организация Школы и конференции и формат проведения ее в загородном пансионате «Ершово». Небольшой зал для лекций для молодых ученых создавал камерную обстановку и информация отлично усваивалась. Хотя мне тематика конференции и школы не слишком близка, я смогла вынести очень много полезной информации.

Из недостатков и замечаний могу отметить не очень хорошую рекламу Школы среди молодых ребят Москвы и области. Думаю, очень многие ученые с удовольствием поучаствовали в Школе, если бы знали.

В работе Юбилейной XV конференции приняло участие более 130 человек, представляющих 48 организаций России и зарубежных стран (КНР), проведены заседания 6 секций, заслушано 59 и представлено на стендах 35 докладов. Программа конференции была выполнена полностью. Во многих отношениях конференция стала традицией, сложилось сообщество ее постоянных участников. Проведение в рамках конференции Школы молодых ученых расширяет круг ее молодых участников и, возможно, станет новой традицией. С программами конференции и Школы молодых ученых можно ознакомиться на сайте http://www.triniti.ru/selection/15_Main.html. Полные тексты докладов участников конференции после рецензирования будут опубликованы в специальном выпуске журнала «Перспективные материалы».

Все фотографии, используемые в статье, предоставлены авторами.

IV Всероссийская конференция «Равновесные модели экономики и энергетики»

Айзенберг Н.И., Зоркальцев В.И.

В п. Листвянка недалеко от г. Иркутска (рис. 1) при финансовой поддержке РФФИ была проведена IV Всероссийская конференция «Равновесные модели экономики и энергетики». Данная конференция проводится регулярно раз в три года, начиная с 2002 г., в разных местах на побережье озера Байкал. Конференция способствует укреплению контактов ученых, работающих в области математической экономики. Она особенно важна для начинающих научных работников, поскольку в последние десятилетия представительные конференции в области математической экономики стали довольно редки.

Традиционно на эту конференцию собираются ведущие ученые России и зарубежья в области экономико-математического моделирования, теоретической и региональной экономики. Одной из ее целей является консолидация экономико-математических и экономических исследований в Сибири. Базовая организация для проведения данной конференции – Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева, входящий в Иркутский научный центр СО РАН. Председателем программного комитета является академик РАН В.В. Кулешов, директор расположенного в Новосибирске Института экономики и организации промышленного производства СО РАН.

На основе предварительно представленных докладов к началу конференции был выпущен сборник трудов в электронном виде, в который вошли около 50 статей [1]. Работа конференции частично пересекалась по времени с XV Байкальской международной школой-семинаром «Методы оптимизации и их приложения», посвященной памяти профессора В.П. Булатова. Были проведены два совместных пленарных заседания, позволившие специалистам в области экономико-математического моделирования и экономической теории познакомиться с новейшими результатами и современными направлениями исследований в теории и методах оптимизации, в вычислительной математике. Материалы конференции были опубликованы в бумажной версии в трудах школы [2].

Представим некоторые доклады и направления научных исследований, обсуждавшиеся на конференции.

Макроэкономическое моделирование. В докладе члена-корреспондента РАН, заместителя директора ИЭИОПП СО РАН В.И. Суслова (рис. 2) были представлены основные результаты по разработке и использованию межотраслевых межрегиональных моделей в России, прежде всего в Сибирском отделении РАН. Эти модели предназначены для изучения среднесрочных и долгосрочных перспектив развития экономики страны и регионов, для прогнозирования экономического развития, изучения проблем межрегионального взаимодействия. Одна из методических проблем, исследованных в докладе В.И. Суслова, – выявление равновесных и неравновесных ситуаций в экономическом взаимодействии регионов Сибири. В качестве показателей для оценки степени «равновесности» могут служить данные об уровнях доходов и цен в отдельных регионах, межрегиональные денежные потоки и межрегиональная миграция населения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-06-06052).
The work was financially supported by RFBR (grant № 11-06-06052).

АЙЗЕНБЕРГ Наталья Ильинична,
доцент, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.
Natalya I. AYZENBERG,
Associate Professor, Candidate of Economic Sciences, Senior Research Fellow at the Melentyev Institute for Energy Sector Systems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, e-mail: ayzenberg.nata@gmail.com.

ЗОРКАЛЬЦЕВ Валерий Иванович,
профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.
Valery I. ZORKALTSEV,
Professor, Doctor of Technical Sciences, Chief of the Laboratory of the Melentyev Institute for Energy Sector Systems,
e-mail: zork@isem.sei.irk.ru.

Рис. 1. Оз. Байкал, пос. Листвянка

Доклад профессора В.А. Васильева (Институт математики СО РАН) был посвящен изложению полученных им результатов теоретического исследования и обоснования макроэкономических моделей, прежде всего моделей, разработанных в ИЭИОПП СО РАН, представленных в докладе В.И. Суслова. Обзор полученных ранее и новых теоретических результатов по классификации вариантов модели Вальраса и ее агрегатным формам был рассмотрен в докладе профессора В.К. Горбунова (рис. 3) (г. Ульяновск).

В дискуссии особое внимание было уделено проблеме выбора методов для корректного агрегирования показателей и субъектов в экономике. Отмечалось, что теория агрегирования в экономике является мало разработанной, хотя и очень важной для создания макро- и мезомоделей. Обсуждалась возможность и целесообразность введения интервальных ограничений для переменных в макроэкономических моделях, что не ухудшает качество моделей, но облегчает их теоретическое обоснование и реализацию. Особое внимание было обращено на целесообразность использования теории альтернативных систем линейных неравенств для теоретических исследований, идентификации случаев про-

Рис. 2. Докладывает профессор, доктор экономических наук Н.И. Суслов. В президиуме (слева направо) академик РАН Ю.Г. Евтушенко, доктор физико-математических наук А.Ю. Горнов

Рис. 3. Докладывает профессор, доктор физико-математических наук В.К. Горбунов. В президиуме член-корреспондент РАН В.И. Суслов

тиворечивости ограничений и разработки алгоритмов реализации макроэкономических моделей.

Проблемы региональной экономики. Ряд докладов был посвящен проблемам экономики отдельных регионов России и особенно экономике Байкальского региона. Среди них можно выделить доклады руководителя известной новосибирской научно-консультационной фирмы «Корпус» Ю.П. Воронова, сотрудников отделов региональных социально-экономических исследований М.А. Тараканова, А.Р. Абаева, И.А. Дец, Ю.Д. Дайнеко, Ю.А. Киреевой, Л.А. Леоновой и Е.А. Бакуниной, А.М. Нестеренко. В докладах отмечались многолетние негативные тенденции в межрегиональном взаимодействии, в том числе по финансовым потокам, миграции населения. Имеющиеся резкие внутри и межрегиональные диспропорции уровней доходов населения, цен, доступности и уровня образования и возможностей получения медицинских услуг. В качестве одной из главных причин рассматривалась сложившаяся нерациональная система денежных потоков в силу происходящей концентрации основной массы денежных ресурсов в региональных центрах и в столице России, что связано с консолидацией налоговых средств в федеральном бюджете и тяготении к «центру» мест «прописки» крупных предприятий, а также в силу внутрикорпоративной концентрации получаемых доходов.

Ряд докладов был посвящен изложению результатов анализа воздействия случайных природно-климатических факторов. Это направление экономико-математического моделирования имеет особое значение для сельского хозяйства многих регионов России и особенно Сибири, находящихся в зоне рискованного земледелия из-за возможных летних заморозков, засух, наводнений и других природных катаклизмов. Это требует разработки и применения стохастичес-ких моделей оптимизации сельскохозяйственного производства. Такие модели были рассмотрены в докладах сотрудников Иркутской сельскохозяйственной академии (М.Н. Барсуковой и др., Т.С. Бузиной и др., Е.В. Вашукевич), где данное направление исследований возглавляется проректором академии профессором Я.М. Иванько. Этому же был посвящен доклад профессора из Монголии Э. Ганхуянга. В его моделях отражен такой важный аспект, как необходимость минимизации вредного воздействия сельскохозяйственного производства на почву, воду и атмосферу.

