

Созидание «лестницы» химического образования

Интервью с академиком РАН В.В.Луниным

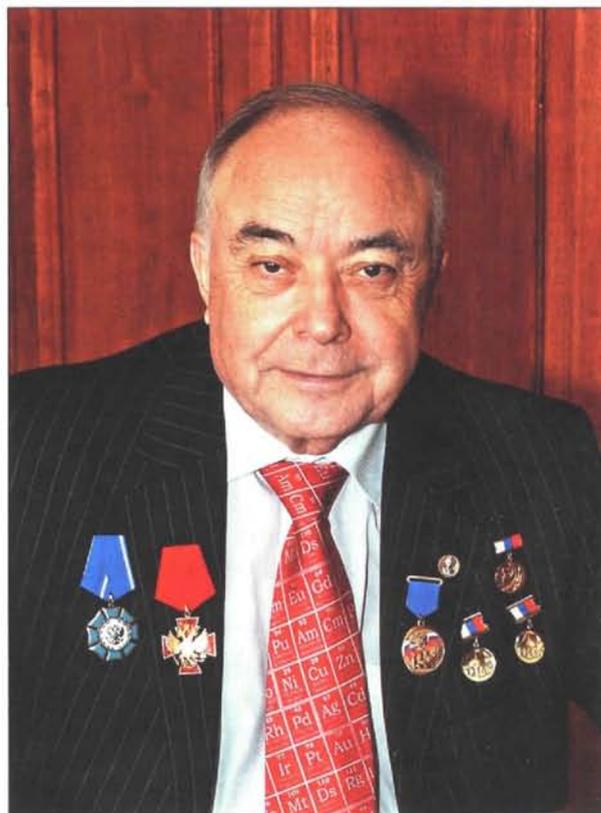
Химический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

Одна из целей Международного года Периодической таблицы химических элементов заключается «в развитии образования в области фундаментальных наук», что созвучно чаяниям Д.И.Менделеева: на рубеже 19-го и 20-го столетий он подробно изложил, как нужно «мести лестницу образования». О некоторых современных особенностях этой сложной, непрерывной, многоступенчатой работы редактору «Природы» рассказал президент химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, академик В.В.Лунин.

Валерий Васильевич, очевидно, провозглашение Организацией объединенных наций Международного года Периодической таблицы химических элементов в 2019 г. — не только дань уважения первооткрывателю периодического закона и высокая оценка заслуг современного естественнонаучного сообщества, но и поиск объединяющего начала, позволяющего всем миром преодолевать некие проблемы, связанные с развитием химии?

Должен сказать, что сегодня и в странах Европы, и на Американском континенте химия, к сожалению, не очень привлекает молодых людей, поступающих в вузы. Это в значительной степени следствие хемофобии, существующей в обществе. Между тем для развития перспективных научных направлений в нашу сферу должны приходить молодые специалисты, и решение задачи мы с коллегами видим прежде всего в развитии системы образования.

Выбор темы Международного года ООН, разумеется, не случаен. Мы хотели бы напомнить людям о фундаментальном законе природы, познание которого изменило мир. В 2016 г. Международный союз теоретической и прикладной химии утвердил официальные названия трех новых сверхтяжелых элементов — московий, теннессин, оганесон, — полученных в лаборатории ядерных исследований имени Г.Н.Флёрова Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне, и в ознаменование столь важного события в марте 2017 г. в Москве в Центральном доме ученых РАН состоялась торжественная церемония с участием исследователей из России, США, Великобритании, Японии. Тогда впервые была озвучена идея посвятить



В.В.Лунин.

2019 год периодическому закону химических элементов. Затем предложение Российского химического общества имени Д.И.Менделеева поддержали 79 крупнейших химических научных обществ разных стран.

Названия новых химических элементов свидетельствуют о большом уважении мирового научного сообщества к достижениям российской химической науки: 115-е место в Периодической таблице занял московий (*Moscovium, Mc*), 118-м стал элемент оганесон (*Oganesson, Og*), который носит имя научного руководителя лаборатории ядерных исследований академика Юрия Цолаковича Оганесяна*. Напомню, что в Периодической таблице

* Международный союз теоретической и прикладной химии рекомендовал назвать 118-й элемент в честь академика Ю.Ц.Оганесяна за новаторский вклад ученого в исследование сверхтяжелых элементов.

химических элементов научный вклад России олицетворяют также названный в честь нашей страны — рутений (*Ruthenium, Ru*) с атомным номером 44, менделевий (*Mendelevium, Md*) с атомным номером 101 и 105-й элемент дубний (*Dubnium*) — его название напоминает о городе физиков Дубне. В этом ряду естественный элемент лишь один — рутений, описанный в 1844 г. профессором химии и ботаники Казанского университета Карлом Карловичем Клаусом, остальные элементы получены посредством ядерного синтеза.

Язык химии интернационален. Ежегодно в мире синтезируют порядка тысячи новых химических соединений, название каждого из них (так же, как и имена новых химических элементов) согласовывается с Международным союзом теоретической и прикладной химии (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC). Так поддерживается единство химического сообщества. В 2019 г. Московский университет и издательство «Энциклопедия» выпустили учебное пособие «Энциклопедический словарь. Химические элементы»*, в котором приведены исчерпывающие сведения обо всех элементах Периодической таблицы с 1-го по 118-й номер. Я надеюсь, что эта книга будет переведена на английский язык к XXI Менделеевскому съезду по общей и прикладной химии, который состоится в сентябре 2019 г. в Санкт-Петербурге.

Какие шаги, по Вашему мнению, нужно предпринимать сегодня в сфере отечественного химического образования для того, чтобы талантливые молодые люди могли найти себя в науке?

