

*Посвящается памяти Б.К. Вайнштейна*

## КРИСТАЛЛОГРАФИЯ – МЕТОДОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ НАУКИ XXI ВЕКА

© 2011 г. М. В. Ковальчук

*Институт кристаллографии РАН, Москва*

*E-mail: koval@ns.crys.ras.ru*

*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва*

Поступила в редакцию 14.03.2011 г.

Вспомним, какой путь прошла кристаллография за весь период ее развития и что она представляет собой сегодня. Каково ее методологическое, философское значение в познании мира в широком смысле этого слова?

Очевидно, что кристаллография сегодня имеет мало общего с тем, какой она была 100 лет назад во времена выдающегося ученого Е.С. Фёдорова – одного из основоположников современной структурной кристаллографии, геолога, ректора Санкт-Петербургского горного института. В то время кристаллография была наукой о минералах, изучающей их состав, свойства, давая простые описания и характеристики. С развитием химии началось движение от описательной минералогии к более глубокому анализу, более совершенным методам изучения строения минералов. С открытием рентгеновских лучей в 1895 г. и их дифракции в 1912 г. кристаллография пережила второе рождение. Отсчет развития современной кристаллографии, как и науки о материалах в целом, начинается с открытия рентгеновской дифракции. Именно благодаря рентгеновскому излучению мы смогли увидеть сложное, трехмерное, периодическое строение всего окружающего нас мира. В этот период кристаллография уже стала существенной, неотъемлемой частью физики, образовав новые научные области – рентгеновскую кристаллографию, кристаллофизику, рентгеновскую физику и оптику.

В середине XX в. был присужден целый ряд Нобелевских премий за эпохальные открытия в области физики рентгеновского излучения, которые, по сути, подтвердили великие открытия Резерфорда, Бора и основные принципы квантовой механики. Вскоре рентгенография превратилась в самостоятельный метод исследований, что дало толчок к появлению целого ряда открытий “нобелевского уровня”, но уже относящихся к применению рентгеновских лучей в различных областях. Можно без преувеличения сказать, что все глобальные прорывные открытия того времени, в первую очередь в биологии, медицине и химии,

были сделаны с помощью рентгеновских лучей [1].

После Второй мировой войны также благодаря рентгеновской дифракции кристаллография стала и частью биологии. Современная молекулярная биология – это в значительной мере детище рентгеновской кристаллографии белков.

Все этапы, которые прошла кристаллография, наглядно прослеживаются на примере зарождения и развития Института кристаллографии. В 1925 г. под руководством А.В. Шубникова была сформирована группа кристаллографов при Минералогическом музее Академии наук СССР в Ленинграде. Ее основной целью было исследование кристаллов природного кварца и изготовление пьезокварцевых пластинок. В 1934 г. был образован кристаллографический сектор в Ломоносовском институте геохимии, минералогии и петрографии Академии наук СССР в Москве. А в 1937 г. этот сектор был преобразован в Лабораторию кристаллографии АН СССР в составе Отделения геолого-географических наук, затем в ноябре 1943 г. на ее базе был создан Институт кристаллографии АН СССР в составе Отделения физико-математических наук. Директором был назначен А.В. Шубников, в состав ученого совета входили выдающиеся ученые страны (рис. 1).

А.В. Шубников изучал природный кварц, в частности наблюдаемый в нем пьезоэффект, который оказался крайне важным для прикладных военных целей. Поэтому во время Великой Отечественной войны возник огромный интерес к работам по пьезоэффекту и соответственно сформировался спрос и государственный заказ на такие материалы. Сильный пьезоэффект, например был обнаружен в кристалле сегнетовой соли (в котором впервые И.В. Курчатовым был открыт эффект сегнетоэлектричества). Лаборатория кристаллографии и созданные при ее участии два завода выполняли оборонный заказ на пьезоэлементы для войсковой связи. За годы войны под руководством А.В. Шубникова было искусственно выращено 50 тонн пьезокристаллов сегнетовой соли. Забегая вперед, можно констатировать, что по сути вся

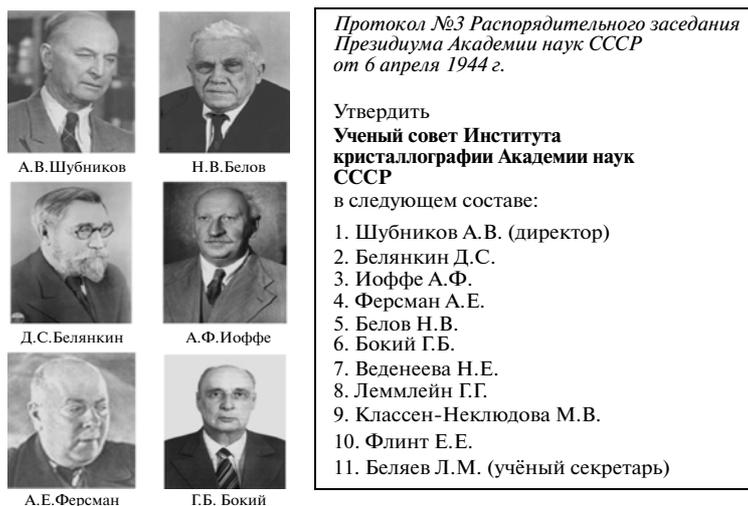


Рис. 1. Состав Ученого совета Института кристаллографии АН СССР в 1944 г.

отечественная промышленность по выращиванию кристаллов вышла из стен этой лаборатории, а затем и Института кристаллографии.

Когда Институт кристаллографии только начинал свою деятельность в области выращивания кристаллов, стояла задача смоделировать природные процессы. Для промышленности нужен был кварц, изначально его находили в горах, ориентировали, обрабатывали и прикрепляли контакты. Затем была поставлена фундаментальная задача — изучить и понять, как он образуется в горных породах, какая температура, давление и другие параметры необходимы для его роста. Так формировалось новое направление роста искусственных кристаллов, и на этом были основаны первые опыты А.В. Шубникова. В качестве примера (рис. 2) показаны кристаллы сегнетовой соли,

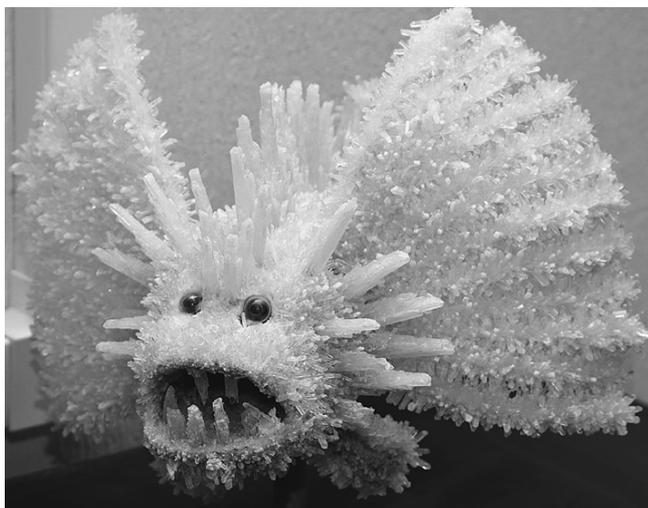


Рис. 2. Пример первых опытов по кристаллизации.

выращенные из насыщенного раствора на каркасе в виде скелета рыбы.

Выращивание кристаллов из насыщенных растворов (низкотемпературная, водорастворная кристаллизация) — это наиболее простой метод, не требующий ни особо сложного оборудования, ни больших затрат. Выращенные таким образом кристаллы и сегодня крайне важны для многих практических применений, например в “лазерном термояде”.

