

УДК 541.15

РАДИОХИМИЯ – НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО*(К 50-летию кафедры радиохимии МГУ имени М.В. Ломоносова)***Б.Ф. Мясоедов***(академик, председатель Межведомственного научного совета по радиохимии при Президиуме РАН и ГК Росатом)*

Ушедший XX в. можно назвать атомным. На его пороге было обнаружено явление радиоактивности. Это выдающееся открытие привело к величайшим достижениям в технических областях науки, изменившим окружающую среду и условия обитания человека. В XX в. возникла новая активно развивающаяся наука – радиохимия, включающая в себя такие важные дисциплины, как радиационная химия, ядерная химия, радиохимический анализ и другие.

Термин «радиохимия» впервые был введен А. Камероном в 1910 г. С позиций современных знаний, как отмечал чл.-корр. РАН Ан.Н. Несмеянов, радиохимия – область науки, изучающая химию радионуклидов и радиоактивных веществ, их физико-химические свойства, ядерные превращения и сопутствующие им химические процессы [1].

С момента проведения исторических опытов Беккереля началось бурное развитие исследований радиоактивности. На переломе XIX и XX вв. был открыт ряд новых радиоактивных элементов – полоний [2], радий [3], актиний [4]. В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди пришли к заключению, что атомы радиоактивных элементов претерпевают самопроизвольные превращения, т.е. происходит превращение одних элементов в другие, сопровождающееся радиоактивным излучением. Это наблюдение привело к созданию в 1902–1903 гг. теории радиоактивных превращений [5]. В этот период основные усилия ученых-радиохимиков были направлены на то, чтобы выявить главные закономерности радиоактивного распада, понять природу этого явления, найти новые радиоактивные элементы и изучить их свойства.

Существенный вклад в изучение радиоактивности внесли русские ученые [6, 7]. Уже в 1896 г. профессора Военно-медицинской академии Н.Г. Егоров и Л.А. Гертуні воспроизвели опыты А. Беккереля. В 1900 г. И.И. Боргман, профессор Петербургского университета, подтверждая работы М. Кюри, нашел прямую зависимость интенсивности излучения урана от его содержания в изучаемых объектах, а ранее

(1897 г.) он обнаружил способность этих лучей вызывать термоллюминесценцию.

В Московском университете работы по изучению радиоактивности начались вскоре после открытия этого явления, их проводили на физико-математическом факультете, деканом которого был выдающийся химик-органик С.Н. Реформатский, а секретарем факультета – основатель курса микрохимического анализа К.Л. Маляров. Интерес химиков университета к радиоактивности был очевиден – в разных лабораториях начались активные исследования в этой области. Так, изучение радиоактивности природных объектов (вод, лечебных грязей и горных пород) проводилось в Институте физики под руководством проф. А.П. Соколова, разработавшего метод определения радия по выделяющемуся радону (этот метод находит практическое применение и в наше время). Радиохимия вызывала интерес и проф. И.А. Каблукова – заведующего лабораторией неорганической и физической химии Московского университета. В 1908 г. он опубликовал обзорную статью “Радиоактивные вещества”, а в 1910–1911 гг. – рецензии на книги Ф.Содди “Радий и его разгадка”, М. Кюри “Traite de radioactivite”, а также на докторскую диссертацию В.А. Бородавского “Поглощение бета-лучей радия”. Несколько позже к изучению радиоактивности источников и осадочных пород присоединился Вл.И. Спицын. Ему в 1913/14 учебном году удалось открыть “радиоактивный” практикум в так называемом “красном корпусе” Московского университета на Манежной площади. Среди практических задач были такие, как определение удельной активности радиоактивных веществ; определение периодов полураспада и последовательных ступеней распада некоторых короткоживущих “радиоэлементов”; качественный анализ по радиоактивности урана, тория и радия; анализ грязей на радиоактивность; эманационный метод определения малых количеств тория; изучение радиоактивности калия и рубидия. Примечательно, что некоторые из этих задач не утратили своей привлекатель-

ности и сегодня. В 1914 г. Вл.И. Спицын исследовал радиоактивность источников и осадочных пород курорта “Горячий ключ” (Кубань), в 1915–1917 гг. он занимался определением растворимости малорастворимых соединений тория, используя в качестве индикатора его изотоп – уран- X_1 , а в 1921 г. изучал переход радона из минералов в жидкие среды. В 1922 г. Вл. И. Спицын и В.И. Баранов исследовали природную радиоактивность калия и рубидия. Увы, Вл.И. Спицын прожил всего 30 лет, и можно только гадать, сколько нового он мог бы открыть.