Особое внимание на конференции было уделено проблемам и перспективам формирования и развития нефтегазовой промышленности в Восточной Сибири. Этому были посвящены доклады Н.И. Пляскиной, В.А. Крюкова, А.П. Головина, в которых рассматривались проблемы организации добычи, транспортных потоков, переработки углеводородных ресурсов. В дискуссиях высказывались мнения о чрезмерной экспортной ориентации сибирских проектов освоения углеводородных ресурсов, о необходимости более детальной проработки планов использования углеводородных ресурсов. Каждое месторождение углеводородов обладает сырьем с особыми физико-химическими свойствами, правильное использование которых (в т.ч. для производства конструкционных материалов, особых сортов смазок, в нефтехимическом производстве, при производстве удобрений и т.д. с соответствующим набором технологий) может дать доход, в несколько раз превышающий выгоды от простого экспорта сырья. Особое внимание обращалось на необходимость применения сайклинг-процессов для более полного извлечения жидких фракций углеводородов из газоконденсатных месторождений. Высказывались предложения о необходимости перехода от освоения месторож-

дений в режиме концессий к более прогрессивным формам «контракта на разработку», «контракта на обслуживание». Обсуждалась необходимость введения рентных платежей в региональный и федеральный бюджет за добываемые углеводородные ресурсы в зависимости от особенностей месторождений и временного этапа их освоения в целях стимулирования максимально эффективного использования всех потенциально возможных выгод.

Математическая экономика и ее приложения. Ряд докладов был направлен на решение фундаментальных проблем математической экономики, в том числе посвящен поиску конструктивных путей построения функций полезности (В.К. Горбунов и А.Г. Ледовских, доклад Д.В. Давыдова), производственных функций (В.К. Горбунов и А.Г. Львов), теоретическим моделям рынков несовершенной конкуренции (доклад А.Ю. Филатова, Д.С. Медвежонкова, И.М. Минарченко, А.Г. Коваленко). Здесь особое внимание было уделено классификации и обсуждению особенностей существующих моделей олигополии, алгоритмам поиска равновесных решений (в т.ч. вариантов равновесий по Нэшу) при различных способах описания рынка. Обсуждались методические проблемы формирования производственных функций и функций полезности, наиболее полно описывающих производственные возможности и потребительские предпочтения и при этом позволяющих разрешать задачи поиска равновесия. В дискуссии внимание привлек вопрос о разнообразии форм описания олигопольных рынков, неоднозначности критериев их оптимальной работы.

Регулирование монополии. Изучение теории функционирования монопольных рынков, механизмов регулирования естественной монополии имеет особое значение для России, поскольку экономика нашей страны в силу географических и природно-климатических условий является сильно монополизированной во многих областях экономической деятельности. Проблемам монопольных рынков и их регулирования были посвящены доклады С.В. Белоусовой и др. Упор был сделан на оценку экологической составляющей при определении оптимальности функционирования монополии. В дискуссии было отмечено, что важнейшим элементом при разработке методов регулирования является учет имеющейся асимметричности информации у регулирующего органа (государства) и монополиста. Для преодоления этой проблемы обсуждалась возможность использования теории оптимальных контрактов.

В представленных докладах обсуждались конкретные экономические задачи, для решения которых были разработаны специальные математические методы и модели. Это доклады С.А. Дзюбы, Н.И. Пляскиной, Н.И. Приз и В.В. Серваха. Здесь ставились вопросы оптимального функционирования предприятия как малой фирмы и предприятия как государственной корпорации. Обсуждались условия финансовой устойчивости и методики ее оценки, которые включали в себя задачи дискретного и стохастического программирования.

В процессе работы конференции обсуждался широкий спектр различных проблем, в том числе малого предпринимательства в России, модели рентных доходов с природных ресурсов (С.М. Анцыз, В.А. Булавский и др.), взаимосвязи принципа наименьшего действия в физике с экономическими задачами минимизации затрат (В.И. Зоркальцев). В докладе Э.О. Раппопорта обсуждалась возможность применения метрики Канторовича-Рубенштейна к задачам размещения экономических объектов и территориального распределения населения, отмечен приоритет новосибирских ученых в ставших в последнее время актуальными задачах пространственной экономики. Междисциплинарный, общенаучный характер имел доклад профессора Р.Г. Хлебопроса (г. Красноярск), в котором обсуждались проблемы поиска экономического равновесия во взаимодействии промышленности и сельского хозяйства (рис. 4).

Особое внимание в работе конференции было уделено проблемам организации электроэнергетики России в связи с осуществляемыми в ней экономическими реформами. Обсуждались институциональные составляющие процесса рыночных преобразований, зарубежный опыт реформ в электроэнергетике (в т.ч. в докладе И.В. Житовой, Г.А. Унтуры).

Ряд докладов был посвящен разработке теоретических основ и экспериментальным исследованиям экономико-математических моделей для анализа вариантов организации функционирования и развития электроэнергетики России (доклады Н.И. Айзенберг

и М.А. Киселевой, В.И. Зоркальцева и И.В. Мокрого, С.И. Паламарчука). В них рассматривались механизмы организации аукционов на электроэнергетическом рынке, основанных на подаче заявок оператору рынка со стороны потребителей и производителей энергии. Сравнивались возможные стратегии поведения генераторов, приводящие к различным моделям олигополии.

Было отмечено, что на сегодняшний момент в России существует неоправданный разброс цен по регионам. В некоторых районах цены различаются в 4 и более раз. Ярким примером могут стать цены на электричество для населения в соседних регионах: в Иркутской области (0,68 руб. за кВт час) и в республике Бурятия (где тариф составляет 3,5 руб. за кВт час.). Это происходит из-за нерациональных механизмов формирования оптовых цен и особенно из-за неоправданно высоких надбавок за передачу электроэнергии по сетям. Сети являются естественно-монопольным сегментом внутри электроэнергетической отрасли, ценообразование на продукцию которой требует государственного регулирования.

Большое внимание в докладах и дискуссиях было уделено потенциальной неэффективности и неустойчивости рынков электроэнергии и мощности из-за возможного варьирования правил поведения его участников. Эти рынки являются олигопольными, устойчивое функционирование которых может быть обеспечено либо за счет использования механизмов сговоров, либо за счет механизмов государственного регулирования. Известно, что олигопольные рынки, в случае возникновения на них жестких ценовых войн (что имитирует модель олигопольной конкуренции Бертрана), приводят к разорению производителей.

Рис. 4. Докладывает профессор, доктор физико-математических наук Р.Г. Хлебопрос.

Именно такие ситуации в железнодорожном транспорте, электроэнергетике и других отраслях в начале прошлого столетия в США привели к введению активного государственного регулирования, в том числе через антимонопольные законы. К этому же подталкивали требования технической стандартизации.

Как показывают расчеты на имитационных моделях поведения олигопольных рынков (исследования В.И. Зоркальцева, И.В. Мокрого), эти рынки могут быть очень неустойчивыми к смене правил выбора решений отдельных продавцов, даже если управляемыми ими параметрами являются только объемы товаров. Для таких олигопольных рынков в качестве стационарного состояния традиционно рассматривается так называемое равновесие Курно. В этом случае каждый поставщик, определяя свои поставки на отдельные рынки, при определении выручки учитывает не только цены на этих рынках, но и влияние варьирования его объемов поставок на цены. Стационарные состояния олигопольного рынка «Курно» обычно являются устойчивыми в традиционном математическом плане: малые возмущения исходных данных или отклонений от стационарных состояний отдельных поставщиков возвращают рынок в равновесие Курно.

Вместе с тем, есть другие потенциально возможные источники неустойчивости олигопольных рынков – смена правил поведения отдельных его участников. Как показывают расчеты на имитационных моделях, у отдельного поставщика может появляться дополнительная прибыль, если он перейдет к другому, чем в равновесии Курно, правилу определения объемов производства и поставок на отдельные рынки своей продукции. Если один из поставщиков будет руководствоваться разностью между только уровнем цен (не учитывая свое влияние на эти уровни изменений его поставок) и предельными издержками, то он может получать дополнительный выигрыш при сокращении

прибылей других участников рынка. Как иллюстрируют имитационные модели, выигрыш у отдельных олигополистов возможен и за счет чередования правил формирования объемов поставок на разные рынки, и за счет учета информации о поведении других поставщиков. Поскольку не только один из конкурентов, но и другие участники олигопольного взаимодействия могут приходить к идеям смены правил поведения в целях получения преимуществ за счет других, то это в конечном счете породит хаотические ситуации на рынке (одним их примеров которых является так называемое неравновесие Штакельберга). Еще одним фактором неустойчивости олигопольных рынков, в том числе энергетических, является объективно существующая неопределенность предстоящих ситуаций на рынке, неоднозначность прогнозов этих ситуаций отдельными поставщиками.