В нашей стране в общеобразовательной программе средней школы ученики 10–11-го классов изучают химию один час в неделю — неудивительно, что у школьников нет мотивации к освоению этого предмета. И только благодаря энтузиазму отдельных учителей появляются дети, которые хотят заниматься химией. Мы находим их, в частности, благодаря школьным олимпиадам всех уровней. Московский университет обязательно курирует проведение заключительных туров Всероссийской олимпиады школьников. Ее призеры, поступая на химический факультет, успешно проходят дополнительные испытания и становятся нашими студентами. В 2018 г. на химфак поступили 71 победитель и 100 призеров олимпиад высокого уровня — это более половины первого курса.

В конце 2018 г. я представил министру науки данные об успехах школьников на Всемирной олимпиаде по химии за последние 10 лет: из 40

российских участников 27 стали золотыми призерами, 12 — серебряными и один — бронзовым. Российская делегация всегда в пятерке лучших команд мира по химии среди представителей 79 государств; принимают же участие в олимпиаде порядка 320–330 человек. Министр науки и высшего образования и министр просвещения должны понимать, что это многолетнее лидерство не случайно, за победами ребят — большая работа тех, кто растит юных химиков. И конечно, школьным педагогам и университетским преподавателям, со своей стороны, хотелось бы видеть в профильных министерствах людей компетентных, что на протяжении последних лет получалось, увы, не всегда. Например, несколько лет назад один из министров образования и науки РФ, произнося речь в МГУ, пожаловался, что зря учил химию: это ему совершенно в жизни не пригодилось, «лучше бы выучил второй язык».

В 2016 г. отражением полного непонимания сути естественнонаучного образования стала идея Министерства образования и науки РФ отказаться от предметного обучения в школе: предполагалось ввести предмет «естествознание», который заменил бы собой физику, химию, биологию. Экспертам, приглашенным к участию в разработке новой концепции обучения, пришлось приложить титанические усилия для того, чтобы объяснить министерским чиновникам: не может быть учителя, который сумел бы читать сразу три предмета. От абсурдной идеи отказались, хотелось бы надеяться, что возврата к этому не будет.

Очень важно правильно оценивать значение олимпиадного движения: ведь это не просто соревнование. 21–28 апреля 2019 г. в 53-й раз состоится Международная Менделеевская олимпиада школьников по химии — единственная из числа всесоюзных олимпиад, сохраненная нами после распада Советского Союза. Все национальные химические общества стран СНГ подписали обращение к правительствам своих государств и получили их согласие на объявление Менделеевской олимпиады Международной олимпиадой стран СНГ и Балтии. Отвечая на Ваш вопрос о том, как идти навстречу талантливым молодым людям, подчеркну: настоящее стремление к научным знаниям не знает границ, поэтому некогда единое образовательное пространство должно сохраниться. И нам удалось даже расширить его.

До 1998 г. Менделеевская олимпиада школьников по химии проводилась только в России (в г. Пущино и в Москве). В 1997 г. я предложил президенту Армении Л.А. Тер-Петросяну провести следующее состязание юных химиков в Ереване, и он согласился. Тогда только закончилась война между Арменией и Азербайджаном, в 1998 г. впервые после долгого перерыва включили свет в до-

* Лукин В.В., Леонсон И.А., Дроздов А.А., Степанов Н.Ф., Бердоносов С.С. «Энциклопедический словарь. Химические элементы». М.: Энциклопедия, 2019.

мах. И все же в ереванской школе имени А.С.Пушкина собрались школьники на Менделеевскую олимпиаду. На следующий год ребята отправились в Киргизию, и олимпийскую встречу курировал президент страны Аскар Акаевич Акаев (ныне профессор механико-математического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова). А дальше Менделеевская олимпиада пошла путешествовать по всем столицам бывшего Советского Союза.

Спустя несколько лет после начала олимпиадного движения СНГ и Балтии к нему присоединились Болгария, Венгрия, Румыния, Македония, с 2012 г. в состязаниях по химии участвуют школьники из Саудовской Аравии, Турции, Кувейта, Израиля. В 2015 г. в олимпиадное движение вернулась Грузия. В 2017 г. на Менделеевской олимпиаде встретились школьники из 22 стран, и в их рядах впервые были юные химики из Монголии и Хорватии.

По существу, Менделеевская олимпиада школьников по химии служит не только целям просвещения молодых людей и объединения профессионального сообщества, де-факто она стала инструментом дипломатии, ведь такие встречи очень важны для сохранения нормальных, доверительных отношений между людьми разных стран и помогают развитию научных связей, правда?

Конечно. В этом контексте не могу не вспомнить 50-ю Менделеевскую олимпиаду школьников, которая состоялась в 2016 г. в Москве: накануне события в наш организационный комитет обратились учителя Украины с просьбой об участии призеров национальной олимпиады страны в международном состязании юных химиков. Это было очень важно, прежде всего для детей, желавших испытать себя, оценить свой собственный уровень подготовки. Если заглядывать чуть дальше, то расширять олимпиадное движение школьников по химии необходимо и для повышения уровня нашего отечественного образования, без чего невозможно решение новых интеллектуальных задач в области естествознания. Министр образования и науки Украины отказал нам в участии украинских школьников, и тогда их родители собрали и внесли необходимые средства, благодаря чему ребята приехали с двумя профессорами Киевского университета и успешно участвовали в Международной Менделеевской олимпиаде по химии.

В чем отличие Международной Менделеевской олимпиады школьников по химии от Международной химической олимпиады (International Chemistry Olympiad)?