Несмотря на большие достижения в области изучения радиоактивности, радиохимия как наука не являлась в университете самостоятельной научной дисциплиной. Лишь в ходе структурных изменений было создано химическое отделение физико-математического факультета (1921 г.), превратившееся затем в научно-исследовательский институт химии (1922 г., директор – И.А. Каблуков) и, наконец, в химический факультет (1929 г.), на котором была открыта лаборатория радиоактивных веществ. В ней решались важнейшие задачи, связанные с созданием технологических методов выделения искусственно получаемых элементов и изучением их химических и физико-химических свойств. Лаборатория радиохимических веществ имела высокий авторитет в стране. Так, один из ведущих ученых лаборатории В.И. Баранов был приглашен на первую Всесоюзную конференцию по радиоактивности, организованную в 1932 г. в Ленинграде по инициативе Радиевого института, где и встретился с выдающимися учеными – В.И. Вернадским, А.Е. Ферсманом, В.Г. Хлопиным, А.А. Гамовым, Д.В. Скобельциным, Л.В. Мысовским, И.Я. Башиловым и другими.

В декабре 1942 г. под руководством Э. Ферми состоялся пуск первого атомного реактора, на котором была продемонстрирована возможность практического накопления делящегося плутония-239. С этого времени началось активное использование атомной энергии как в военных, так и в мирных целях. Это потребовало подготовки большого числа специалистов очень высокого уровня. По инициативе руководителя отечественного атомного проекта И.В. Курчатова и младшего брата Вл.И. Спицына – Викт. И. Спицына, на базе известной лаборатории радиохимических веществ кафедры неорганической химии в 1944 г. была создана специальная лаборатория, которой руководил до 1949 г. чл.-корр. АН СССР В.В. Фомин (1909–1979). Сотрудники лаборатории не только готовили кадры для реализации советского атомного проекта,

но и проводили важнейшие научные исследования. Так, начиная с 1944 г. проводились работы по синтезу и исследованию свойств некоторых соединений урана, которые в дальнейшем были продолжены в ВНИИ неорганических материалов, куда В.В. Фомин был переведен в 1948 г. Усилия радиохимиков МГУ были направлены также на изучение химических свойств малоизвестных тогда плутония и нептуния, разработку эффективных методов их выделения и глубокой очистки от осколочных элементов. При решении этих проблем широко использовались экстракционные методы.

В лаборатории решалась также другая важная и актуальная для того времени задача, связанная с созданием перспективных радиопротекторов. В ходе ее решения методами химического синтеза и изотопного обмена тритий, углерод-14, хлор-36 и серу-35 вводили в органические молекулы биологически активных веществ, в том числе и в радиопротекторы [8].

В 1959 г. лабораторию радиохимии возглавил чл.-корр. АН СССР Ан.Н. Несмеянов (1911–1983). В это время в лаборатории были развернуты работы по дозиметрии ионизирующих излучений и радиоактивности окружающей среды, синтезу меченых соединений.

С переездом в новое здание на Ленинских горах химический факультет и вместе с ним лаборатория радиохимии начинают новую жизнь. В специально построенном корпусе разместилась созданная в 1959 г. кафедра радиохимии, заведующим которой стал Ан. Н. Несмеянов. Под его руководством активно развивался метод изотопного обмена для изучения процессов испарения 23 труднолетучих элементов, а также их соединений и сплавов, используемых в качестве конструкционных материалов и ракетных топлив. Была разработана концепция радионуклидного люминесцентного зонда и предложен метод диагностики дисперсных систем, а также метод определения малых количеств никеля в растворах (субстехиометрический вариант метода изотопного разбавления). Для изучения некоторых химических процессов в промышленности и в природных системах были разработаны эффективные автордиографические методы [9–11]. Для физико-химической диагностики магнитно упорядоченных соединений был предложен мессбауэровский диамагнитный зонд (П.Б. Фабричный). Этот метод с успехом применялся для решения таких задач, как исследование химических реакций с участием поверхностных примесных центров в оксидах 3d-металлов, применяющихся в полупроводниковых сенсор-

ных устройствах, и процессов структурирования в аморфных гидроксидах *3d*-металлов [11].