Разработка технологий роста кристаллов базировалась на серьезных фундаментальных, междисциплинарных исследованиях. С помощью геологии, ее симметричных аспектов исследовали и анализировали минералы, с помощью химии — их состав, растворители и т.д., с помощью физики — разрабатывали методы диагностики для комплексного изучения оптических, механических и прочих свойств кристаллов. В процессе развития этих работ в Институте кристаллографии были заложены основы фурье-спектроскопии, открыты явление электрогирации, магнито-пластический эффект, разработаны основные принципы структурной электронографии и белковой кристаллографии [2–4].

Был создан комплекс рентгеновских методов для изучения атомной и реальной структуры кристаллов, разработаны основы структурно-чувствительной спектроскопии поверхности на основе стоячих рентгеновских волн [5–8].

В 1950-х гг. был выращен первый искусственный кристалл кварца и создана промышленная технология его выращивания методом гидротермального синтеза. Сорок лет назад эти работы были отмечены Ленинской премией, и по сей день эта технология выращивания пьезокварца и оптического кварца остается лучшей, благодаря

ей Россия и сегодня обеспечивает почти треть мирового производства этих кристаллов.

Сегодня, когда мы говорим о высокотехнологичной, инновационной экономике, важнейшая задача состоит в том, чтобы научные результаты как можно скорее вышли в производство, к потребителю – тогда возникнет обратная связь, и научная продукция будет востребована самим обществом. Поэтому кристаллография имеет важную инновационную особенность – в этой фундаментальной науке очень часто результатом является именно материал, кристалл, т.е. реальный, осязаемый для потребителя продукт.

Крайне важным является то, что уже в первые годы развития Института кристаллографии была заложена идеология научного развития, базирующаяся на триаде “рост–структура–свойства” и подразумевающая глубокую взаимную связь между этими понятиями. Эта цепочка начала осуществляться А.В. Шубниковым и принесла очень важные и зримые результаты. На первом этапе мы создавали новые кристаллы, технологии роста, развивали фундаментальную науку для обеспечения этих технологий. За несколько десятилетий в Советском Союзе была создана промышленность выращивания кристаллов, одна из самых современных и мощных в мире. Хотелось бы напомнить, что для реализации наших разработок – промышленной технологии выращивания кристаллов кварца большого размера, был создан специальный институт ВНИИСИМС (Всесоюзный научно-исследовательский институт синтеза минерального сырья). Следует упомянуть также институт “Монокристаллреактив” в Харькове, который продолжает успешно использовать и развивать наши разработки, Чернореченский, Кироваканский химкомбинаты, Южноуральский завод “Кристалл”, являющийся крупнейшим производителем пьезокристаллов в мире, и многие другие предприятия. Более 50 разработок Института кристаллографии внедрены на промышленных предприятиях страны и ближнего зарубежья. Это, в частности, технологии получения монокристаллов граната, лейкосапфира, рубина, различных лазерных, нелинейных кристаллов и других. Разработанная в институте технология выращивания лейкосапфира была приобретена крупной иностранной фирмой еще в советское время.

Как уже говорилось, успех в этой научной и промышленной деятельности стал возможен благодаря триединому подходу в кристаллографии: “рост–структура–свойства” кристаллов. Важную роль в этом сыграло СКБ Института кристаллографии, где работало до 500 человек. Все ростовое оборудование на начальном этапе было создано в этом СКБ, а затем внедрено в серийное производство. Начинали с простейших устройств для роста кристаллов из водных растворов, но при переходе

к высокотемпературной кристаллизации с необходимой температурой в тысячи градусов понадобились уже принципиально новые материалы для кристаллизаторов, более сложные системы нагрева, контроля температуры и различных параметров роста – с этими усложняющимися технологиями успешно справлялось СКБ Института кристаллографии.

Развивая классическую кристаллографию, А.В. Шубников заложил основы принципиально нового направления деятельности Института кристаллографии – роста кристаллов, которое продолжается и сегодня. В 1960-е гг. наступил новый этап развития института, когда по инициативе его директора Б.К. Вайнштейна была создана лаборатория белковой кристаллографии. В то время казалось, что развивать в физическом институте биологическое направление абсолютно неактуально. Но в результате был дан толчок развитию целого комплекса направлений исследований: дифракция на цепных молекулах, ее теоретические аспекты, кристаллизация белков, исследование их атомной структуры, вычислительные методы, создание аппаратуры, автоматизация (рис. 3).

Позднее в Институте кристаллографии существенно расширились исследования жидких кристаллов (что тоже тогда казалось несвоевременным и нелогичным). Затем начались исследования органических ленточных пленок, развитие методов молекулярной архитектуры, аналогичных молекулярно-лучевой эпитаксии, которая считается высшим технологическим достижением неорганического материаловедения и позволяет искусственно сформировать любую структуру слой за слоем, атом за атомом [9].

Так, кристаллография, менее чем за 100 лет прошла сложный и интересный путь в своем развитии – от описательной минералогии, через химию, химический анализ, новую линию роста кристаллов, к физике в виде рентгеноструктурного анализа, физического материаловедения, а затем и к биологии, белковой кристаллографии.

Таким образом, первый этап был связан с копированием природных структур и процессов, что заложило основу промышленных технологий искусственного роста кристаллов.

Второй этап включал в себя развитие методов структурного анализа, изучение структуры кристаллов этими методами, и переход к изучению биоорганических кристаллов.

Следующий этап, который мы переживаем в настоящее время, – это качественный переход:

- от кристаллов к неструктурированным средам и живым системам;
- от макрообъектов к микро- и нанообъектам;
- от трехмерных к двумерным и одномерным структурам;



Рис. 3. Белковые кристаллы и их структуры, определенные в Лаборатории белковой кристаллографии ИК АН СССР.

– от дифракции к недифракционным методам, таким как малоугловое рассеяние, полное внешнее отражение и другие.

Методология развития кристаллографии такова, что она прошла путь от подражания природе к искусственному конструированию объектов, не имеющих аналогов в природе. Из узкоспециализированной минералогии она стала сложной междисциплинарной наукой. Суть ее в сочетании возможностей и достижений геологии, химии, физики, а на следующем этапе и биологии – в

этом ее главное методологическое отличие (рис. 4). Сегодня кристаллография переживает качественно новый этап своего развития.

Институт кристаллографии РАН является примером междисциплинарного научного института, и именно в кристаллографии с точки зрения современного материаловедения наглядно виден синергетический результат междисциплинарности.

Такой междисциплинарный подход становится методологией науки XXI в., когда сложение до-

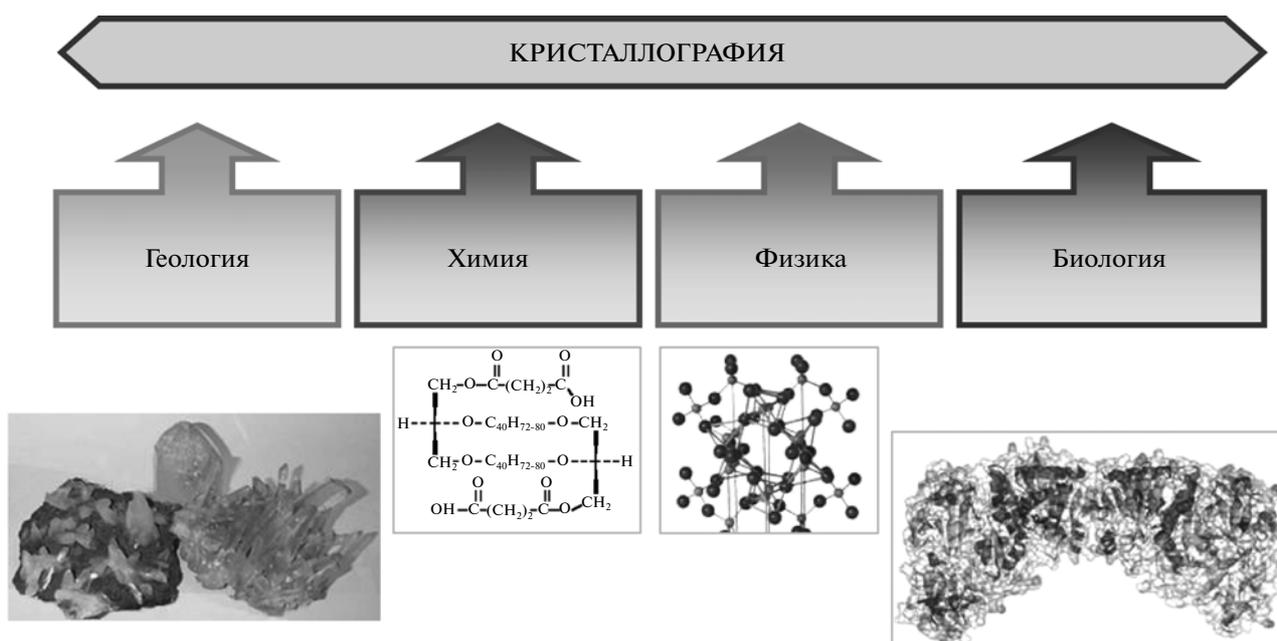


Рис. 4. Кристаллография – междисциплинарная наука.