Официальные языки Менделеевской олимпиады — русский и английский. (К слову сказать,

во многих странах СНГ по мере расширения ее географии вновь открылись русскоязычные школы.) Особенность Международной (всемирной) химической олимпиады в том, что от каждой страны в этом соревновании школьников могут участвовать только четыре человека. Согласно положению о Менделеевской олимпиаде, количество участников от каждой из стран определяется пропорционально численности бывших союзных республик: так, Россия выдвигает 10 человек, Украина и Казахстан — по восемь, остальные государства-участники присылают по четыре человека (если хотят расширить свою команду, то нужно перечислить денежный взнос за дополнительных участников).

На Всемирную химическую олимпиаду приезжают свыше 300 школьников, и этот масштаб пока недостижим для Менделеевской олимпиады, так как в большинстве городов СНГ, где она проводится, технически сложно организовать экспериментальный тур для большого числа участников. В Москве это вполне возможно, и мы трижды проводили здесь Всемирную олимпиаду — в 1996, 1997, 2013 гг., а в 2015 г. она состоялась в столице Азербайджана на базе филиала МГУ имени М.В.Ломоносова в Баку.

В 2019 году оргкомитет Менделеевской олимпиады школьников по химии при финансовой поддержке благотворительного фонда Андрея Мельниченко выпускает сборник задач экспериментальных туров за последние 20 лет, прекрасно сознавая, что лабораторная работа — единственное уязвимое место российских ребят. Это неудивительно, если учесть, что в большинстве школ лабораторные кабинеты закрылись и ученикам нелегко формировать соответствующие навыки. Что же касается теоретических туров олимпиады, наши дети — лучшие.

Возвращаясь к вопросу о вовлечении молодых людей в сферу фундаментальных исследований: как на химическом факультете МГУ организована специализация студентов?

Наша принципиальная позиция состоит в том, что человеку надо дать возможность реализовать себя, и для этого дается время. Химический факультет отличается, к примеру, от физического факультета МГУ тем, что у нас нет строгого прикрепления к кафедрам, вплоть до шестого курса студент может выбирать специализацию, искать направление, в котором ему действительно будет интересно работать.

Существует пять специализированных групп, и отбор студентов в них ведется в соответствии с научными интересами молодых исследователей. Более 50 лет существует группа физикохимиков-теоретиков. Это направление предполагает боль-



Победители и призеры 44-й Международной химической олимпиады школьников со своими наставниками. Слева направо: И.О.Глебов (доцент химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова), В.В.Еремин (профессор того же факультета), Александр Олейниченко, Кирилл Петрюков, Антон Сеницкий (гид команды РФ, университет Чикаго, США), Илья Устинович, Артем Бойчук, сотрудник Посольства РФ в США, академик В.В.Лунин (декан химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова). Вашингтон. 31 июля 2012 г.

шой объем математики и физики, и меньше времени отводится на практикум по химии. Есть группа живых систем — будущие биохимики, энзимологи. В группу моделирования химических процессов отбор осуществляется по критериям математической одаренности. Для Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» наш факультет готовит радиохимиков. В Центре не осталось специалистов по этому направлению. Между тем работа с изотопами элементов в любых исследованиях требует хорошего знания химии. Наконец, студенты академической группы имеют дополнительное время для исследовательской практики в институтах РАН, в которых большинство из них предполагают продолжить научную работу.

Недоученный химик опаснее, чем недоученный врач, поэтому на химическом факультете МГУ сохранена ступень специалитета: третий год мы учим студентов по программе, рассчитанной на шесть лет. Бакалавриат есть только для иностранных граждан. В итоге 25–30% выпускников химфака МГУ имеют красные дипломы и по несколько публикаций в рейтинговых журналах. Они имеют все основания защитить диплом как магистерскую диссертацию.

Работа, связанная с получением новых элементов и идентификацией их свойств (например, на Фабрике сверхтяжелых элементов в Дубне) требует от химиков особых знаний. Вероятно, сегодня в химических вузах большое значение придается хорошей подготовке по физике?

Директор лаборатории ядерных исследований в Дубне доктор физико-математических наук Сергей Николаевич Дмитриев — по образованию химик, выпускник Московского химико-технологического института имени Д.И.Менделеева. Но такие специалисты — редкость. Значение хорошей подготовки выпускников химических факультетов в области физики недооценивается. Химфак МГУ имени М.В.Ломоносова — единственный в нашей стране и в мире химический факультет, где при поступлении необходим сертификат ЕГЭ по физике, и место этого предмета в нашем учебном плане немногим меньше, чем химии.

На физическом факультете МГУ в течение нескольких десятилетий (до 2007 г.) химию студентам не преподавали вообще, и мне, как декану химического факультета (я работал на этом посту в 1992–2018 гг.), понадобилось около 15 лет, что-



Участники Всероссийского съезда учителей и преподавателей химии на Международной интерактивной выставке, посвященной химии и ее современным достижениям. Москва, 6 февраля 2019 г.

Фото предоставлены пресс-службой Всероссийского фестиваля науки НАУКА 0+



Сотрудники химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова представляют экспонаты интерактивной выставки, приуроченной к церемонии открытия Международного года Периодической таблицы химических элементов в России.

бы убедить наших коллег-физиков в ошибочности такого решения. Это была стратегическая ошибка, невозможно достичь мировых высот в науке, не обеспечив основы фундаментального образования. К счастью, в настоящее время преподаватели химфака читают студентам-физикам курс общей и физической химии.

Мы начали беседу с того, что будущее науки и технологий связано с успешной работой молодых специалистов. В этом отношении я определенно оптимист. В Московском университете, несмотря на большие перемены в сфере образования, по-прежнему учат студентов думать. Неслучайно зарубежные коллеги и сегодня восхищаются способностью представителей российских научных школ генерировать новые идеи.