Все фотографии, используемые в статье, предоставлены авторами.

Литература

1. ***Равновесные модели экономики и энергетики:*** Труды Всероссийской конференции «Равновесные модели экономики и энергетики», 26–29 июня 2011 г., Иркутск, Байкал: Изд-во ИСЭМСО РАН, 2011. – 328с. (электронная публикация).
2. ***Труды XV Байкальской международной школы-семинара «Методы оптимизации и их приложения»,*** Т.6: Математическая экономика. Иркутск: РИО ИДСТУ СО РАН, 2011. – 330с.

Роботизированное изучение луны, планет и их спутников

Маров М.Я., Нефедьев Ю.А., Гусев А.В.

В течение последних двух десятилетий Луна является объектом всестороннего исследования на основе большого ряда космических экспериментов: миссии NASA Клементина (1994 г.) и Лунар Проспектор (1998–1999 гг.), лазерная локация Луны (ЛЛЛ) (1969–2012 гг.), европейский спутник СМАРТ-1 (2003–2006 гг.), японский спутник Кагуя (2007–2009 гг.), китайский зонд Чанг-1 (2007–2009 гг.), Чанг-2 (2010 г.), индийский спутник Чандраан-1 (2008–2009 гг.), Чандраан-2 (2013 г.) американский спутниковый дуэт ЛРО - ЛЛКРОСС (2009–2012 гг.).

Особое внимание в спутниковых миссиях уделяется изучению многообразия внутреннего строения тел солнечной системы, наличию эффектов вращательного движения физической либрации, изучению гравитационного поля Луны и планет методами межспутникового слежения, построению навигационной системы координат, что в итоге должно привести к созданию обитаемой лунной базы на Луне (рис. 1). Исследования последних десятилетий однозначно поставили перед учеными проблему существования и происхождения лунного ядра: есть ли оно, какова его структура, химический состав и агрегатное состояние.

МАРОВ Михаил Яковлевич,
доктор физико-математических наук, академик, профессор, заведующий отделением Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук.
Mikhail Y. MAROV,
Doctor of Physics and Mathamatics, Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Department Head at the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, e-mail: marovmail@yandex.ru.

НЕФЕДЬЕВ Юрий Анатольевич,
доктор физико-математических наук, профессор, директор Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского федерального университета.
Yury A. NEFEDYEV,
Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Director of the Engelhardt Observatory at Kazan Federal University, e-mail: star1955@mail.ru.

ГУСЕВ Александр Васильевич,
кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Казанского федерального университета.
Alexander V. GUSEV,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Deputy Director of the Engelhardt Observatory at Kazan Federal University,
e-mail: alexander.gusev@mail.ru.

Американское космическое агентство (NASA) опубликовало самую подробную на сегодняшний день карту Южного полюса Луны. Новые данные были собраны аппаратом “Lunar Reconnaissance Orbiter”(LRO), который в настоящее время вращается вокруг естественного спутника Земли по полярной орбите (то есть, орбите с углом наклона 90°). При этом аппарат движется на высоте примерно 45 км над поверхностью Луны – ниже, чем предыдущие миссии. В рамках исследования ученые изучали поверхность кратеров при помощи радиотелескопа Goldstone Solar System Radar, который располагается в Калифорнии. Лунные аппараты LRO и LCROSS (NASA) были первым масштабным шагом НАСА в рамках новой лунной программы США «Созвездие» (Constellation). С помощью LRO ученые осуществили поиск источников ресурсов на Луне, составили карту радиоактивности поверхности планеты.

Исследования с бортов космических аппаратов Chang’E и SELENE приблизили нас к пониманию происхождения и эволюции Луны. Другим источником информации о структуре внутреннего строения Луны является изучение ориентации лунного вращения в пространстве, физическая либрация. Японская группа намерена реализовать проект ILOM, предполагающий размещение в полярной области оптического телескопа (D=10 см), чтобы наблюдать ориентацию Луны с точностью 0,001 с дуги. Амплитуда и период ее изменений в значительной степени определяются внутренним строением Луны, динамическим сжатием полной Луны и ее ядра, плотностью и размером

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-02-91160, 11-02-92113, 11-02-06096).
The work was financially supported by RFBR (grants №№ 11-02-91160, 11-02-92113, 11-02-06096).

ядра. Выполнение этих планов может вывести селенодезию на уровень, сравнимый с геодезией Земли. Однако анализ данных в этих новых проектах предъявляет повышенные требования к описанию сложной динамической и термодинамической модели внутренней структуры Луны. Лазерная локация Луны существенно улучшила точность измерений положения Луны. Это позволило в первую очередь выявить такие тонкие эффекты во вращении Луны, как свободные либрации малой амплитуды. Накопление данных по ЛЛЛ открывает еще большие перспективы в изучении особенностей вращения Луны. Кроме того, появилась возможность более точной качественной и количественной оценки вклада приливных эффектов в динамику системы Земля-Луна.

В 2013 г. с помощью космического аппарата «Чанъэ-3» на Луну планируется доставка китайского лунохода для поиска полезных ископаемых. В настоящее время инженеры тестируют двигательную систему лунохода. К 2020 г. планируется высадка тайконавтов на Луну и создание к 2030 г. лунной базы. Она будет использована для запуска пилотируемых космических аппаратов к другим планетам, первой из которых станет Марс.

На сегодняшний день лазерная локация Луны, реализуемая более 40 лет, является одним из самых эффективных источников информации о Луне. Точность лазерных измерений достигла уровня, достаточного для определения даже релятивистских эффектов в системе Земля-Луна. Анализ лазерных данных при определении параметров лунного вращения позволил не только уточнить числовые характеристики динамической фигуры Луны и коэффициентов упругости k2 и l2, но и однозначно определить амплитуды и фазы чандлероподобных мод в свободной либрации и, в то же время, открыть наличие сильной диссипации вращения.

Огромный вклад в получение информации о параметрах динамической фигуры дали космические эксперименты, такие как Clementine (1994 г., NASA, США), Lunar Prospector (1998–1999 гг., NASA, США). В новом тысячелетии серия экспериментов стартовала с проекта SMART-1 (2003–2006 гг., Европейское космическое агентство) и продолжилась в 2007 г. исследованиями космических агентств Японии, Китая, Индии. Японская миссия SELENE (Kaguya) впервые за более чем годовой срок пребывания на лунной орбите обеспечила высокоточное топографическое и гравитационное картирование всей лунной поверхности (рис. 2), включая ранее недоступные области обратной стороны и зоны лимба. Серия китайских спутников Chang'E-1,2. (2007–2012 гг.) и индийский Chandrayan (2008 г.) позволили получить новые данные о гравитационном поле, масконах, коре, геохимическом составе поверхностного и окололунного пространства. Новый объем данных о Луне поставляется лунным разведчиком LRO (NASA, USA, 2009 г.), запущенным в июне 2009 г. и продолжающим свою работу на орбите Луны по настоящее время.