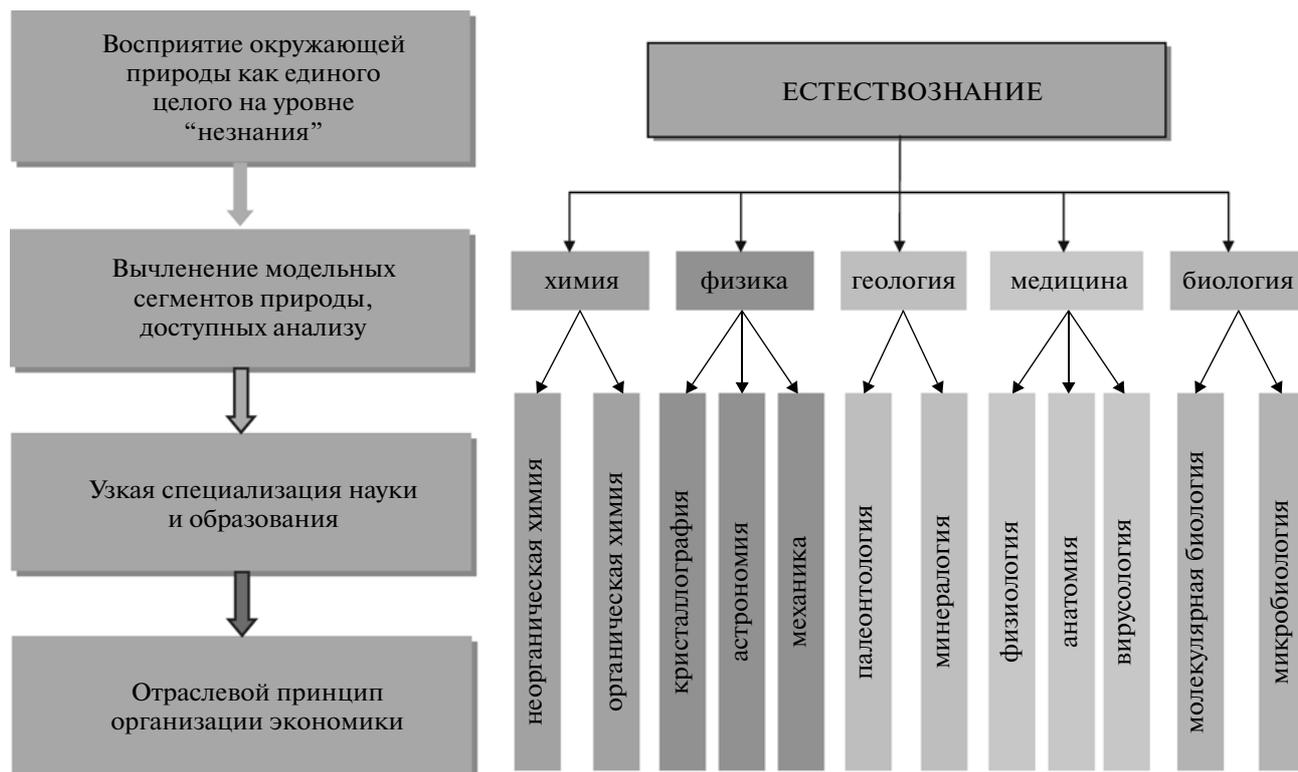


Рис. 5. Этапы познания окружающего мира.

стижений сразу многих дисциплин дает прорыв и принципиально новый результат. Так, классические физико-математические методы на новом этапе развития влились в биологию, “оплодотворив” ее, дали толчок развитию новой науки. Невозможно вырастить требуемый кристалл, не используя кристаллографию, без знания структурного анализа, не используя химию, не понимая симметрии. Сегодня междисциплинарная наука кристаллография отражает изменения парадигмы развития науки от анализа к синтезу.

Природа едина и неделима, в ней нет ни физики, ни химии, ни биологии, а еще 300 лет назад все ученые назывались естествоиспытателями или натурфилософами, как И. Ньютон. По мере роста наших знаний об окружающем мире, усложнения инструментов его изучения, т.е. двигаясь по пути анализа, человек искусственно разделил единое естествознание на сегменты, более доступные для понимания (рис. 5). Таким образом, возникли различные научные дисциплины, специальности, и человечество построило узкоспециализированную систему науки и образования.

Создание такой узкоспециализированной системы науки предопределило отраслевой принцип построения экономики. Существуют тысячи узких специальностей и специалистов, которые

детально знают и понимают собственную предметную область и движутся каждый в своем направлении. Сегодня это, безусловно, магистральный путь развития науки, так как, двигаясь по пути узкой специализации, человечество достигло колоссальных результатов – нам удалось построить современную цивилизацию. Но с другой стороны, мы пришли в тупик, утратив целостность восприятия окружающего нас мира. В чем-то эта ситуация напоминает коробку с перемешанными пазлами, из которых мы должны восстановить глобальную картину мироздания. Собрать эту “картину” сегодня возможно только путем синтеза, на междисциплинарной основе.

Основная парадигма развития науки в XXI в. – это переход от анализа к синтезу новых материалов различной природы [10]. Сегодня человечество, двигаясь по пути синтеза, уже готово к тому, чтобы снова соединить отдельные науки и специальности в единое естествознание, но уже на уровне новых знаний и новых технологических достижений. Путь анализа никуда не исчезнет, но сегодня он отходит на второй план в векторе развития науки. Мы достигли той стадии, когда дальнейшее развитие науки, образования, промышленности возможно только на междисциплинарной основе, конвергенции, взаимопроникновении наук и технологий, ведь сама природа конвергентна по своей сути (рис. 6).