Интервью подготовила
Е.В.Сидорова

About the Ladder of Modern Chemical Education

Interview with V.V.Lunin
Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

One of the goals of The International Year of the Periodic Table of Chemical Elements is "to develop education in the field of fundamental Sciences", which is in tune with the aspirations of D.I.Mendeleev, who described in detail how to "sweep out the ladder of education" at the turn of the 20th century. The Dean of the Faculty of Chemistry of Moscow State University, academician V.V.Lunin told the editor of "Priroda" about some modern features of this complex, continuous, and multistage work.

Keywords: Periodic Table of Elements, Mendeleev Annual Academic Competition for high-school students, International Chemistry Olympiad.

Химики о Периодической таблице: профессиональный инструмент, научная икона, открытая книга?

Е.В.Антипов^{1,3}, Е.В.Бабаев¹, В.П.Зломанов¹, А.В.Иванов^{1,2}, А.А.Карякин¹, А.В.Шевельков¹,
А.В.Яценко¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

²Институт общей и неорганической химии РАН имени Н.С.Курнакова (Москва, Россия)

³Сколковский институт науки и технологий (Москва, Россия)

Десятого июля 1905 г. Дмитрий Иванович Менделеев сделал в дневнике следующую запись: «По-видимому, периодическому закону будущее не грозит разрушением, а только надстройкой и развитием обещает». Но уже при жизни автора отношение коллег к периодическому закону различалось. Одни ученые считали его фундаментальным законом природы, другие (как, например, Г.Копп, А.Кекуле, Р.Бунзен, М.Бертло, Н.Вырубов) относились к открытию Менделеева скептически. В 1876 г. вышел русский перевод составленного профессором химии и минералогии Гарвардского университета Джосайей Куком руководства по химии с многообещающим названием «Новая химия». Редактором был Александр Михайлович Бутлеров: книга Кука привлекла его широким использованием структурных представлений и формул. В отечественном издании «Новой химии» немало редакторских примечаний, но ни слова о периодическом законе, даже в предисловии Бутлерова к этой монографии.

В XX в., когда значимость периодического закона, казалось бы, уже не вызывала сомнений, изредка слышались голоса скептиков. Так, например, в 1992 г. известный американский химик, профессор Принстонского университета Лилэнд Аллен написал, что «главная икона химии» — Периодическая таблица Д.И.Менделеева — постепенно утрачивает свою роль научного инструмента и «дает все меньше указаний в решении дискуссионных вопросов теоретической неорганической химии» [1]. Спустя четверть века эта реплика американского коллеги стала точкой отсчета в разговоре с исследователями Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, которые согласились ответить на вопрос редакции «Природы», в какой мере Периодическая таблица помогает им в работе.



Памятник Д.И.Менделееву на территории Всероссийского научно-исследовательского института метрологии имени Д.И.Менделеева (Санкт-Петербург) и Периодическая таблица на стене здания института.

Периодическую таблицу изучаешь всю жизнь

член-корреспондент РАН Евгений Викторович Антипов,
заведующий кафедрой электрохимии
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова
профессор Сколковского института науки и технологий

Для всего мира именно периодический закон Д.И.Менделеева — главное открытие российской науки, настолько же значительное, как закон всемирного тяготения И.Ньютона, теория относительности А.Эйнштейна. Подобных прозрений в истории науки единицы. И когда путешествуешь по разным странам и университетам, убеждаешься, что имя Менделеева известно всем и Периодическая таблица переведена на все языки (очень интересно «читать» ее, например, на китайском или на путунхуа — официальном языке Тайваня). Приезжая в Россию, зарубежные коллеги-химики стараются непременно побывать рядом с Санкт-Петербургским государственным технологическим институтом (Техноложкой) и сделать фотографии возле памятника великому ученому на фоне Периодической таблицы химических элементов, размещенной на стене НИИ метрологии имени Д.И.Менделеева.

На стене моего рабочего кабинета — Периодическая таблица в нестандартном исполнении: я собираю значки, символизирующие химические элементы и традиционно выпускаемые к Дню химика в МГУ. Коллекция начинается с водорода (элемент с атомным весом, равным единице, стал эмблемой самого первого студенческого праздника) и заканчивается на сегодняшний день йодом (в 2018 г. День химика состоялся в 53-й раз, что соответствует порядковому номеру этого элемента). Можно сказать, что Периодическая таблица всегда у меня перед глазами.

Вся моя работа (по крайней мере с тех пор, как я стал заниматься направленным дизайном новых неорганических структур и материалов с важными физическими свойствами) связана с использованием существующего набора химических элементов. На протяжении многих лет я постоянно изучаю Периодическую таблицу и должен сказать, что у нее есть два существенных «недостатка». Во-первых, она слишком маленькая. Создавать новые материалы — главная задача химии, и очень часто мы нуждаемся в химическом элементе, которого... нет, к сожалению.

Приведу простой пример: в начале 1993 г. мы синтезировали сверхпроводник — материал, электрическое сопротивление которого падает до нуля при довольно высокой температуре, выше 130 К (что соответствует -143°C) — и понимали, как надо оптимизировать его кристаллическую структуру, чтобы дополнительно повысить температуру перехода в сверхпроводящее состояние. Для создания новых сверхпроводников нужен был аналог бария — элемент с таким же зарядом, тем же типом химической связи, но обладающий ионным радиусом, меньшим, чем у бария и большим, чем у стронция. Однако такого элемента не существует в природе и, соответственно, в Периодической таблице. (В свое время мы опубликовали статью в «Природе», где описали эту проблему — необходимость модифицировать катионный состав сверхпроводника с целью «сжатия» его структуры и уменьшения расстояния между атомами меди и кислорода в медь-кислородном слое для достижения сверхпроводимости при температурах выше 140 К при нормальном давлении [2].) Мы пытались найти решение, приготавливая смесь бария и стронция и тем самым уменьшая усредненные межатомные расстояния. Но нужной оптимизации структурных параметров для медь-кислородных слоев, которые отвечают за сверхпроводимость, не достигли, потому что в одной элементарной «ячейке» находился барий, в другой — стронций, что вызывало нежелательные искажения сверхпроводящих слоев.