На кафедре радиохимии активно исследовались возможности метода изотопного обмена для изучения массообмена и экстракционных процессов (Б.З. Иофа с сотр.). В.М. Федосеев и С.Н. Ткаченко впервые установили явление “фрагментарного” обмена между тиокарбамидом, меченным серой-35 или углеродом-14, и *S*-аллил-, *S*-бензилизотиомочевинной, а также некоторыми *S,N*-гетероциклическими изотиомочевинами.

Под руководством Ан.Н. Несмеянова активно развивались исследования химических процессов с участием частиц с высокой кинетической энергией, получаемых на низкоэнергетическом ускорителе ($E = 100$ эВ) (А.М. Бабешкин, Л.П. Фирсова). Была разработана термодинамическая модель стабилизации “горячих” атомов в твердых неорганических соединениях, объясняющая создание в горячей зоне промежуточного метастабильного образования из атомов, входящих в состав вещества (Э.С. Филатов, Г.А. Бадун).

И.В. Мелихов, С.С. Бердоносков и другие в течение ряда лет разрабатывали макрокинетическую теорию сокристаллизации радионуклидов и сформулировали основное кинетическое уравнение образования твердой фазы носителя и захвата радионуклидов носителем, разработали модели предельных режимов сокристаллизации, создали алгоритмы и программы для расчета процесса сокристаллизации в реакторах разной конструкции [12, 13]. Было установлено, что сокристаллизация радионуклидов и носителей может привести к состоянию, весьма близкому к термодинамическому равновесию, если скорость сокристаллизации не превышает некоторого порога, который можно назвать порогом квазиравновесности. За большие научные достижения и успешное решение важных задач И.В. Мелихов, С.С. Бердоносков и В.Ф. Комаров были удостоены Государственной премии СССР в 1989 г., а работы И.В. Мелихова по изучению кристаллизационных процессов при высоком пересыщении были отмечены Ломоносовской премией МГУ в 1990 г.

Начиная с 70-х гг. прошлого века в качестве первоочередных в области радиохимии выдвигаются вопросы изучения поведения радионуклидов в природной среде, решения проблемы радиоактивных отходов, неизбежных при существующей технологии переработки облученного ядерного топлива, разработки способов долговременного безопасного хранения радиоактивных отходов, а также реабилитации загрязненных территорий [14].

В этой связи на кафедре радиохимии были начаты исследования в области радиоэкологии, предложены и внедрены в практику малогабаритные автономные детекторы рентгеновского, гамма-, нейтронного, СВЧ-, ИК- и УЗ-излучений. Проведена идентификация источников поступления и изучено поведение естественных и искусственных радионуклидов в морской среде. Так, было установлено, что удельная активность $K-40$ в морской воде может существенно отличаться от значений, рекомендованных для земных пород [15, 16]. Сотрудники кафедры радиохимии получили интересные результаты по влиянию разных факторов (пористость, удельная поверхность и влагосодержание материала, температура окружающей среды) на состояние и миграцию радона (радон-220 и радон-222) в природных средах (горные породы, минералы, почвы и др.) и строительных материалах (древесина различной породы, цемент, бетон, конструкционные полимеры и др.). Проведено математическое моделирование процессов выделения радона и торона из материалов при изменяющейся температуре и влажности атмосферы. Многие исследования кафедры носят комплексный характер и выполняются совместно рядом лабораторий, а также в содружестве с другими кафедрами факультета и различными научными центрами.

В 1983 г. скончался Ан.Н. Несмеянов, так много сделавший для развития радиохимии. Кафедру возглавил академик В.А. Легасов. Проработав много лет на Сибирском химическом комбинате, он, известный химик и технолог, хорошо понимал, в каком направлении должна развиваться радиохимическая технология. По инициативе В.А. Легасова, в 1984 г. кафедру радиохимии объединили с кафедрой химической технологии. Объединение кафедр было продиктовано бурным развитием в стране атомной промышленности и необходимостью проведения широких исследований по развитию современных технологий утилизации отработанного ядерного топлива, решения проблем обращения с радиоактивными отходами.