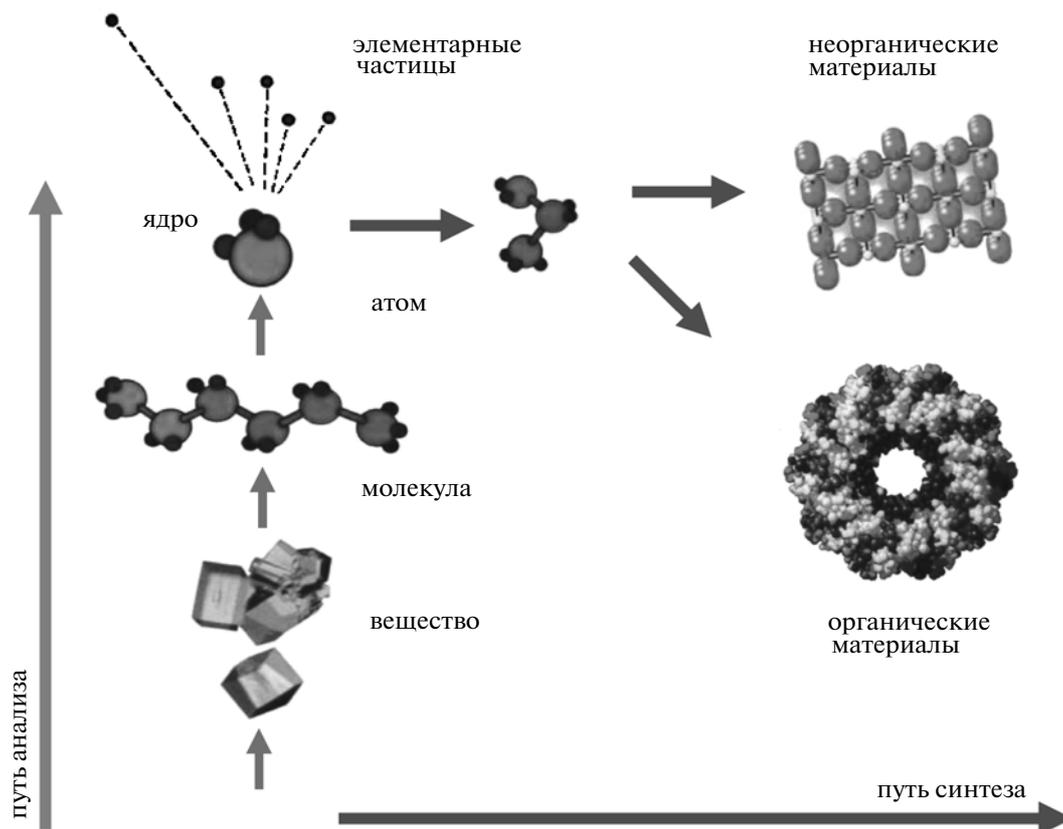


Рис. 6. Изменение парадигмы развития науки от анализа к синтезу.

За прошедшие десятилетия благодаря развитию фундаментальных наук, появлению суперкомпьютеров, применению синхротронного излучения, нейтронов, ядерно-магнитного резонанса удалось расшифровать структуру многих белков, сложных биологических объектов. Сегодня мы имеем уникальную воспроизводимую в любой точке мира технологию твердотельной микроэлектроники и глубокие знания о биологических объектах, из которых состоит живая природа. Именно соединение микроэлектроники как технологической системы с нашими знаниями и пониманием объектов живой природы и есть ключевое направление будущего развития. Его цель – создание гибридных приборов, технологическое воспроизведение живых систем на основе биоорганического материала [11].

Фактически возникающее сегодня биоорганическое и гибридное материаловедение должно повторить в значительной мере путь, пройденный на полупроводниковом этапе развития материаловедения (рис. 7), [12].

Для развития этого нового прорывного направления необходимо, прежде всего, отказаться от отраслевого подхода к формированию науки и технологий и перейти к парадигме конвергенции наук и построению на этой базе принципиально

новых конвергентных технологий. Главной отличительной чертой таких технологий должна быть их максимальная близость к естественным, природным процессам.

О каких науках и технологиях идет речь? Прежде всего, это – нанотехнологии как новая технологическая культура, основанная на возможности прямого манипулирования атомами и молекулами с целью получения принципиально новых веществ, материалов, структур и систем, имеющих наперед заданные свойства. В этом качестве нанотехнологии представляют собой надотраслевую область исследований и технологий, интегрирующую специальные естественнонаучные дисциплины в новое естествознание XXI в. (рис. 8).

На единой материальной основе нанотехнологии возвращают человека к восприятию мира как единого целого и, что особенно важно, дают ему возможность воспроизводить этот мир, пользуясь теми же “технологическими приемами”, что и сама природа [13].

Это, в свою очередь, невозможно без взаимодополняющего сочетания нанотехнологических подходов с достижениями молекулярной биологии, биоинженерии, генной инженерии и т.д. Такой междисциплинарный симбиоз становится

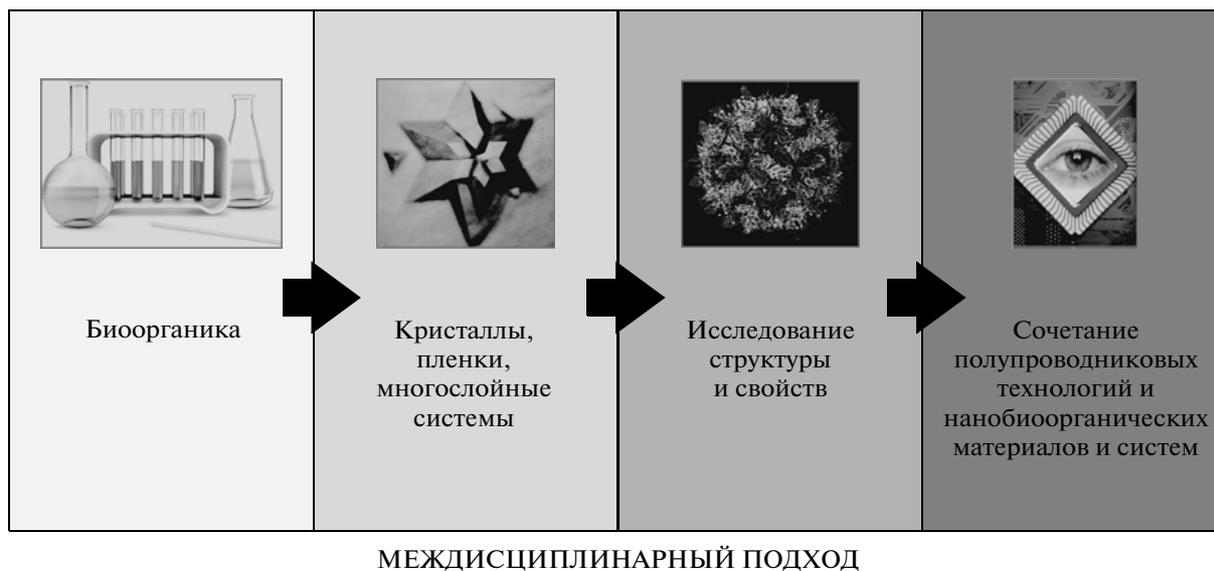


Рис. 7. Нанобиоорганические материалы и технологии.

базой для развития нового класса технологий – нанобиотехнологий.

Однако нанобиотехнологии, обеспечивая возможность искусственного воспроизведения и даже создания принципиально новых биоорганических материалов, не позволяют исследовать и воспроизводить информационные связи, процессы передачи и преобразования информации в объектах и явления живой природы, особенно на высших уровнях ее структурной организации. Для решения этой проблемы необходима конвергенция, слияние нанобиотехнологий и информационных технологий (рис. 9).

Очевидно, что, двигаясь по пути синтеза “природоподобных” систем и процессов, человечество рано или поздно подойдет к созданию антропоморфных технических систем. Решение этих задач возможно только на базе объединения методологии нано-, био-, информационных технологий с подходами и методами когнитивных наук и технологий, изучающих и моделирующих сознание человека, его познавательную деятельность (рис. 10).

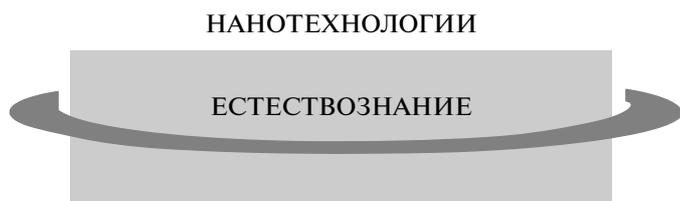
Таким образом, конвергентные, нано-, био-, инфо-, когнитивные науки и технологии – НБИК-технологии позволят создавать антропоморфные технические системы, подобные конструкциям, создаваемым живой природой [14]. Сначала будут разработаны гибридные нано-био-сенсорные системы, затем биоробототехнические системы на основе технологий атомно-молекулярного конструирования и самоорганизации (рис. 11).