Второй «недостаток» Периодической таблицы состоит в том, что свойства химических элементов меняются скачкообразно, с большими различиями между соседними элементами в ее периоде. «Перехитрить» фундаментальный закон природы — сделать эти изменения более постепенными — мы не можем. Если бы химики могли управлять химическими элементами, это очень облегчило бы нашу работу. Хорошо, что в Периодической таблице есть группа лантанидов, в пределах которой свойства химических элементов (ионный радиус, характер химической связи и др.) меняются монотонно и постепенно. Вот с помощью этой группы мы и можем заниматься структурным «тюнингом» (тонкой настройкой), создавая новые материалы.

Мне запомнились слова академика Валерия Алексеевича Легасова, в конце 1980-х читавшего лекции студентам на химическом факультете МГУ: «У хи-



Е.В.Антипов.

мика есть Периодическая система и баночки с элементами; для выполнения задачи — получения необходимых материалов — вы должны выбрать нужные баночки, смешать элементы в необходимой пропорции, найти условия, при которых могут быть синтезированы искомые вещества». По-существу, Периодическая система — «зашита» в наше восприятие химических явлений. И наоборот, заглядывая в таблицу, химик мысленно считывает заложенную в ней информацию: как именно в первом ряду переходных металлов могут меняться степени окисления элементов, координационные числа катионов в различных степенях окисления, характер

связей в разных типах соединений, какими будут свойства последних... Элементарный пример — физические свойства простых оксидов двухвалентных переходных металлов со структурой хлористого натрия (от TiO до NiO), которые в пределах ряда меняются очень сильно: от металлической проводимости до изоляторов, от отсутствия каких-либо значимых магнитных кооперативных явлений до антиферромагнетизма* при высоких температурах. И невозможно объяснить генезис подобного изменения свойств, не зная Периодической таблицы.

Когда в 1990-е годы мы синтезировали ртуть-содержащие сверхпроводники и выступали на конференциях, рассказывая о проблемах модификации структуры этих материалов, слушавшие доклад физики (они, наверное, не очень хорошо знали периодический закон) советовали: возьмите вместо ртути другие элементы и получите сверхпроводник с более совершенными качествами. На что приходилось отвечать: к сожалению, в природе существует только один химический элемент, который может иметь степень окисления плюс два и гантельную координацию в оксидных фазах. И эти особенности ртути — необходимые условия для существования подобных сверхпроводников.

Когда специалисты создают не существовавшее прежде химическое соединение, обойтись без Периодической системы невозможно. Сейчас наш научный коллектив разрабатывает материалы для аккумуляторов [3], и мы постоянно ищем возмож-

* Антиферромагнетизм — одно из магнитных состояний вещества, отличающееся тем, что магнитные моменты соседних частиц этого вещества ориентированы навстречу друг другу (антипараллельно), и поэтому намагниченность тела в целом очень мала.



Значки, символизирующие химические элементы, выпускаются к Дню химика в МГУ имени М.В.Ломоносова.

ность улучшить их характеристики. Поясню: проводятся исследования кристаллической структуры электродного материала, в которой изменяется концентрация щелочного металла, и, одновременно, степень окисления переходного металла, переводимого при разряде аккумулятора в восстановленную форму, а при его заряде — в окисленную. Наша цель — ускорить процесс: условно говоря, аккумулятор должен заряжаться в течение нескольких часов, желательно даже минут, а не лет. Что для этого важно? Возможность быстрого перемещения ионов щелочных металлов в твердом теле. Выбранные химические элементы (переходные металлы и другие) должны обеспечивать оптимальную кристаллическую структуру и размер каналов, по которым переносящие заряд ионы лития (в литий-ионном аккумуляторе) либо калия (в калий-ионном) перемещались бы без особых затруднений.

И каждый раз, когда в нашей работе требуется изменить электрохимический потенциал катодного материала, мы начинаем размышлять: какой элемент из Периодической таблицы выбрать для модификации кристаллической структуры? Преобразование должно сопровождаться изменением длины и характера связи атомов кислорода и переходного металла, что приведет к изменению потенциала, при котором происходит извлечение лития или его внедрение в кристаллическую решетку. Последнее определит важнейшую характеристику аккумулятора — количество энергии, которое он сможет запастись.

Цепь названных условий закономерно связана с положением выбранного химического элемента в Периодической таблице. В зависимости от этого меняется электроотрицательность и характер связи с кислородом, что отражается на величине по-

тениала, при котором происходит окисление переходного металла. Например, в кристаллической структуре LiFeVO_3 Fe^{+2} окисляется при потенциале 2.9 В относительно лития, а после замены боратного аниона на фосфатный этот процесс происходит при потенциале 3.4 В, последующая модификация с заменой фосфатного аниона на сульфат-ион и фторид-ион — при потенциале 3.9 В. Разница составляет 1 В, что позволяет посчитать, какой запас дополнительной энергии мы получим в новом аккумуляторе.