В годы Чернобыльской катастрофы сотрудники объединенной кафедры МГУ принимали активное участие в работах по радиомониторингу и реабилитации загрязненной радионуклидами территории. На кафедре были разработаны и внедрены детекторы и методы мониторинга загрязненных территорий, в том числе реконструкции радиационной обстановки (В.К. Власов, Н.А. Карпов). Предложены перспективные методы пылеподавления с использованием водных растворов полиэлектролитов и водных эмульсий

битума. Композиционные растворы, разработанные совместно с кафедрой высокомолекулярных соединений МГУ, были использованы для предотвращения ветрового переноса радионуклидов в зоне Чернобыльской АЭС (Л.П. Фирсова). Ученые кафедры первыми определили наличие “горячих частиц” на протекторах иногороднего автотранспорта, следующего в Москву, что позволило принять необходимые меры защиты населения.

После кончины В.А. Легасова, в 1989 г. приказом ректора МГУ на основании решения ученого совета химического факультета были воссозданы две самостоятельные кафедры: радиохимии и химической технологии. Заведующим кафедрой радиохимии был избран доктор химических наук, профессор В.М. Федосеев, ныне академик РАН, Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный профессор Московского университета.

Среди многих экологических проблем, возникших в последние годы, особое внимание привлекают вопросы радиоактивного загрязнения окружающей среды. Обеспечение радиационной безопасности требует от ученых глубокого изучения поведения радионуклидов в окружающей среде. Вот почему В.М. Федосеев выбрал радиозекологию одним из приоритетных направлений дальнейшего развития кафедры. Для этого кафедра имела серьезный фундамент в виде многолетних широкомасштабных исследований в области изучения химических свойств ряда радиоактивных элементов и методов их выделения и избирательного определения. Безусловно, этот выбор был определен также событиями в Чернобыле, в которых сотрудники кафедры (Ю.А. Сапожников и др.) принимали самое активное участие, в том числе в работе по реабилитации загрязненных территорий. На кафедре радиохимии были созданы условия для активного развития выбранного направления, включающего следующие основные задачи: изучение и оценка источников радиоактивного загрязнения; разработка современных методов радиохимического контроля объектов окружающей среды (воздух, природные и сточные воды, почвы); решение проблемы утилизации ядерных материалов, обращение с высокорadioактивными отходами и реабилитация загрязненных территорий. Для решения этих задач активно развивались экстракционные и сорбционные методы концентрирования и выделения актинидов, а также продуктов деления из объектов окружающей среды. Изучались химические свойства трансурановых элементов, в том числе их

окислительно-восстановительные реакции в природных средах; а также проводились исследования по синтезу соединений актинидов. Новые методы разделения и концентрирования радионуклидов используются для мониторинга радионуклидов в природных средах. Изучен характер распределения природных и техногенных радионуклидов в водах и в воздухе Азовского, Черного, Каспийского и Белого морей, а также в водах озера Байкал (И.Н. Бекман, Ю.А. Сапожников, Г.Б. Рязанцев и др.). Предложены методы мониторинга изотопов радона, которые могут использоваться для оценки содержания радона в жилищах. Разработанная профессором И.Н. Бекманом теория миграции радионуклидов в гетерогенных нестационарных средах используется для статистического анализа радиационного фона в районе г. Мариуполя.

Одним из важнейших направлений исследований на кафедре является разработка методов контроля степени загрязнения природной среды радионуклидами и прогнозирования их поведения в экосистемах. При этом систематически изучаются закономерности распределения радионуклидов в объектах окружающей среды, определяются формы их нахождения, изучаются механизмы миграции радиоактивных элементов в системах почва – растения, почва – поверхностные и грунтовые воды, вода – взвеси – донные отложения и т.д. Эти системы пока еще мало изучены, что связано в первую очередь с трудностями методического характера.

К числу достижений в этом направлении можно отнести данные о формах существования долгоживущих радионуклидов в подземных хранилищах радиоактивных отходов, изучение сорбции, гидролиза, коллоидообразования актинидных элементов в грунтовых водах (совместно с ГЕОХИ РАН, ИФХЭ РАН). Эти результаты позволили разработать модели миграции актинидов, прогнозировать изменение радиационной ситуации в заданном регионе, а также разработать комплексный план реабилитации природных вод и почв этих территорий. Эти важные результаты недавно были обобщены в докторской диссертации выпускника кафедры С.Н. Калмыкова.