Рис. 1. Инфраструктура лунной базы

Российская программа исследования Луны запланирована на ближайшие 10 лет. В 2015–2017 гг. пройдут две экспедиции: российская «Луна-Глоб» (рис. 3) и «Луна-Ресурс» (рис. 4). Программа предусматривает тщательное изучение полюсов Луны как мест будущих мягких посадок космических аппаратов новой серии «Луноход-3». Этот запуск знаменует собой «возвращение России на Луну» и открывает широкие перспективы ее дальнейших исследований. В рамках этой программы предполагается посадка на лунную поверхность луноходов нового поколения для отбора образцов пород из наиболее интересных районов, сопровождаемая в дальнейшем их доставкой на землю возвратной ракетой. Результаты этого исследования Луны покажут, сколько воды есть на спутнике Земли. Если воды там окажется много, то это позволит пла-

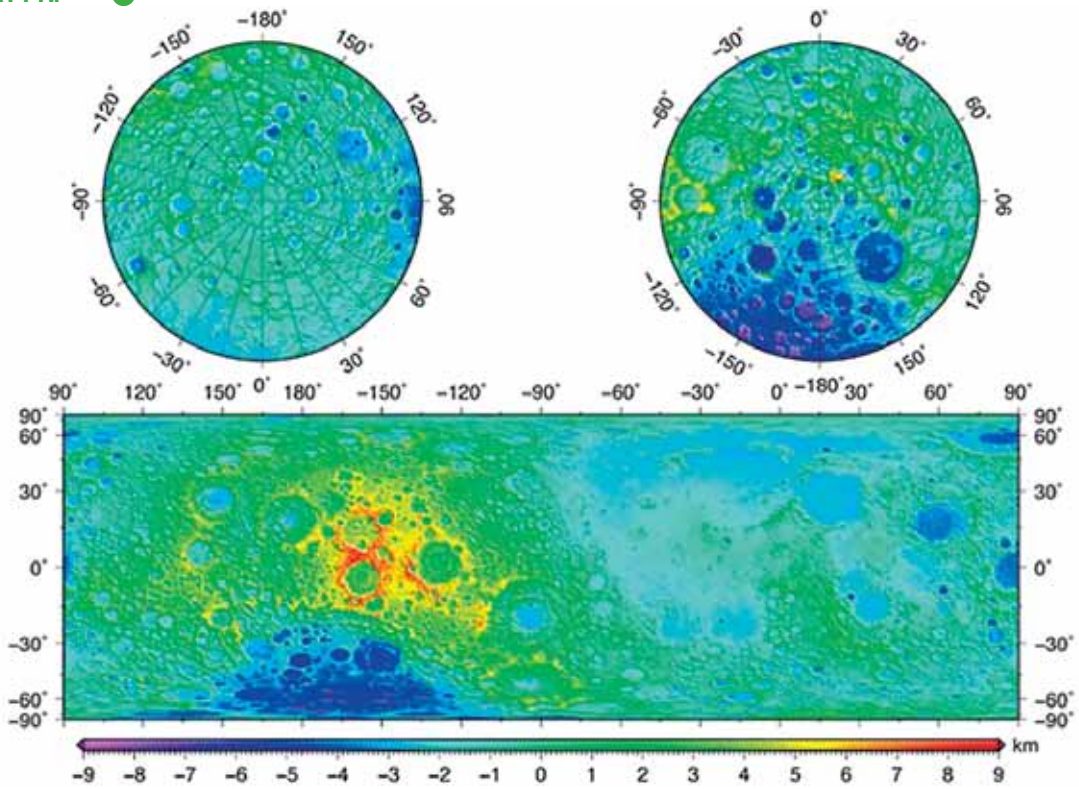


Рис. 2. Глобальная топографическая карта Луны, полученная миссией KAGUYA (SELENE)

нировать строительство на естественном спутнике Земли баз и структур для добычи полезных ископаемых, что, в свою очередь, ознаменует новую эру в изучении космоса. Для эффективной навигации и размещения посадочных модулей на лунной поверхности проблема разработки точной теории вращения Луны является одной из самых актуальных. Запуск «Луна-Глоб» (2015–2016 гг.) будет первым серьезным шагом на пути «возвращения России на Луну» и откроет широкие перспективы ее дальнейших исследований.

В японской программе SELENE-II планируется проводить исследования физической либрации и геофизических параметров Луны по трем проектам:

– Проект ILOM (In situ Lunar Orientation Measurement), который предусматривает установку оптического телескопа на одном из полюсов Луны. Основная задача проекта – наблюдение физической либрации Луны непосредственно с ее поверхности для выявления тонких эффектов, связанных с характеристиками внутреннего строения нашего спутника: уточнение числовых значений коэффициентов упругости Лява, параметров приливной диссипации

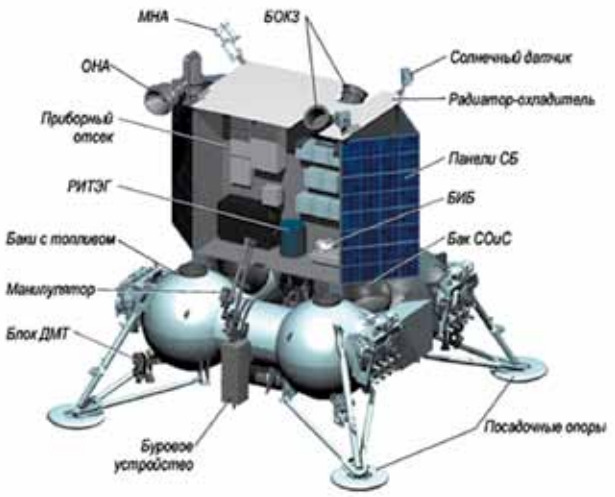


Рис. 3. Луна-Глоб

Рис. 4. Луна-Ресурс

и диссипации на границе ядро-мантия, размеры и эллиптичность ядра, его химический состав. Для приема и регистрации изображения звезд разрабатывается ПЗС-матрица высокого разрешения. Планируемая точность измерения звездных координат – 1 мсек дуги. Результаты моделирования показали, что можно будет наблюдать 14 основных членов вынужденной физической либрации с точностью больше чем 1 мсек за время наблюдений 450 дней. Проведение этих экспериментов открывает возможность оценить радиус и плотность ядра, скачок плотности на границе ядра и мантии, а также ее эллиптичность, получить параметры свободной либрации и дифференциального вращения ядра и мантии.

– Японский проект Лазерной локации Луны (ЛЛЛ), в котором предполагается расширение сети уголковых отражателей на лунной поверхности за счет новых более высокого качества стандартов времени с точностью 10^{-15} и совершенствование наземной сети оптических телескопов, принимающих лазерный сигнал.

Задачи, которые планируется решать наблюдениями физической либрации по проекту ЛЛЛ – определение существования лунного ядра и его агрегатного состояния и более точное определение параметров диссипации лунного вращения.

– Проект «Обратная радио-интерферометрия на сверхдлинных базах» (Inverse VLBI), в котором предполагается установка одного или двух посадочных модулей – радиомаяков на поверхности Луны (Matsumoto et al., 2011 г.). Процедура измерений предполагает синхронизацию сигналов, передаваемых с орбитального (орбитера) и посадочного (ландера) аппаратов на наземные антенны с помощью опорного сигнала от орбитера. После корреляции сигналов измеряется время их прохождения. Ожидаемая точность во времени от десятков до нескольких пикосекунд, что соответствует точности от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров в определении расстояний до ландера и орбитера.

Основные задачи эксперимента I_VLBI: а) детальное исследование гравитационного поля бассейнов разного типа (I, II и т.д.), классифицированных в результате анализа топографии и гравитационного поля миссией Kaguya (RSAT); б) задачи по обнаружению и определению характеристик лунного ядра; в) уточнение моментов инерции и коэффициентов гравитационного поля низких порядков, определение динамических сжатий мантии и ядра Луны, изучение физической либрации многослойной Луны.

Наблюдается определенный прогресс и в области создания навигационной опорной сети. Создана опорная сеть, охватывающая видимую полусферу, краевую зону и часть обратной стороны Луны в инерциальной системе координат. Абсолютные высоты кратеров в каталогах «Аполлон» и КСК-1162 отнесены к центру масс Луны. Оси координат в каталоге КСК-1162 ориентированы вдоль главных осей инерции Луны с учетом постоянных членов в разложениях физической либрации Луны по долготе, в наклонности и узле. Оси же координат каталога положений кратеров по данным космического корабля «Аполлон-15» ориентированы вдоль главных осей инерции Луны без учета этих членов.

Таким образом, уровень проводимых и планируемых исследований тел солнечной системы характеризуется высокой точностью наблюдений и разнообразием наблюдательных методов.