Говоря о роли Периодической таблицы в нашей работе, рискну провести аналогию с романом Л.Н.Толстого «Война и мир». В школе его заставляют читать в обязательном порядке. В итоге формально все знают содержание этого романа. Но, читая эту книгу в зрелые годы, заново открываешь ее для себя. Так и к Периодической системе надо обращаться на этапе, когда ты уже стал химиком, многое знаешь и понимаешь основные вещи в профессии. Вот тогда Периодическая таблица становится инструментом в научной работе. Конечно, студентом я не понимал этого в полной мере и, наверное, отвечал бы на вопрос о роли Периодической таблицы иначе.

Если деятельность специалиста-химика остается в рамках трех-четырёх элементов, то, может быть, ему и не так нужна Периодическая таблица. Но в нашей лаборатории ведется работа по меньшей мере с 50–60 химическими элементами. Мы решаем разные задачи, создаем сверхпроводники, магнитные материалы, вещества с высокой ионной проводимостью и должны правильно прогнозировать результаты своих решений. Пожалуй, иллюстрируя роль Периодической таблицы, стоит вспомнить следующий эпизод. Когда в 1986 году открыли высокотемпературную сверхпроводимость, пошел вал работ по этой теме, прямо цунами. Многие исследователи занялись этой проблематикой. И в беседе с одним из коллег я услышал: «мы синтезируем сверхпроводник, в котором часть бария заменяем на бериллий». На вопрос, на основании чего предполагается улучшение качеств сверхпроводника при такой модификации, последовал обескураживающий ответ: «бериллий тоже принадлежит ко второй группе химических элементов». Конечно же, тут проявилось плохое знание периодического закона. Периодическая таблица помогает увидеть бесперспективность подобного выбора: бериллий хотя и относится ко второй группе, но имеет иные, чем барий, характеристики — тип химической связи, координационное число, межатомные расстояния.

Давайте расширим рамки разговора о значении Периодической таблицы как научного инструмента химиков и вспомним, что часто именно отсутствие новых веществ тормозит прогресс

в других сферах науки и техники. Конструктор ракетных двигателей не может реализовать серьезные проекты без материалов с принципиально новыми качествами. Нужны уникальные материалы для создания квантового компьютера, для получения новых лекарственных препаратов. Востребованность синтеза новых соединений огромна в самых разных областях, и даже решение большинства экологических проблем, с которыми связана существующая в обществе хемофобия, будет зависеть от наших профессиональных успехов. Например, если загрязнение воздуха в Пекине (где ТЭЦ работают на угле) можно снизить, изменив технологию производства тепла и энергии, то задача химиков — обеспечить инновации соответствующими материалами либо найти способ выработки энергии, не наносящий подобный урон окружающей среде и здоровью людей.

Один из экологически ориентированных проектов нашего исследовательского коллектива реализуется совместно с компанией «Русал» — одним из крупнейших в мире производителей алюминия. Задача — создать промышленный электролизер нового поколения, позволяющий получать алюминий без выделения в окружающую среду углекислого газа, фторсодержащих соединений и других загрязняющих воздух веществ. Когда мы стали выбирать возможные комбинации химических элементов для формирования материала анода, то в первую очередь смотрели в Периодическую таблицу. Затем анализировали, как эти элементы будут вести себя в агрессивной среде фторсодержащих расплавов при температуре 900°C и выше, в условиях очень высоких анодных потенциалов, при которых выделяется кислород. Нас интересовало, какие типы кристаллических структур сформируют эти элементы, будут ли защищены материалы анода.

Прежде чем новый тип электролизера установили на заводе, необходимо было провести общественные слушания и убедить жителей города в экологической безопасности нашего проекта. Я выступал и в очень популярной форме объяснял, что наша задача — снизить выбросы загрязняющих веществ. В настоящее время разработанный при нашем участии экспериментальный электролизер работает на Красноярском алюминиевом заводе: на его катоде выделяется алюминий, а на аноде — только кислород.

Продолжая тему хемофобии, обусловленной экологическими проблемами, отмечу: надо уходить от бензиновых, дизельных двигателей, переходить на электромобили. Еще пять лет назад электромобили считались далекой перспективой, а сейчас их производство растет по экспоненте, расширяется рынок сбыта. Лидер — Китай. Надо хорошо понимать, что свыше 50% вредных выбросов в городской воздух приходится на транс-

порт. И, не решив проблему, города продолжают вкладывать огромные деньги в лечение населения, страдающего от загрязнения атмосферы. Кстати, мэрия Москвы активно занимается вопросом перехода на аккумуляторный транспорт.

Задача химии — создавать экологически безопасное производство. Считаю, что наша работа по получению материалов для аккумуляторов — вклад в сохранение чистоты атмосферы, здоровья людей.

Периодический закон Д.И. Менделеева дает базис, на котором возникает что-то новое, и заставляет химиков продолжать трудный поиск новых материалов с использованием подходящих элементов в нашей маленькой Периодической таблице: к сожалению, создать не существующий в природе химический элемент — например, аналог бора с формальным зарядом +4 и координационным числом, равным пяти, невозможно, как бы нам ни хотелось. А вот получать новые необычные вещества с использованием ограниченного набора элементов из Периодической таблицы вопреки законам термодинамики, используя различные нетривиальные методы синтеза — сейчас главный тренд в химии. И это делается очень успешно.

Реликвия, предназначенная не для поклонения, а для управления природными процессами

доктор химических наук Владимир Павлович Зломанов,
профессор кафедры неорганической химии
химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Задам встречный вопрос: «Что такое наша жизнь?». Один из возможных ответов — общение с помощью разных знаков и символов. Семь нот позволяют музыкантам создавать удивительные мелодии и симфонии. Поэты и прозаики записывают свои произведения, пользуясь алфавитом родного языка. Химики, естествоиспытатели общаются на языке символов химических элементов, собранных в «алфавит» Периодической таблицы. Есть нечто, объединяющее разные миры и понятное каждому.