В этой связи кристаллография с ее междисциплинарной сущностью будет играть крайне важ-

ную роль в развитии конвергентных наук, прежде всего нанобиотехнологий, нанодиагностики, в том числе с помощью синхротронного излучения. Синхротронное излучение (высокоинтенсивное рентгеновское излучение от циклических ускорителей) благодаря своим уникальным свойствам стало мощным инструментом для исследований и технологий, в частности для диагностики различных материалов и структур. В последние десятилетия во всем мире в развитии исследований с использованием синхротронного излучения произошел гигантский скачок, благодаря чему стало возможным, в частности, конструирование новых наноматериалов и наносистем, совершенствование их структуры и свойств. Можно сказать, что кристаллография, нанонаука и современные синхротронные источники находятся в тесной взаимосвязи. Не случайно первые крупные мировые центры нанотехнологий стали образовываться на базе уже существующих синхротронных источников, например в США при национальных лабораториях.

Открытие первого в нашей стране специализированного Курчатовского источника синхротронного излучения состоялось 1 октября 1999 г. Сегодня Институт кристаллографии РАН многие свои работы ведет на этом источнике, поскольку методы рентгеновской диагностики – это основа современной кристаллографии и материаловедения, а в нанотехнологиях, нанобиотехнологиях такая структурная диагностика становится еще более актуальной [15, 16].

Ренессанс рентгеновского излучения, связанный с появлением и развитием синхротронного рентгеновского излучения, а в последнее время и



Нанотехнологии – первый надотраслевой приоритет, единый (на атомном уровне) фундамент для развития ВСЕХ отраслей новой наукоемкой экономики постиндустриального общества

Рис. 8. Нанотехнологии – новое естествознание.



Рис. 9. Надотраслевые технологии.

рентгеновских лазеров на свободных электронах – это новый вектор развития кристаллографии.

Научные интересы автора на протяжении многих лет были связаны с исследованиями когерентного взаимодействия излучения рентгеновских лучей, с развитием фазочувствительного метода, называемого методом стоячих рентгеновских волн [17, 18].

Как этот метод будет развиваться в будущем? Сегодня мы можем увидеть трехмерную оптическую голограмму. А вскоре на основе фазочувствительных рентгеновских методик, образно говоря, можно будет видеть трехмерное изображе-

ние внутреннего строения материала методом рентгеновской голографии. Это станет переворотом и в кристаллографии, и в материаловедении.

Хорошо известна технология молекулярно-лучевой эпитаксии, или метод молекулярных пучков, где в вакуумный объем выпускаются пучки атомов, а затем последовательно, атом за атомом, можно осадить их на подложку, создавая необходимые конструкции, например сверхрешетки и гетероструктуры. Такой же способ существует в органике – это метод Ленгмюра–Блоджетт. Сегодня возможно, целенаправленно манипулируя атомами, создавать необходимый материал, в том числе биоорганический, с заранее заданными

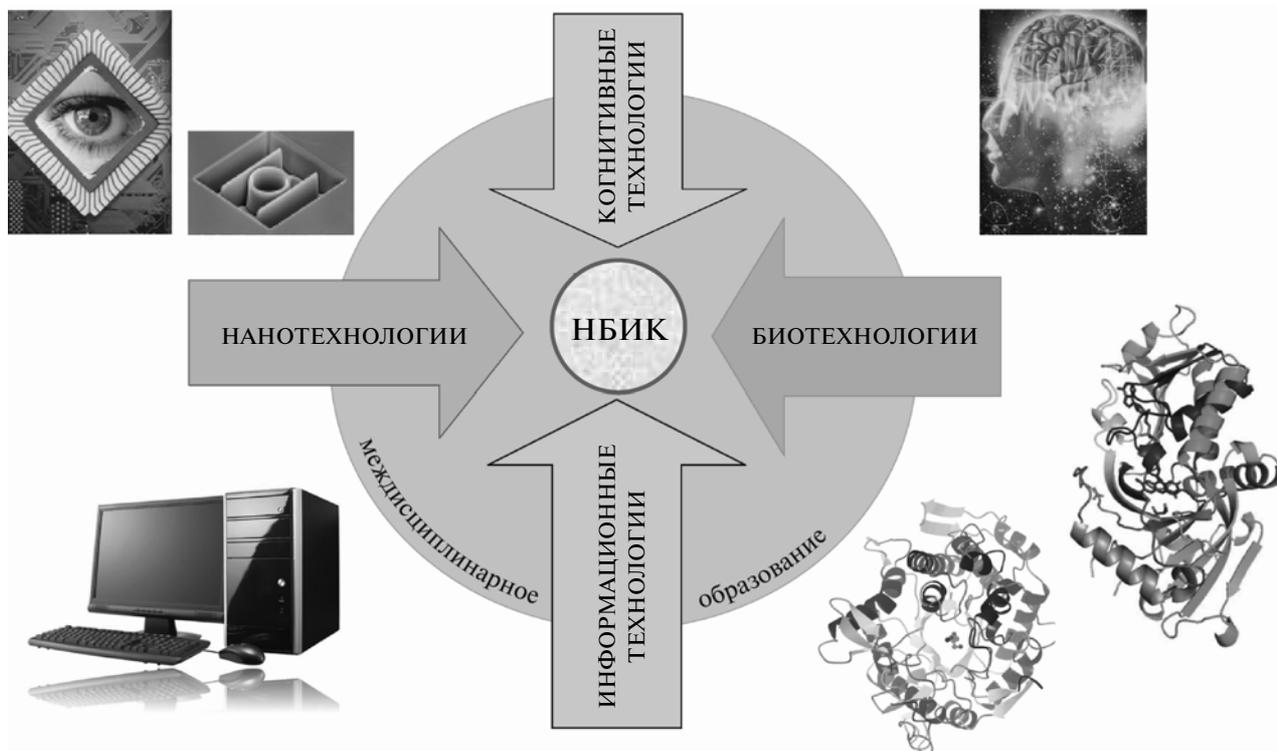


Рис. 10. Конвергенция наук и технологий.

Основная цель развития науки и техники  
индустриального общества –  
ИЗУЧЕНИЕ “УСТРОЙСТВА” И ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
ЧЕЛОВЕКА И ИХ КОПИРОВАНИЕ В ВИДЕ  
МОДЕЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

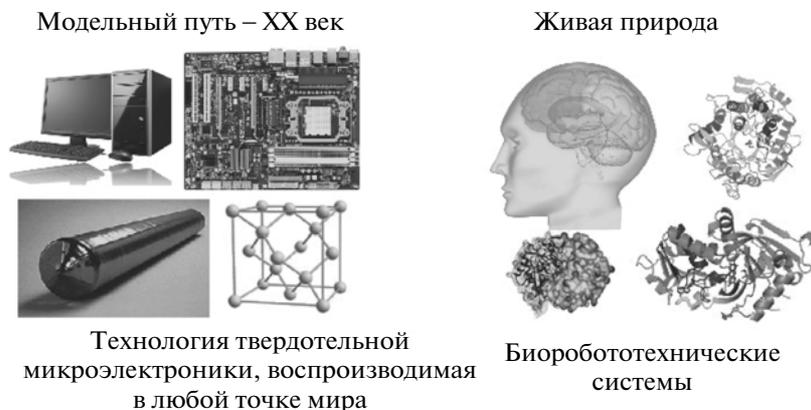


Рис. 11. Технологии атомно-молекулярного конструирования.

свойствами — это и есть нанотехнологии, нанобиотехнологии [19].

XX в. был веком упорядоченных материалов, кристаллов, структур и рентгеновской дифракции как метода их изучения и контроля. Сегодня мы переходим к неупорядоченным, слабоупорядоченным, а точнее — к разупорядоченным материалам, которые конструируются с помощью нанотехнологий (рис. 12).