Основным этапом по результатам выполнения работ в рамках грантов РФФИ стало проведение в августе 2011 г. в Казанском (Приволжском) федеральном университете Международной астрономической конференции, посвященной трем знаменательным датам: 50-летию полета Юрия Гагарина в космос, 100-летию со дня рождения Главного теоретика космонавтики академика М.В. Келдыша и 110-летию со дня создания Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта. Тематика научной программы конференции «Луна, планеты и их спутники: роботизированное изучение». В конференции приняли участие академик РАН Михаил Маров (Председатель Оргкомитета конференции), академик РАН, директор Института космических исследований РАН Лев Зеленый, член Французской академии наук, профессор Парижской обсерватории Жак Ласкар, победитель конкурса МОН РФ 2010 г. профессор Юрген Оберст (Германия), ведущий ученый Лаборатории реактивного движения NASA (США) Вячеслав Турышев, руководитель отдела спутниковых исследований Шанхайской обсерватории профессор Джунгсонг Пинг, руководители научных проектов по исследованию Луны Японской астрономической обсерватории профессор Шо Сасаки и Хи-

део Ханада. В первый день работы конференции Президент РТ Р.Н. Минниханов, заместитель министра финансов РФ А.М. Лавров., Председатель ветеранов Космических войск, генерал-лейтенант И.И. Куринной, Герой Советского Союза космонавт А.Н.Березов, руководитель службы безопасности Роскосмоса генерал-майор В.Р. Шарипов, вице-президент компании Carl Zeiss Вильфрид Ланг совместно с участниками конгресса осуществили закладку первого камня в фундамент Планетария и Астропарка на территории Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта. Кроме того, в честь 50-летия полета Ю.А. Гагарина в здании Академии наук РТ была проведена специальная сессия с участием членов Совета по космосу Российской академии наук, посвященная перспективам развития современных инновационных технологий в области космической астрометрии, геодезии и навигации в Казанском федеральном университете, Татарстане и Поволжском регионе.

Конференция была посвящена вопросам навигации, космической геодезии, небесной механики, астрометрии, физики и спин-орбитальной динамики систем Земля-Луна, Марса, Юпитера, Сатурна, других планет и их спутников, малых тел Солнечной системы, магнитных и гравитационных полей Земли и планет. Обсуждались результаты современных исследований с помощью автоматизированных космических аппаратов и зондов и планирование будущих космических миссий к планетам и лунам Солнечной системы.

М.Я. Маров (ГЕОХИ РАН) в своем докладе (рис. 5) кратко коснулся биографии М.В. Келдыша и рассказал об основных научных и практических шагах в изучении и освоении космического пространства, достигнутых под его руководством. Особое внимание он уделил лунно-планетным космическим аппаратам, созданным в первые два десятилетия космической эры, и подчеркнул выдающуюся роль Мстислава Всеволодовича Келдыша в развитии советской космонавтики.

Рис. 5. С приветственной речью председатель Оргкомитета конференции, академик РАН Маров Михаил Яковлевич

В докладе Ю.А. Нефедьева (КФУ) нашли отражение 110-летняя история научных исследований и перспективы развития Энгельгардтовской обсерватории (АОЭ). Он сообщил, что в АОЭ построен Межрегиональный метрологический центр и начал осуществляться проект создания на базе Астрономической обсерватории Центра космических исследований и технологий (рис. 6), включающий уникальный Астрономический парк-музей под открытым небом. В рамках данного проекта намечается постройка комплекса современных наблюдательных инструментов, который будет включать: оптический комплекс телескопов-роботов с CCD приемниками; систему лазерной локации спутников и небесных тел; РСДБ радио-астрометрический комплекс; сейсмический подвал с системой точных наклономеров; оптический комплекс телескопов-роботов для отслеживания космического мусора; наблюдательный комплекс для спутниковых исследований в области космической геодезии и интеллектуальной навигации. Заложенные Планетарий и Астропарк под открытым небом будут способствовать развитию образования и популяризации астрономических знаний в республике. Уже начато строительство, открытие комплекса планируется к Универсиаде 2013 г., которая пройдет в Казани.

Программа конференции была посвящена фундаментальным вопросам исследования планет и их спутников, а также промышленному, робототехническому освоению Луны, перспективам полета человека на Марс.

Наиболее интересными докладами были следующие.

Л.М. Зеленый (ИКИ РАН) выступил с докладом о российских ближайших и перспективных планах исследования Луны и других тел

Рис. 6. Проект Центра космических исследований и технологий

Солнечной системы. Ближайшими миссиями к Луне являются проекты «Луна–Глоб» и «Луна–Ресурс», которые планируются к осуществлению в 2015 и 2016 гг. соответственно. Миссия «Луна–Глоб» включает выход космического аппарата на орбиту вокруг Луны и прилунение, орбитальный аппарат имеет инструментальный пакет для изучения поверхности, плазмы и экзосферных исследований. Другие важные миссии, которые планируются в этой декаде или начиная со следующей, будут миссии к спутникам Марса и к Венере, а также полеты к спутникам Юпитера и к одному из ближайших к Земле астероидов. Миссии к Европе или Ганимеду будут включать геофизическое и геохимическое изучение ее поверхности и исследование возможной обитаемости предполагаемого океана этого спутника.

Д.Ф. Оберст (Germany) сделал несколько докладов. Первый доклад был посвящен изучению топографии Меркурия на основе данных стереоснимков, полученных в рамках миссии MESSENGER. Эти изображения покрывают большую часть поверхности планеты и обеспечивают высокую степень информативности относительно морфологии Меркурия, включая детали тектонических сдвигов, небольших кратеров и бассейнов. Следующий доклад был посвящен предварительной оценке и анализу многоспектральных данных исследований Фобоса, полученных стереокамерой высокого разрешения в рамках миссии Mars Express. Данное исследование было нацелено на изучение спектрофотометрических свойств поверхности этого спутника Марса. Интересным был доклад и о прошлом, настоящем и будущем лазерной локации Луны (LLR) в части изучения динамики системы Земля–Луна. Только несколько станций на Земле технически способны проводить лазерную локацию уголковых отражателей, установленных на поверхности Луны, но тем не менее, накоплен большой наблюдательный материал за период более сорока лет. Несмотря на слабый отраженный сигнал, в настоящее время удается получить сантиметровую точность измерения расстояния до Луны, что позволяет определять динамические параметры системы Земля–Луна, которые используются при построении лунных эфемерид, изучении вращения Луны и ее внутреннего строения. Такие наблюдения также

являются хорошей проверкой общей теории относительности Эйнштейна, и в докладе были представлены новые результаты по определению некоторых ее параметров. Наконец, в заключительном докладе было дано описание планов работ в области геодезии и картографии в рамках гранта Правительства РФ, выигранного доктором Д. Оберстом и проводимых совместно с МИГАИКом. Данный проект под названием «Planetary Geodesy, Cartography, and Future Exploration» предусматривает создание лаборатории в МИГАИКе для анализа данных, которые будут получены будущими российскими миссиями Фобос–Грунт, Луна–Грунт и Луна–Ресурс (рис. 7).

В.В. Шевченко (ГАИШ, МГУ) выступил с докладами как на основной, так и на молодежной конференции. Тема его выступлений касалась вопросов, отражающих новые взгляды на природу Луны. Он сообщил, что данные о нашем естественном спутнике, полученные миссиями SMART-1 (ESA), SELENE/Kaguya (JAXA), Chang'e (CNSA), Chandrayaan-1 (ISRO) и LRO/LCROSS (NASA), свидетельствуют о том, что вода и гидратированные минералы широко распределены на поверхности Луны, преимущественно в полярных областях. Большие лунные бассейны обеспечивают исследователям «окна» для изучения ранних процессов, происходивших в лунной коре. Был подробно рассмотрен кратер Айткен (рис. 8), расположенный на южном полюсе Луны, который является не только самым большим кратером на лунной поверхности, соизмеримым с диаметром самой Луны, но и во всей Солнечной системе. Образование этого кратера связывают с падением на лунную поверхность крупного объекта малой плотности, подобного комете или объекту из пояса Койпера, перпендикулярно к плоскости эклиптики. Подобные типы ударников наиболее характерны для образования и других лунных кратеров. Интересной оказалась также гипотеза о том, что ледяные образования возникли при падении на лунную поверхность молодых комет. В свою очередь, предположение о том, что 90 % комет из облака Оорта захвачены Солнцем с протопланетных дисков других звезд, приводит к выводу, что на Луне присутствует не только межпланетное, но и межзвездное вещество. В докладе были приведены также доказательства наличия современных активных процессов на Луне.