Теперь от разговора о форме общения перейдем к сути. Химия — наука о веществах и их превращениях. Работая с любым химическим веществом, специалист понимает, что оно состоит из взаимодействующих частиц. Он должен знать их состав, вид,

учитывать размер, оценивать энергию их взаимодействия, обусловленную электростатическими или топологическими (как в молекуле органических циклических соединений ротаксанов или катенанов) связями, представлять структуру вещества. (Кстати, за методику синтеза катенанов французскому химику Жану-Пьеру Саважу была присуждена Нобелевская премия 2016 г. *) Химический элемент составляет суть характеристики состава вещества, это и есть главное зерно всех наших исследований. А вся информация о каждом из химических элементов сведена в Периодической таблице.

Средневековые алхимики искали способ превратить кварцевый песок в алмаз, что означало бы «перерождение вещества» — переход диоксида кремния (SiO_2) в углерод (C). Разумеется, первая мысль современного человека такова: эта задача — из числа невыполнимых. Однако недавно и она решена. Вначале кварцевый песок превращают в кремний путем восстановления диоксида кремния коксом в дуговых электрических печах. Затем полученные пластины кремния при высокой температуре ($1250\text{--}1300^\circ\text{C}$) обрабатывают окисью углерода, и получаются тончайшие — не более нескольких сотен нанометров — бездефектные пленки карбида кремния (SiC). Этот материал по структуре и всем физическим свойствам уже подобен алмазу, он нашел применение во многих областях — в частности, при изготовлении вычислительных машин, светодиодов. Для того чтобы довершить его превращение в алмаз, остается убрать из кристаллической решетки кремний. На карбид кремния воздействуют фтором при высокой температуре, результатом взаимодействия становятся газообразный тетрафторид кремния (SiF_4) и алмаз.

Технология, о которой я в двух словах рассказывал, уникальна (нигде в мире ничего подобного не существует), и разработана она в лаборатории структурных и фазовых превращений в конденсированных средах Института проблем машиноведения РАН доктором физико-математических наук Сергеем Арсеньевичем Кукушкиным и кандидатом технических наук Александром Сергеевичем Осиповым [4, 5]. Эти ученые занимаются данной проблематикой и ведут эксперименты около 10 лет.

Таким образом, умело пользуясь «алфавитом» Периодической таблицы, химики управляют



В.П. Зломанов.

* Вацадзе С.З. Лауреаты Нобелевской премии 2016 года по химии // Природа. 2017. №1. С.71–76.

процессами. На «научную икону» нужно уметь смотреть и видеть. И тогда мы можем не ограничиваться словами о важности Периодической системы, а предъявлять реальные дела.

Периодическая таблица — очень полезный инструмент

доктор химических наук Андрей Владимирович Шевельков,
заведующий кафедрой неорганической химии
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Справедлива ли проведенная Л.Алленом аналогия Периодической таблицы с «научной иконой»? В определенном смысле — в том, что химики постоянно используют ее как инструмент. На стене моего кабинета висит большая юбилейная таблица, которую к 100-летию открытия Д.И.Менделеева изготовили для академика В.И.Спицына*, заведовавшего кафедрой неорганической химии химического факультета МГУ в 1942–1988 гг. Его преемники — академик Ю.Д.Третьяков и я — многое изменили здесь за годы работы, но эта реликвия сохранена, и время от времени я обращаюсь к ней при решении исследовательских задач, хотя современный вариант Периодической таблицы, утвержденный Международным союзом теоретической и прикладной химии и известный как длиннопериодный, значительно от нее отличается. В настоящее время мы читаем студентам лекции и ведем исследования по расширенной версии, в которой последовательно представлены элементы *s*-, *d*-, *p*-блоков**.

Необходимым профессиональным инструментом Периодическая таблица становится прежде всего для химиков-неоргаников, занимающихся фундаментальными исследованиями. На нашей кафедре такие темы составляют две трети всех выполняемых работ.

До открытия в 1913 г. закона Г.Мозли*** (благодаря которому стало понятно, что периодичность свойств элементов связана не столько с атомными массами, сколько с электронным строением

атома) химики, проводя эксперименты и синтезируя новые соединения, оценивали простые соотношения: определяли, какими могут быть высшие степени окисления элементов и как должны измениться радиусы их атомов, тот или иной физический параметр — например, «температура кипения высшего галогенида» (как любил указывать сам Менделеев). Но прошло время, и ситуация существенно изменилась.

В неорганической химии возникли интересные объекты, которые не могли быть описаны простыми соотношениями элементов, следовательно, для их описания требуется привлечение электронной структуры и новые подходы к анализу химической связи. Такие объекты можно разделить на две большие категории: наноразмерные вещества, для которых свойство поверхности значит больше, чем объемное свойство, и интерметаллиды — химические соединения двух и более металлов, для которых не действуют законы кратных соотношений. Например, специалистам понятно, почему сульфат калия можно описать формулой K_2SO_4 : потому что тут есть простое ионно-ковалентное распределение связей. А вот для веществ группы интерметаллидов до сих пор не существует серьезной теории, описывающей химическую связь. В последние 10 лет развиваются качественные и полуколичественные подходы, позволяющие прибли-



Хроматографическая колонка. Работа с аналитическим оборудованием высокого уровня — неотъемлемая часть деятельности современных химиков-исследователей.

* Виктор Иванович Спицын (1902–1988) — один из основоположников научной школы в области химии и технологии молибдена, вольфрама, тантала и бериллия. В 1983 г. награжден золотой медалью имени Д.И.Менделеева за цикл работ «Создание физико-химических основ и разработка методов получения высокочистых веществ».