До недавнего времени мы и наши технологии находились в определенном диапазоне длин волн — микроволновый диапазон, инфракрасный, видимый свет, ультрафиолетовый спектр. Также мы двигались в сторону миниатюризации объектов, схем, предметов и дошли в итоге до микроразмера интегральной схемы. Теперь мы переходим от видимых объектов живой природы к невидимым, к размеру атомов, на ангстремный уровень. Соответственно вся диагностика перемещается в сторону использования жесткого, коротковолнового рентгеновского излучения.

Осуществляется переход к биоорганике, объекты которой слабо упорядочены, к манипуляциям на биологических и биоорганических объектах, к наноразмеру, а значит необходимо кардинальное изменение диагностики, технологий, подходов и даже научного менталитета.

Таким образом, основные тенденции развития науки сегодня — это:

- переход к наноразмеру (технологии атомно-молекулярного конструирования);
- междисциплинарность научных исследований;
- сближение органического (живой природы) и неорганического миров.

В этой связи современный Институт кристаллографии РАН (ИК РАН) является уникальным в своем роде: будучи институтом физического профиля и развивая уникальные физические методики, мы занимаемся в значительной степени и биологией. Мы один из немногих в стране междисциплинарных институтов, в котором отдельные научные направления не просто развиваются, а органически объединены и дают синергетический эффект. В последние годы из нескольких десятков научных направлений мы сформировали три приоритетных:

- нано- и биоорганические материалы: получение, синтез, структура, свойства, методы диагностики на основе рентгеновского и синхротронного излучения, электронов, нейтронов и зондовой микроскопии;
- фундаментальные аспекты образования кристаллических материалов и наносистем, их реальная структура и свойства;
- новые кристаллические и функциональные материалы.

В этих трех приоритетах отражается полная преемственность нашего научного опыта, традиций, но уже ориентированных на новые направления развития науки.

В ряду современных научных достижений института упомянем здесь лишь некоторые: результаты по рентгеновской диагностике многослойных систем с наноразмерными слоями [20], по рентгеновской томографии [21], управлению рентгеновским пучком с помощью рентгеноакустических взаимодействий [22], по белковой кристаллографии [23], нанокапсулированию для целевой доставки лекарств [24], по изучению белко-

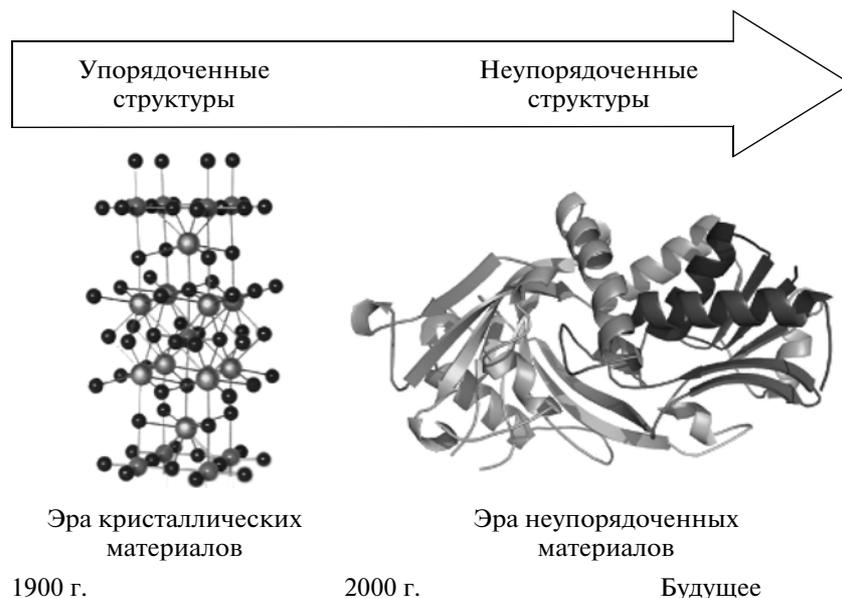


Рис. 12. Эра разупорядоченных материалов.

во-липидных систем с помощью рентгеновских методов [25], композитов на основе бактериальной целлюлозы [26] и др. В области исследований физических свойств получены интересные данные по изучению сверхтонких сегнетоэлектрических пленок для одного монослоя [27], а также важные результаты по созданию лазерных элементов на базе жидкокристаллических сред [28]. Хотелось бы отметить работы по изучению углеродных нанотрубок [29], которые можно использовать в качестве высокотемпературного контейнера для создания одномерных кристаллических элементов, контролируя процесс кристаллизации внутри трубки с помощью электронного микроскопа. Следует упомянуть результаты по созданию и изучению сегнетоэлектрических доменных структур [30] (при этом атомно-силовая микроскопия используется и как технологический инструмент). Еще один важный результат – создание при высоких давлениях уникального энергонасыщенного материала – полимерного азота. Обладая экстремально высокой плотностью запасенной химической энергии, этот материал является абсолютно экологически чистым топливом, может “гореть” под водой, в вакууме и любых средах без потребления кислорода [31].

Сейчас совместно с Курчатовским институтом и немецкими коллегами на синхротронном источнике PETRA-3 (Гамбург) разворачивается новый проект по созданию специальной станции для исследования различных веществ в экстремальных условиях. Эта станция позволит изучать образцы в камерах с алмазными наковальнями при высоких давлениях мегабарного диапазона с одновременным лазерным нагревом до несколь-

ких тысяч градусов, т.е. будем иметь широкий диапазон температур и давлений и сверхяркое синхротронное излучение для продолжения исследований на новом уровне.

Мы продолжаем сохранять и развивать все ростовые направления: высокотемпературную горизонтальную кристаллизацию, различные модификации метода Чохральского, газопламенный метод Вернейля, методы гидротермального синтеза и водорастворной кристаллизации.

Водорастворная кристаллизация очень важна и сегодня, во-первых, для поиска новых кристаллических материалов, а во-вторых, для развития белковой кристаллографии, так как здесь действует аналогичная белкам диффузионная схема роста, нет сильного температурного градиента. Поэтому, используя водорастворную кристаллизацию, мы активизируем деятельность по изучению особенностей процессов при кристаллизации биологических материалов.

Отмечу еще одну важную работу, касающуюся разработки новых “солнечно-слепых” кристаллов сульфатов, которые являются оптическими фильтрами УФ-диапазона. Прибор на основе таких кристаллов имеет колоссальную чувствительность и “видит” УФ-источник за десятки километров. Это может быть использовано как для военных применений, так и для наблюдения за появлением коронного разряда на высоковольтных линиях [32] (рис. 13).

Говоря о наших новых технологических возможностях, следует упомянуть созданную технологическую линию, которая позволяет осуществить многоступенчатую цепочку обработки кристаллических подложек. Это дает возмож-

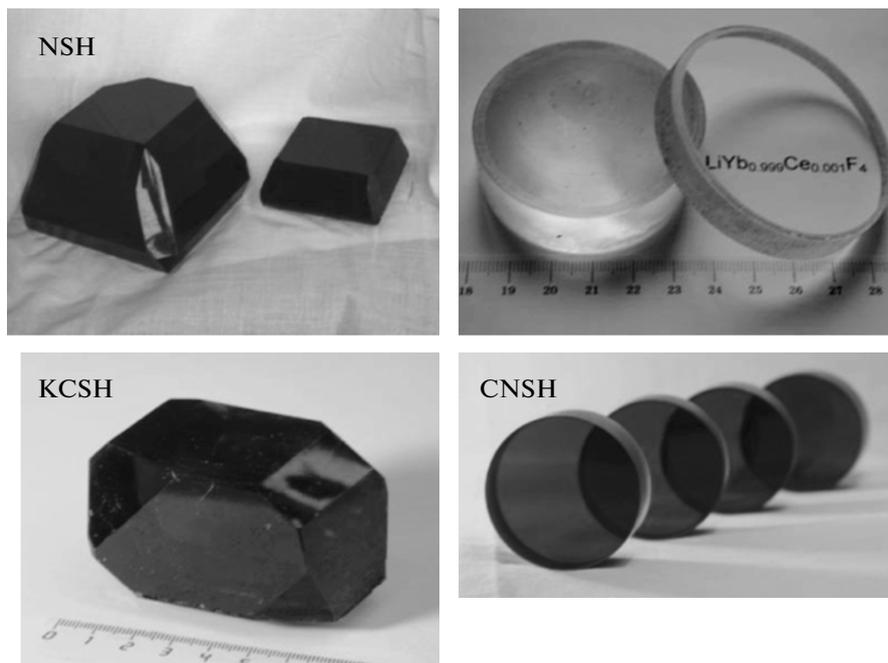


Рис. 13. Оптические фильтры УФ-диапазона.