Дж. Ли (SHAO CAS, China) рассказал о результатах VLBI наблюдений спутников, выполненных в Китае в течение нескольких последних лет. В частности, он отметил, что на основе новой методологии и программных средств редукции данных наблюдений китайской VLBI сети слежения реализовано определение мгновенных положений векторов

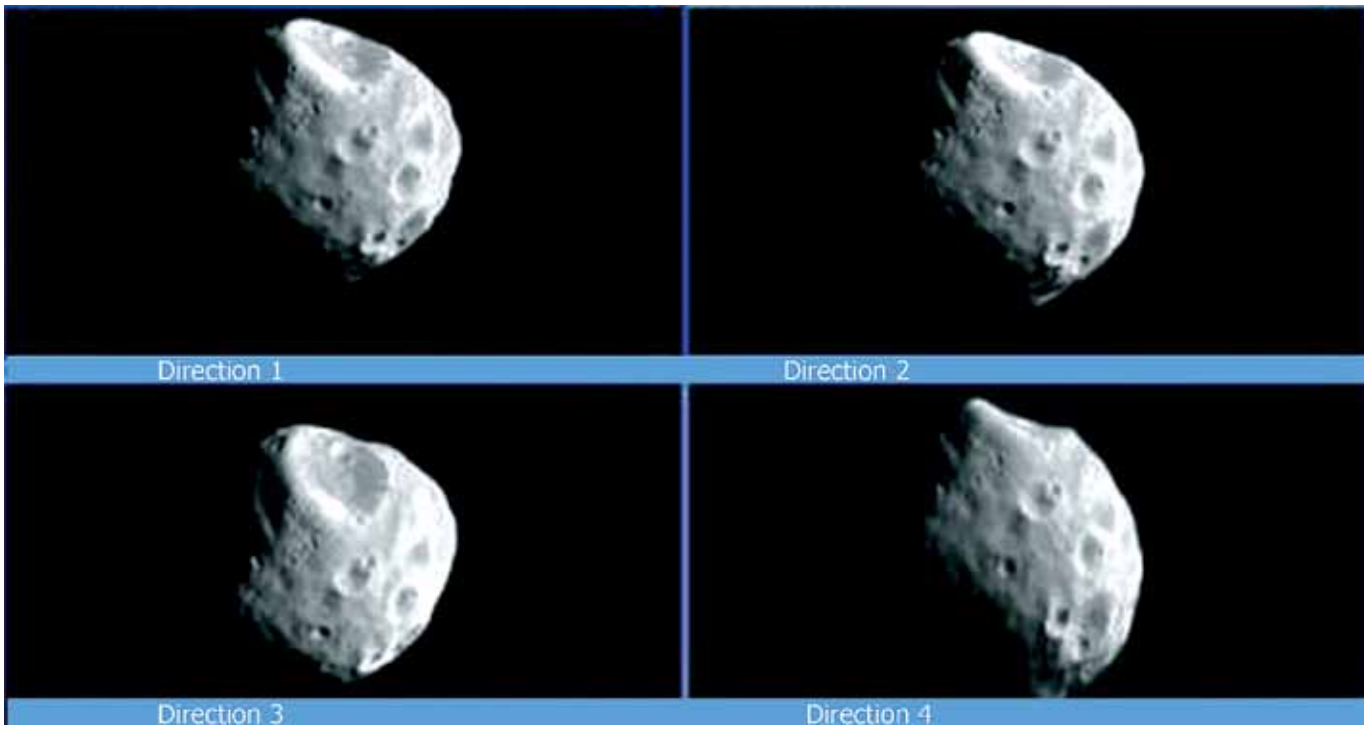


Рис. 7. Изображения Фобоса, полученные в разных цветовых каналах

космических аппаратов, что позволяет осуществлять мониторинг CE-1 и CE-2 в реальном времени с высокой точностью. По сравнению с определением орбит, определение положений векторов характеризуется произвольным требованием к длине отслеживаемой дуги, поэтому можно геометрически наблюдать за качеством отслеживаемых данных и эволюцией траектории космического аппарата. Китайская наблюдательная VLBI сеть становится особенно востребованной в рамках развития китайских национальных проектов, и эта тенденция будет, несомненно, сохраняться. Например, согласно программе китайского освоения Луны, методы VLBI астрометрии будут применяться, чтобы отслеживать траекторию орбитального аппарата, спускаемый модуль и луноход по отношению к радиоисточникам. Также в китайском марсианском проекте Yanghuo-1 будет осуществлена на основе VLBI техническая поддержка с целью определения положения и элементов орбиты спутника.

В докладе В. Сидоренко (ИПМ РАН) об определении параметров квази-спутниковых орбит был сделан вывод о том, что эти орбиты могут быть рекомендованы как технически подходящие для крупномасштабного сканирования лунной среды.

Японская делегация в составе Х. Нода, К. Матсумото, С. Сасаки, Х. Ханада (NAOJ, Japan) выступила с серией докладов по освоению Луны. Были рассмотрены вопросы лазерного зондирования в японской миссии SELENE-2, дифференциальных и обратных VLBI наблюдений радиоисточников на спускаемых и орбитальных аппаратах для изучения внутреннего строения Луны для миссии SELENE-2, создания и развития малых цифровых телескопов для наблюдения лунного вращения с поверхности Луны (рис. 9), создание первой точной лунной гравитационной и топографической глобальной модели на основе данных миссии KAGUYA (SELENE).