Кафедра радиохимии активно сотрудничает с рядом ведущих научных центров – Институтами РАН, учреждениями ГК Росатом и высшими учебными учреждениями (ИОНХ, ГЕОХИ, ИФХЭ, ИНХС, ИМГ, ИТЭФ, ИЯИ, Институт кристаллографии, ИХТТ УрО РАН, РНЦ “Курчатовский институт”, ОАО “НИИ-АР”, ГУП МосНПО “Радон”, ГНЦ “ФЭИ”, кафедра радиохимии СПбГУ, УГТУ–УПИ в Екатеринбурге,

лаборатория радиохимии ЕНИ Пермского университета и др.).

Кафедра имеет прочные международные научные контакты, в том числе с такими центрами, как Варшавский университет, Карлов университет (Прага), университеты г. Бордо и г. Нанта (Франция), г. Саламанка (Испания), Римский университет, Стелленбошский университет (ЮАР), Институт ядерных исследований г. Ржеж (Чехия), Центр “Экология и здоровье” (Мюнхен) и др.

В период с 1993 по 2008 г. сотрудники кафедры опубликовали около 800 научных статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах, на российских и международных конференциях представлено более 600 докладов. Работы кафедры поддержаны большим количеством российских и международных грантов: более 100 в период с 1996 по 2008 г.

Таким образом, завершая обзор основных научных достижений кафедры, можно констатировать, что она всегда принимала участие в развитии основных современных направлений радиохимии, занимала и продолжает занимать достойное место в развитии фундаментальных основ радиохимии, атомной энергетики, радиоэкологии и ядерной медицины. Однако было бы неправильно ограничиваться в настоящей статье рассмотрением только научных и научно-организационных достижений кафедры. Она была создана не только для проведения научных исследований, но в первую очередь для подготовки специалистов в области радиохимии.

Еще в 1959 г. на кафедре в соответствии с Постановлением Совмина СССР по совместному приказу ГКИАЭ и Минвуза СССР были созданы Центральные курсы по научным основам использования радиоактивных изотопов и ядерных излучений в науке и промышленности. Программы курсов были составлены по “гибкой” системе с учетом контингента слушателей и длительности очередного учебного потока. За время деятельности курсов было подготовлено более 6500 слушателей по двадцати двум базовым специальностям для 260 городов и населенных пунктов страны и ряда других государств Европы, Азии и Латинской Америки. Многие годы курсами успешно руководил доцент И.В. Голубцов. На кафедре были подготовлены десятки специалистов-радиохимиков, которые успешно работают в Китае, Болгарии, Сербии, Польше, Германии, Румынии, Венгрии, Чехии, Словакии, Кубе, Мексике, Южной Корее и других странах. Для общего потока студентов химического факультета МГУ еще в 1956 г. был создан практикум

по основам радиохимии и радиоэкологии. Курс ставит своей задачей подготовку химиков широкого профиля к сознательному и грамотному использованию радионуклидов для решения различных химических и радиоэкологических задач. За прошедшие годы практикум неоднократно совершенствовался и модернизировался. В настоящее время он включает вопросы по теме не только радиоактивных индикаторов в химии, но и радиоактивности окружающей среды. Крайне малый объем курса “Радиохимия” потребовал разработки и внедрения соответствующей системы программного обучения и контроля знаний. Огромная заслуга в этом принадлежит доценту В.Б. Лукьянову. Апробируется и поэтапно внедряется система практических занятий “по выбору” с учетом будущей специализации студентов (неорганическая, аналитическая, органическая и физическая химия, биохимия и химическая экология).

Преподаватели и научные сотрудники кафедры подготовили более 40 специальных лекционных курсов, освещающих актуальные вопросы современной радиохимии, радиационной безопасности и радиоэкологии. Как правило, студенты-радиохимики начинают проводить научные исследования с 1-2-го года обучения, по традиции они активно участвуют в работе научно-студенческих конференций. За 1988–2008 гг. в секции “Радиохимия” с докладами выступили более 230 студентов.