ность обрабатывать технологии изготовления готовых пластин (подложек), включая подложки с нанорельефом на поверхности, например пластины сапфира для светодиодов, который позволяет выращивать эпитаксиальные структуры без буферного слоя [33].

Уже говорилось о важной роли СКБ института, которое создало множество сложных приборов, без которых было бы невозможным развитие многих направлений. Сюда относятся и большинство экспериментальных станций, которые действуют сейчас на синхротроне в Курчатовском институте, включая уникальные системы, например блоки монохроматизации, зеркала и гониометры (рис. 14). Однако если раньше мы выпускали широкий диапазон сложного оборудования в основном из-за отсутствия альтернативы, так как готовое оборудование купить было практически невозможно, то сегодня ситуация в корне изменилась. Массовый выпуск оборудования уже не имеет смысла, надо разрабатывать лишь уникальные системы. Поэтому закономерно, что число сотрудников, работающих в СКБ, значительно сократилось.

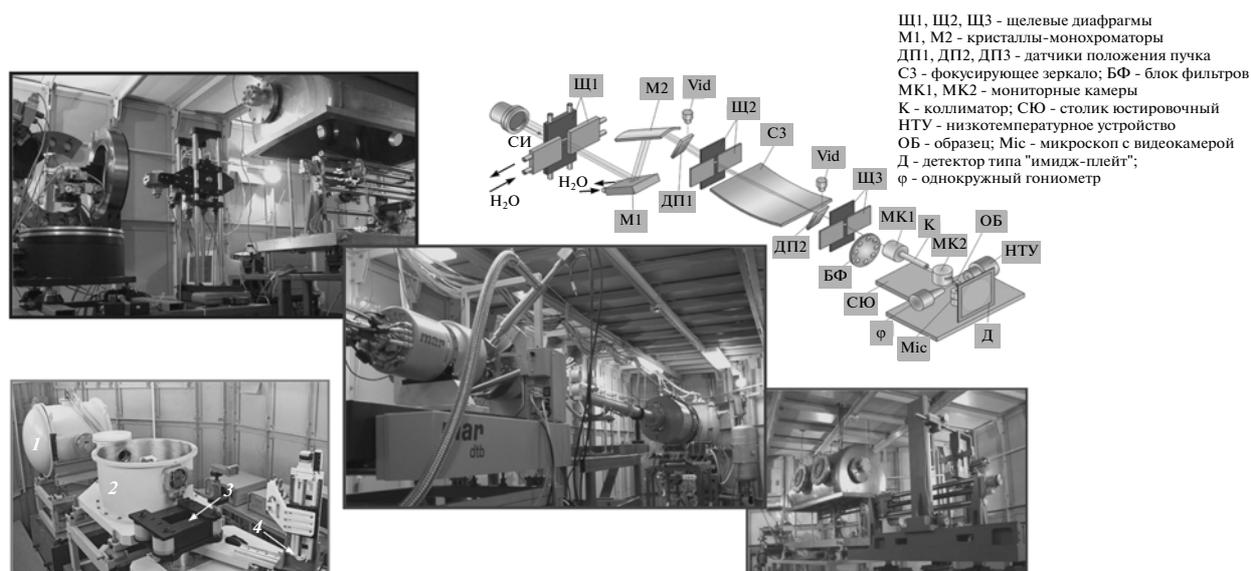
Направление, связанное с кристаллизацией белков в космосе, мы начали развивать одни из первых в мире еще в 1970-х гг. Тогда мы устанавливали кристаллизаторы для выращивания кристаллов из раствора на космический аппарат “Салют-5”, где был выращен первый кристалл алюмокалиевых квасцов. В этих работах также участвовал наш филиал – “Центр космического материаловедения”, находящийся в Калуге, где

активно реализовывалась программа по кристаллизации полупроводников в условиях невесомости. С 2001 г. мы возобновили проект по кристаллизации биологических объектов на Международной космической станции (МКС), разработали и создали новое поколение кристаллизационной аппаратуры и провели целый ряд успешных экспериментов по кристаллизации белков в условиях микрогравитации.

В основе кристаллизации биологических объектов лежит диффузионный процесс. А при переносе этого процесса в условия невесомости, где гравитация на несколько порядков ниже, чем на Земле, мы получаем кристаллы белков большего размера и лучшего качества (рис. 15).

В последние годы благодаря поддержке Министерства образования и науки РФ, Российской академии наук удалось значительно обновить нашу приборную базу. Сегодня мы имеем полный комплекс самого современного рентгеновского оборудования, а в сочетании с возможностями специализированного источника синхротронного излучения в Курчатовском институте обладаем всем спектром рентгеновских методов. То же относится и к микроскопии – мы владеем всеми методами исследований с помощью электронной и зондовой микроскопии.

Очевидно, что новые задачи и приоритеты требуют и новой научной, административной структуры Института кристаллографии РАН. На Ученом совете ИК РАН было принято решение о модернизации устаревшей структуры Института



**Рис. 14.** Исследовательские станции для Курчатовского центра синхротронного излучения: ПРО (прецизионной рентгеновской оптики), Белок (белковой кристаллографии), РТ-МТ (рентгеновской топографии и микротомографии), Ленгмюр.

путем реорганизации отделений с большим количеством мелких лабораторий в отделы, созданные под наши научные приоритеты. Это отдел рентгеновских и синхротронных исследований, отдел электронной кристаллографии, отдел ядерных методов и магнитных структур, отдел кристаллофизики, отдел роста кристаллических материалов, отдел поисковых ростовых технологий, отдел теоретических исследований и отдел мембранных технологий (рис. 16). Кроме того, у нас имеются Филиал в Калуге, Центр коллективного пользования, Научно-образовательный центр и опытно-экспериментальный отдел (СКБ).

Изменился и кадровый состав Института. В 1970 г. у нас было максимальное количество сотрудников 1500 человек, в конце 1990-х гг. численность была почти в два раза меньше – 780 человек, а на сегодня она составляет 522 человека.

В Институте сейчас работает 19 молодых кандидатов наук в возрасте до 35 лет. Мы активизировали работу Совета молодых ученых и специалистов. Эту линию на омоложение научных кадров мы будем поддерживать и развивать.

Примечательна статистика по публикациям. При том условии, что количество сотрудников уменьшилось за пять лет приблизительно на 90 человек, количество статей и обзоров осталось на том же уровне и даже слегка увеличилось, а число докладов на конференциях выросло существенно. В итоге в ИК РАН за пять лет вышло более полутора тысяч статей, пятьдесят обзоров, восемь монографий, действует сорок шесть па-

тентов. В последние годы получено 38 патентов и подано 15 заявок. Рост числа патентов свидетельствует о начавшемся росте инновационной активности.

Вопрос особой важности – приток молодых кадров, это серьезная проблема для многих российских и зарубежных научных институтов. В самом начале 1950-х гг. существовали кафедра кристаллофизики, основанная А.В. Шубниковым на физфаке МГУ им. М.В. Ломоносова, и кафедра кристаллохимии на геологическом факультете МГУ. После смерти А.В. Шубникова кафедра кристаллофизики была преобразована, со временем произошло “распыление”, дублирование кристаллографических тематик. С 2005 г. при поддержке руководства МГУ нам удалось создать кафедру физики наносистем на физическом факультете – кафедру принципиально нового междисциплинарного типа. Сейчас там обучается 24 студента и 3 аспиранта.