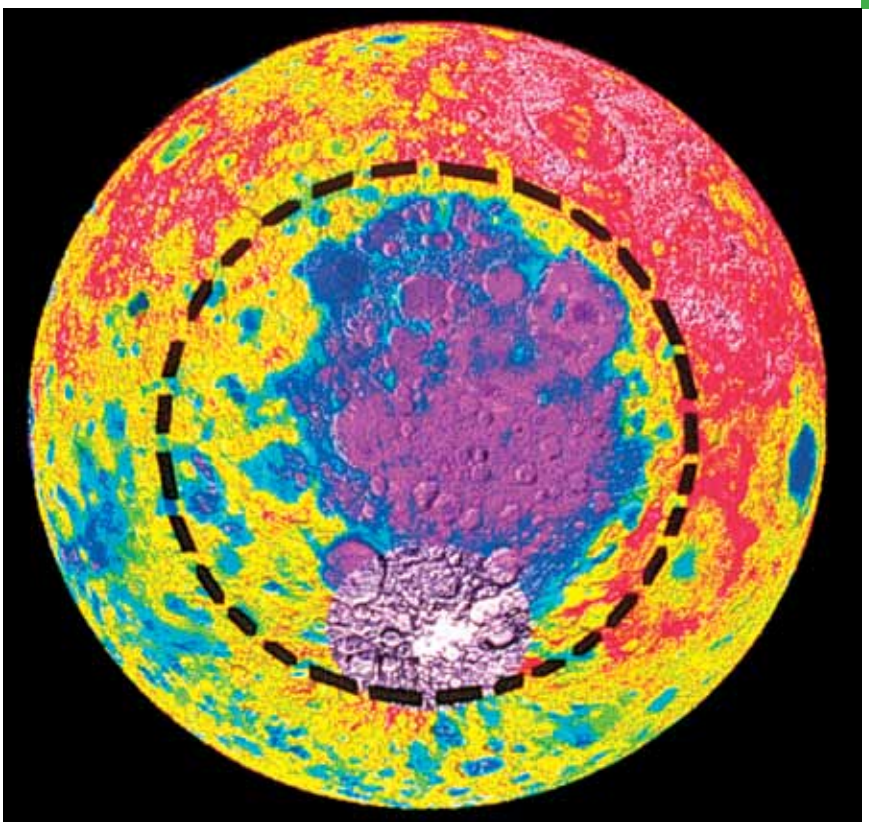


Рис. 8. Топографическая карта района кратера Айткен

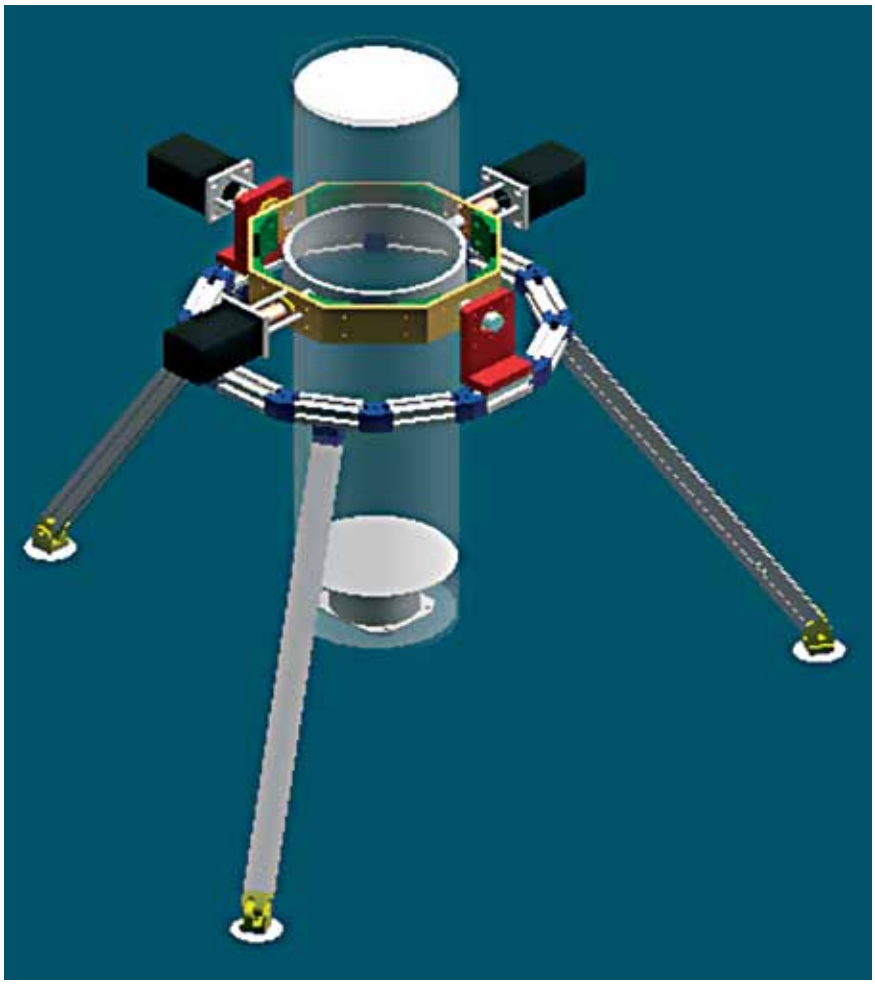


Рис. 9. Малый цифровой телескоп для наблюдения вращения Луны

В.Г. Турышев (JPL NASA) сделал четыре доклада на темы: современные достижения, технологии и новые подходы в области лазерного сканирования Луны и Марса-Фобоса; исследования аномалии миссии Pioneer 10/11; обзорный доклад по тестированию релятивистских теорий и их развитию на основе современных данных наблюдений Доплеровского эффекта, планетного сканирования, лазерного сканирования Луны (LLR), гравиметрических исследований в космосе, и ряда наземных экспериментов. В последнем докладе автор особо подчеркнул, что оптические технологии являются важными для фундаментальных физических исследований в Солнечной системе. Особенно востребованными для этой цели являются LLR наблюдения лунных уголковых отражателей, размещенных на лунной поверхности астронавтами экспедиций APOLLO, которые продолжаются уже 50 лет. Необходимо также рассматривать и будущие релятивистские гравитационные эксперименты совместно с точными данными лазерного сканирования межпланетных расстояний, что будет осуществлено в будущих проектах освоения Луны и Марса.

М.С. Чубей (ГАО РАН) рассказал о проекте создания «Орбитальной звездной стереоскопической обсерватории (OStSO)» (рис. 10). Данный проект предполагает использование стереоскопического метода для фундаментального исследования в областях небесной механики, астероидной и кометной опасности Hazard (ACH), звездной астрономии, астрометрии и астрофизики для объектов до 25 звездной величины. Были названы еще две области фундаментальных проблем, где было бы эффективно применение данного метода: физика Солнца и солнечно-земные связи.

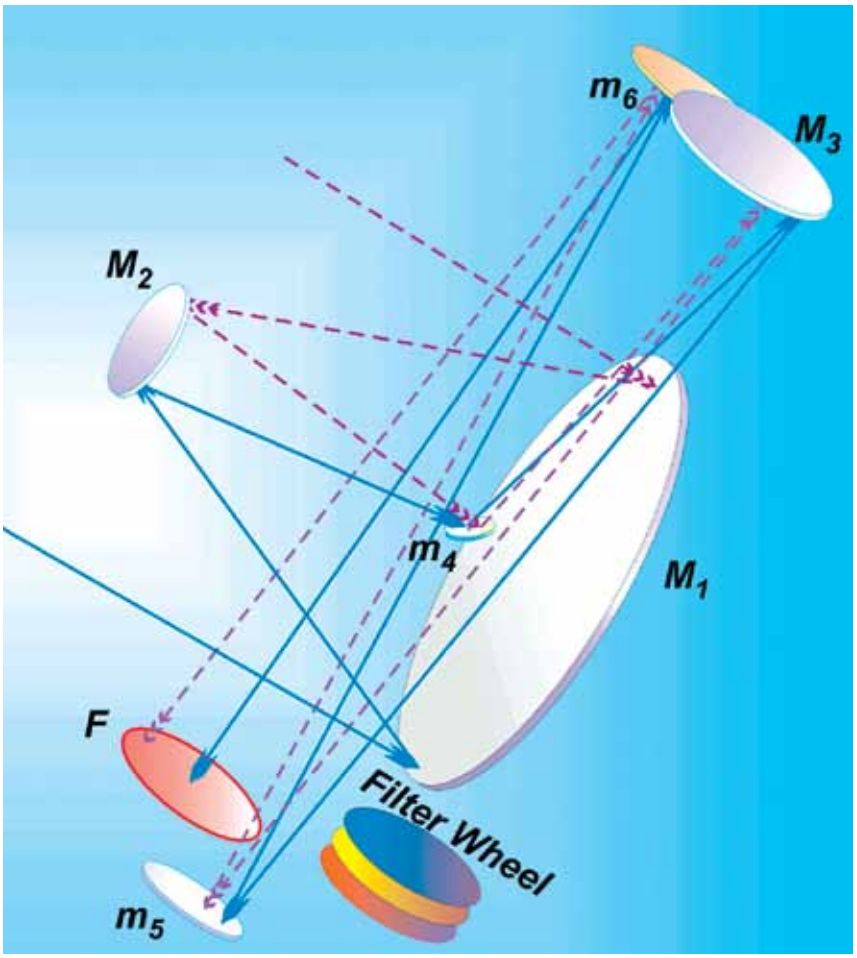


Рис. 10. Оптическая схема OStSO

Л.В. Ксамфомалити (ИКИ РАН) сделал доклады о предполагаемом в недалеком будущем разрушении ядра кометы Hartley 2 и о возможности жизни в высокотемпературном мире на основе анализа панорам поверхности Венеры 1 марта 1982 г. В последнем докладе автор исходит из обнаруженного им за короткий отрезок времени смещения на поверхности детали некоторой специфической конфигурации, что он склонен ассоциировать с живым существом. Признавая, что любая обитаемая планета должна обладать уникальной комбинацией физических свойств, и в первую очередь, необходимыми температурными характеристиками, он, тем не менее, не исключает фантастического сценария, согласно которому могли бы существовать иные формы жизни. Никаких убедительных доказательств такой возможности, исходя из известных биологических критериев, к сожалению, нет.

В.Е. Жаров (ГАИШ, МГУ) в докладе «РСДБ в астрометрии: настоящие и будущие достижения» описал появившиеся в конце 70-х–начале 80-х гг. новые методы астрометрических наблюдений, среди которых выделяется радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ-VLBI). Использование этого метода эффективно для решения, прежде всего, астрометрических задач. Среди важнейших – определение небесной системы координат, которая задается положениями опорных внегалактических радиоисточников. Наблюдения на РСДБ позволили измерить скорость распространения

гравитационного поля, провести высокоточную навигацию в межпланетном пространстве, а также выполнить слежение за баллонами в атмосфере Венеры и за спуском зонда «Гюйгенс» в атмосфере Титана. Использование сетей РСДБ дает возможность построить карты радиоисточников с разрешением, недостижимым для других инструментов. В докладе был дан прогноз развития РСДБ в будущем, в первую очередь, это касается проекта VLBI2010 и проекта «Радиоастрон».

В докладе А.В. Гусева в соавторстве с О.А. Титовым (Geoscience, Canberra, Australia) и Ю.А. Нефедьевым (КФУ) был представлен проект Казанского федерального университета под названием «Современный информационно-технический комплекс для проведения лазерных и радиоинтерферометрических наблюдений на сверхдлинной базе и наземной поддержке российских и международных космических программ в Казанском федеральном университете».