Многолетний опыт работы кафедры по подготовке радиохимиков для нашей страны (подготовлено более 600 человек) был безусловно положительным. Абсолютное большинство выпускников кафедры радиохимии – специалисты высочайшего класса, доктора и кандидаты наук, среди них 3 лауреата Ленинской премии и 12 лауреатов Государственной премии. Среди известных выпускников кафедры радиохимии МГУ можно назвать (в скобках указан год окончания МГУ): Николая Тимофеевича Кузнецова (1954) – академика, Евгения Георгиевича Ипполитова (1954) – члена-корреспондента РАН, лауреатов Государственной премии (Институт общей и неорганической химии РАН); Евгения Давидовича Свердлова (1960) – академика, лауреата Ленинской и Государственной премий (Институт молекулярной генетики РАН); Игоря Витальевича Мелихова (1955) – члена-корреспондента РАН, лауреата Государственной премии, заведующего лабораторией кафедры радиохимии химического факультета МГУ; Ивана Гундаровича Тананаева (1980) – члена-корреспондента РАН, главного научного сотрудника ИФХЭ РАН.

На кафедре выполняют диссертационные работы и повышают свою квалификацию аспиранты и стажеры по различным научным направлениям современной радиохимии. В 1988–2008 гг. защитили кандидатские диссертации 48 аспирантов и соискателей кафедры, докторские – 6 преподавателей и сотрудников кафедры.

На кафедре всегда велась большая методическая работа. Сотрудники и преподаватели кафедры подготовили в общей сложности 25 учебников, учебных пособий и монографий, активно используемых в учебном процессе. Отметим первый в нашей стране учебник по радиохимии, за который его автор Ан.Н. Несмеянов был удостоен Ломоносовской премии МГУ. Издана большая серия методических руководств по разным разделам курса “Радиоактивные индикаторы в химии” и ряд соответствующих методических пособий по радиохимии. Кафедра поддерживает контакты в области учебно-методической работы с университетами Санкт-Петербурга и Нижнего Новгорода, с родственными кафедрами других вузов. В учебном кафедральном процессе используются

учебные пособия, подготовленные преподавателями кафедры радиохимии СПбГУ.

В заключение можно с удовлетворением отметить, что уровень научных исследований и подготовка молодых специалистов в области радиохимии на кафедре соответствует международному. В одной из последних книг Ан.Н. Несмеянов писал: “Радиохимия – наука настоящего и будущего”, эти слова, вынесенные в заголовок данной статьи, с полным основанием можно отнести к кафедре радиохимии МГУ.

В настоящее время перед кафедрой, всем ее коллективом, как и пятьдесят лет назад, стоит весьма ответственная и важная задача – подготовка высококвалифицированных специалистов-радиохимиков в связи с осуществлением в нашей стране плана ускоренного, масштабного развития атомной энергетики.

В этом номере журнала опубликован ряд научных статей ведущих сотрудников Московского университета, отражающих основные направления современной радиохимии.

С Юбилеем Вас, глубокоуважаемые коллеги, доброго Вам здоровья и больших творческих успехов!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несмеянов Ан.Н. Радиохимия. М., 1978.
2. Curie P., Curie M. // CR. Acad. Fr. 1898. **127**. P. 34.
3. Curie P., Curie M., Bemoind G. // C.R. Acad. Fr. 1898. P. 1215.
4. Debierne A. // C.R. Acad. Fr. 1899. **129**. P. 593.
5. Содди Ф. История атомной энергии. М., 1979.
6. Зайцев Л.Л., Фигуровский Н.А. Исследование явления радиоактивности в дореволюционной России. М., 1961.
7. Хлопин В.Г. Краткий очерк истории развития радиевого дела в России. 35 лет Радиевого института им. В.Г. Хлопина. Л., 1957.
8. Федосеев В.М. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1994. **35**. С. 489.
9. Несмеянов Ан.Н. Давление пара химических элементов. М., 1960.
10. Коробков В.И. Метод макроавтордиографии. М., 1967.
11. Голубцов И.В., Приселков Ю.А., Северин В.И., Цепляева А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1994. **35**. С. 525.
12. Мелихов И.В., Меркулова М.С. Сокристаллизация. М., 1975.
13. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. М., 2006.
14. Мясоедов Б.Ф. // Вопросы радиационной безопасности. 1997. **1**. С. 3.
15. Сапожников Ю.А. // Вестн. Моск. ун-та. 1994. Сер. 2. Химия. **35**. С. 563.
16. Громов В.В., Москвин А.И., Сапожников Ю.А. Техногенная радиоактивность Мирового океана. М., 1985.

Поступила в редакцию 20.03.09