Также у нас работает совместный с Нижегородским исследовательским университетом Научно-образовательный центр “Создание и диагностика кристаллических, нано- и неорганических материалов” и Российско-Германский научно-образовательный центр на базе Санкт-Петербургского университета.

Диссертационный совет ИК РАН – фактически единственный, который имеет право присуждать степень по физико-математическим и химическим наукам по специальности 01.04.18 “кристаллография и кристаллофизика”.



Рис. 15. Кристаллизация в космосе в 2000-х гг.

Уже третий год мы проводим Высшие курсы стран СНГ для молодых ученых СИН – НАНО (синхротрон-нейтрон-нанотехнологии) совместно с Курчатовским институтом и Объединенным институтом ядерных исследований (Дубна) при поддержке Межгосударственного фонда гуманитарного сотрудничества. Это мероприятие с каждым годом набирает обороты, увеличивается число участников, проявляется большой интерес и внимание со стороны образовательных структур стран СНГ.

Сегодня у нас действует несколько десятков международных соглашений. Прежде всего, это Российско-Германская лаборатория, в рамках которой создана экспериментальная станция на синхротроне BESSY. Эта станция продолжает успешно работать, и мы имеем на ней уникальные возможности для спектроскопических исследований.

Россия стала ключевым партнером в глобальном международном проекте Европейского рентгеновского лазера на свободных электронах XFEL, который строится в Гамбурге. Наряду с Германией Россия является ведущим участником этого проекта и по научному участию, и по финансовому вкладу. Институт кристаллографии РАН, как и Курчатовский институт, играет ведущую роль в подготовке научной программы исследований.

Хотелось бы отметить еще несколько проектов, в которых участвует ИК РАН: Российско-Финский проект по органическим наносистемам, Российско-Германское сотрудничество в области фотонных наук по созданию экспериментальных

станций в рамках Межправительственного соглашения, Российско-Японская космическая программа по кристаллизации белков на МКС.

Более семи лет на базе ИК РАН работает Национальная контактная точка рамочных программ Европейского Союза.

Ежегодно мы проводим научные чтения памяти наших “отцов-основателей” академиков А.В. Шубникова, Б.К. Вайнштейна и Н.В. Белова. Их именные премии присуждаются на ежегодном институтском конкурсе научных работ, включая премию молодым сотрудникам за междисциплинарные исследования.

Мы были инициаторами возобновления на базе Института на регулярной основе Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (РСНЭ), а также Национальной конференции по росту кристаллов (НКРК). Они проводятся попеременно, каждые два года.

Совместно с рядом академических институтов проводится конференция по электронной микроскопии и симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Кроме того, мы регулярно проводим конференцию по космическому материаловедению в Калуге.

Институт ежегодно участвует в различных выставках. На базе существующего в нашем Институте Музея академика Н.В. Белова мы фактически создали Музей советской, а теперь российской кристаллографии.



Рис. 16. Структура Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН.

Благодаря усилиям всего коллектива Института кристаллографии, активной поддержке Министерства образования и науки РФ, Российской академии наук, сотрудничеству с другими научными институтами, прежде всего Национальным исследовательским центром “Курчатовский институт”, за последние пять лет нам удалось фактически создать новый Институт кристаллографии. Мы выстроили четкие перспективные научные приоритеты, практически полностью обновили материальную базу и исследовательскую инфраструктуру Института. Можно с уверенностью сказать, что создан серьезный задел для успешного развития нашего Института и российской кристаллографии в целом на долгую перспективу.

Статья написана по материалам доклада на Ученом совете Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН 12 мая 2010 года и выступления на бюро Отделения физических наук РАН 2 июня 2010 года.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “Нобелевские премии” – Лауреаты Нобелевской премии. Энциклопедия в 2-х т. М.: Прогресс, 1992.
2. Вайнштейн Б.К. Структурная электронография. М.: Изд-во АН СССР, 1956.
3. Вайнштейн Б.К. Дифракция рентгеновских лучей на цепных молекулах. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
4. Вайнштейн Б.К. Современная кристаллография. В 4-х т. М.: Наука, 1979.
5. Ковальчук М.В., Кон В.Г. // Успехи физических наук. 1986. Т. 149. Вып. 1. С. 69.
6. Kovalchuk M.V., Kazimirov A.Yu., Zheludeva S.I. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1995. № 101. P. 435.
7. Ковальчук М.В., Желудева С.И., Носик В.Л. // Природа. 1997. № 2. С. 54.
8. Афанасьев А.М., Желудева С.И., Захаров Б.Г. и др. // Кристаллография. 2003. Т. 48. № 6. С. S7.
9. Ковальчук М.В. // Кристаллография. 2003. Т. 48. № 6. С. S5.
10. Ковальчук М.В. // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 6. С. 967.
11. Ковальчук М.В. // Научные проблемы национальной безопасности. Вып. 3: К 10-летию образования Совета Безопасности Российской Федерации. М., 2002.
12. Ковальчук М.В. // Вестн. РАН. 2003. Т. 73. № 5. С. 405.
13. Ковальчук М.В. Идеология нанотехнологий. М.: ИКЦ Академкнига, 2010.
14. Ковальчук М.В. // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6. № 1–2. С. 13. (Препринт ИАЭ-6638/9, М., РНЦ “Курчатовский институт”, 2010).
15. Ковальчук М.В. // сб. Пути Ученого. Е.П. Велихов / Под ред. Смирнова В.П. М.: РНЦ “Курчатовский институт”, С. 513.
16. Рязанов А.И., Ковальчук М.В., Мухамеджанов Э.Х., и др. // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. Вып. 1(7). С. 128.
17. Vartanyantz A., Kovalchuk M.V. // Rep. Prog. Phys. 2001. V. 64. P. 1009.
18. Афанасьев А.М., Зозуля А.В., Ковальчук М.В., Чуев М.А. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75. Вып. 7–8. С. 379.
19. Ковальчук М.В., Клечковская В.В., Фейгин Л.А. // Природа. 2003. № 11. С. 11.

20. Васильев А.Л., Васильевский И.С., Галиев Г.Б. и др. // Кристаллография. 2011. Т. 56. № 2. С. 329.
21. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Золотов Д.А. и др. // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 1. С. 167.
22. Благов А.Е., Ковальчук М.В., Писаревский Ю.В., Просеков П.А. // Кристаллография. 2008. Т. 53. № 3. С. 411.
23. Timofeev V.I., Chuprov-Netochin R.N., Samigina V.R. et al. // Acta Cryst. F. 2010. V. 66. P. 259.
24. Букреева Т.В., Парахонский Б.В., Марченко И.В. и др. // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 1.
25. Zheludeva S.I., Novikova N.N., Kovalchuk M.V. et al. // Crystallography Reports. 2009. V. 54. № 6. P. 920.
26. Волков В.В., Клечковская В.В., Штыкова Э.В. и др. // Кристаллография. 2009. Т. 54. № 2. С. 197.
27. Bune A.V., Fridkin V.M., Ducharme S. et al. // Nature. 1998. V. 391. P. 26.
28. Палто С.П., Штыков Н.М., Барник М.И., Уманский Б.А. // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 2. С. 313.
29. Kiselev N.A., Zakalyukin R.M., Zhigalina O.M. et al. // J. Microscopy. 2008. V. 232. Pt. 2. P. 335.
30. Volk T.R., Simagina L.V., Gainutdinov R.V. et al. // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 042010.
31. Trojan A., Eremets M.I., Medvedev S.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 091907.
32. Гребенев В.В., Григорьева М.С., Волошин А.Э. // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 5. С. 940.
33. Прохоров И.А., Захаров Б.Г., Асадчиков В.Е. и др. // Кристаллография. 2011. Т. 56. № 3. С. 515.