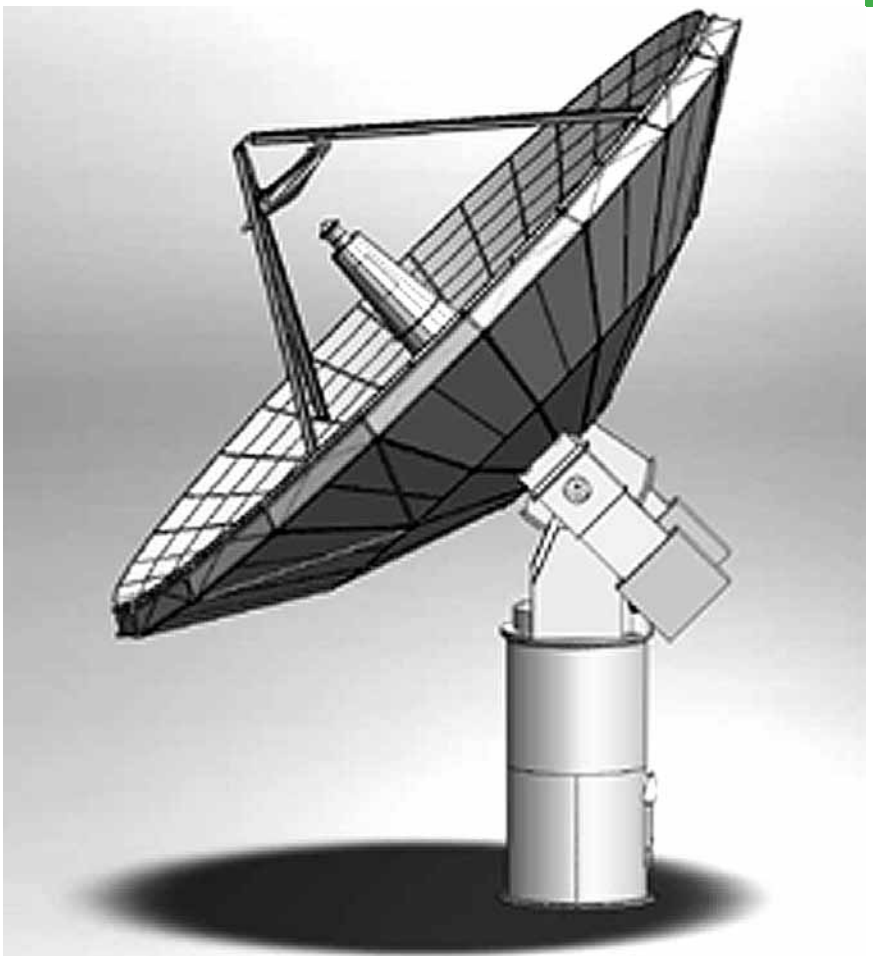


Рис. 11. РСДБ антенный комплекс

Стратегические цели проекта

Организация лазерной локации и канонической, дифференциальной и обратной РСДБ астрометрии искусственных спутников Земли (ИСЗ), искусственных спутников Луны (ИСЛ) и искусственных спутников планет (ИСП) Солнечной системы на базе АОЭ КФУ (рис. 11).

Конкретные цели проекта

1) создание научно-технической базы на территории Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта (КФУ, Казань) для проведения лазерной и световой локации (2015 г.) и радиоинтерферометрии (2014 г.) космических объектов;

2) развитие научно-технического и компьютерного вычислительного комплекса в АОЭ КФУ для астрометрической альтиметрии ИСЗ, ИСЛ и ИСП с точностью до 10 мм к 2017 г.;

3) создание эффективной научно-технической службы лазерной, световой и радиолокации спутников и космического мусора в околоземном пространстве в АОЭ КФУ к 2019 г.

Цели и задачи проекта лазерной и РСДБ астрометрии: создание астрономо-геодезического комплекса, включающего лазерный дальномер и 12-метровую параболическую антенну высокой точности и быстродействия, которая будет использоваться для:

1) проведения РСДБ наблюдений в рамках федеральной программы КВНО РФ (фундаментальный сегмент);

2) слежения за спутниками глобальной навигационной системы (ГНС) ГЛОНАСС;

3) участия в наземной поддержке лунных и планетных исследовательских программ Роскосмоса РФ на период до 2020 г. и международных проектов по исследованию планет и лун Солнечной системы.

Научные и образовательные задачи проекта.

Исследование ближнего и дальнего космоса в рамках космических программ Роскосмоса (Россия) и совместных международных космических про-

грамм (Mars-Express, SELENE-II, Chang'E-3,4,5,6, Chandrayaan-II, ILOM, Luna-Glob, Luna-Resource, MoonLITE, ILN, Bepi Colombo, ExoMars, LaRa, EJSM, TSSM, Europe lander, (2011–2020 гг.) в сотрудничестве с JPL (USA); ESA, JEVA (EU); JAXA, NAOJ (Japan); CASC, SHAO (China).

Подготовка кадров

Подготовка кадров для проекта будет осуществляться на базе Института физики КФУ, КГТУ (КАИ), КФТИ КНЦ РАН. После введения в строй весь комплекс станет научно-учебным полигоном для КФУ, вузов и институтов РАН и АН РТ г. Казани, Татарстана, Поволжья, России. Весь комплекс войдет в мировую сеть обсерваторий и станций, осуществляющих лазерную локацию Луны и РСДБ искусственных спутников Земли, Луны, планет и естественных радиоисточников Вселенной.

Международное сотрудничество АОЭ КФУ

В настоящее время научные планы совместных исследований Луны на базе современных технологий РСДБ астрометрии на 2010–2015 гг. закреплены четырьмя меморандумами между КФУ и Национальной Астрономической обсерваторией Японии и Шанхайской астрономической обсерваторией Китая.

Организационно-кадровое обеспечение проекта

Сформирована и активно работает международная команда из ведущих специалистов России и мира в этом научно-инновационном стратегическом направлении астрономических и космических исследований (алфавитный порядок): Gurvits L.I., (Jive, The Netherlands), Гусев А.В., (АОЭ КФУ), Жаров В.Е. (ГАИШ, МГУ), Hanada H., (ILOM, NAOJ, Japan), Huang C., (SHAO, China), Загретдинов Р.В., (КФУ), Кащеев Р.А., (КФУ), Kawaguchi N., (VERA, NAOJ, Japan), Нефедьев Ю.А., (КФУ), Noda K. (NAOJ, Japan), Ping J. (SHAO, China), академик АН РТ Сахибуллин Н.А.,(КФУ), Titov O., (Geoscience, Ausrtalia), Turyshev S.G. (JPL NASA, USA), Шерстюков О.Н.,(КФУ), Torre J-M.,(SERGA, France).

В докладе были представлены также технические характеристики и ключевые спецификации лазерного дальномера и параболического 12-метрового радиотелескопа для АОЭ КФУ, которые были подготовлены международной рабочей группой проекта в соответствии с требованиями международной программы VLBI-2010 IVS в составе: Сергей Гуляев (AUT, New Zealand), Леонид Гурвиц (JIVE, The Netherlands), Александр Гусев (АОЭ КФУ, Россия), Владимир Жаров (МГУ, Россия), Noriyuki Kawaguchi, (VERA, NAOJ, Japan), Jinsong Ping (SHAO, China), Олег Титов (Geoscience Australia, Australia), Слава Турышев (JPL, USA), Олег Шерстюков (Институт физики КФУ, Россия).

В заключение можно сделать вывод, что мировым научным сообществом за последние годы проделана большая и плодотворная работа в области планетной астрономии и подготовки к роботизированному освоению Луны, получено большое количество уникальных наблюдений, проведены важные научные исследования, которые позволят в ближайшем будущем осуществить космические миссии к лунам и планетам в солнечной системе и создать обитаемые научные базы на этих небесных телах.

Все фотографии, используемые в статье, предоставлены авторами, рис 1 и 3 – с любезного разрешения НПО им. Лавочкина.

Подписано в печать 04.07.2013. Формат 60 x 90 $^{1}/_{8}$.
Печ. л. 10. Тираж 1100 экз.

Оригинал-макет и печать ЗАО «ИТЦ МОЛНЕТ»
123104, г. Москва, Малый Палашевский пер., д. 6
Тел./факс: (495) 927 0198,
e-mail: info@molnet.ru