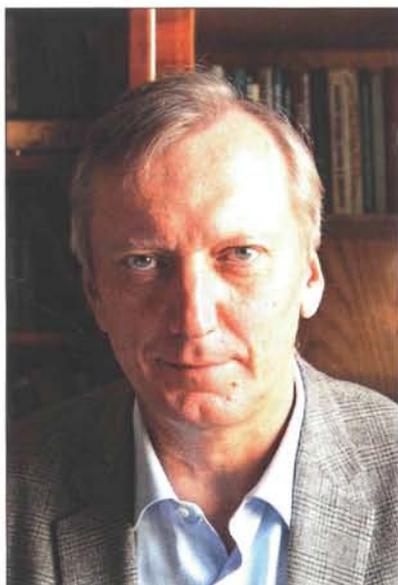
** Блок Периодической таблицы — совокупность химических элементов со сходным расположением валентных электронов в атоме, т.е. их валентные электроны с наивысшей энергией занимают орбиталь одного типа (*s*-, *d*- или *p*-).

*** Закон Мозли связывает частоту спектральных линий характеристического рентгеновского излучения атома химического элемента с его порядковым номером. Экспериментально установлен английским физиком Генри Мозли в 1913 г.

зиться к созданию такой теории. Но пока очень важен интуитивный поиск, который основан на совокупном применении знаний об экспериментальных методах и о том, как меняются фундаментальные свойства элементов в таблице Менделеева — в группе, периоде, а иногда даже по диагонали. Иными словами, первичные представления помогают найти новые материалы.

Приведу простой пример. Существует метод синтеза интерметаллида из расплава металла, переходящего в жидкое состояние при относительно низкой температуре. Таков галлий (Ga): температура плавления 30°C , кипения — около 2000°C (т.е. в расплаве он нелетучий). Вместе с галлием расплавляют другие относительно легкоплавкие металлы, и с совместным расплавом при невысокой температуре реагирует какой-либо тугоплавкий металл. Элементы вступают в химическую реакцию, продукты их взаимодействия растворяются, и при кристаллизации получается новый интерметаллид. Чем руководствуется исследователь, модифицируя вещество химически и с точки зрения электронных свойств, как он ищет другой металл, способный вступить в подобную реакцию с галлием? Помогает Периодическая таблица, показывающая изменение числа электронов в ряду химических элементов: слева от галлия, который имеет атомный номер 31, располагается цинк (Zn) с атомным номером 30, справа — германий (Ge) с атомным номером 32, и в первую очередь выбор останавливается на соседях по группе. Таким образом, даже не ставя задачу глубоко понять природу взаимодействий, возникающих в продукте, экспериментаторы открывают новые вещества с оригинальными свойствами, предсказать которые заранее невозможно. При этом прогнозировать отличия тепло-, электропроводности, магнитных и других свойств полученного соединения от известных примеров вполне реально. На этой основе возникло новое направление синтеза интерметаллидов.

Интерметаллиды востребованы (или потенциально интересны технологам) как новые сверхпроводники, термоэлектрические материалы, вещества для получения магнитокалорического эффекта*. Повторюсь: используя очень простой под-



А.В.Шевельков.

ход, основанный на изменении электронной конфигурации на валентном уровне, мы можем синтезировать новые соединения не только с заранее известными, но даже и с непредсказуемыми свойствами.

Когда Менделеев открыл периодический закон, теории химической связи не существовало, а были лишь попытки описать валентные соотношения или, скажем, некоторые принципы строения органических соединений (как, например, теория химического строения органических веществ А.М.Бутлерова). Основная идея Менделеева состояла в развитии существовавших представлений о периодичности. Он считал главным

признаком элементов их атомные массы, но, тем не менее, догадался поменять местами кобальт и никель, йод и теллур — согласно характеру изменения их свойств, а несоответствие изменению атомных масс рассматривал как аномалию.

На рубеже XIX–XX вв. возникла новая идея — о периодичности, обусловленной электронным строением атомов. В 1910–1920-х годах было достигнуто еще более глубокое понимание периодического закона, его связи с квантованием электронных уровней атомов. Благодаря работам Н.Бора, У.Уилсона и других исследователей стало ясно, почему переходные и непереходные элементы так различаются по своим свойствам. И химия координационных соединений второй половины XX в. во многом основана на представлении о том, как расщепляется электронный *d*-подуровень у переходных металлов. Соответственно, ученые исследовали, как в пределах каждого ряда Периодической таблицы убавление (добавление) электрона сказывается на свойствах химических элемента. Было установлено, что при этом изменения претерпевают даже термодинамическая и кинетическая устойчивость — т.е. инертность и лабильность химических комплексов (их способность обмениваться лигандами, или проще — реакционная способность, не связанная с термодинамическими константами).

К 1970–1980-м годам теория химического строения вещества окончательно устоялась, и в основу ее легли аспекты Периодической системы, о которых не знали ни Менделеев, ни Мозли. В неорганической химии появились идеи о существовании коллективных взаимодействий элементов, о том, что прочная связь в металлах обеспечивается отнюдь не за счет «электронного газа» (свобод-

* Магнитокалорический эффект — варьирование температуры магнитного вещества при изменении внешнего магнитного поля, действующего на него в адиабатических условиях.

ного движения электронов), а что это особая форма ковалентного взаимодействия, реализуемая при множественном перекрывании электронных орбиталей. Следствием такого развития научной мысли стало правило Юм-Розери*, которое определяет способность химического элемента растворяться в металле с образованием твердого раствора (например, указывает, какими факторами обусловлено содержание меди и цинка в составе латуни и в каком диапазоне может изменяться их соотношение). Данное правило основано уже на понимании того, что необязательно рассматривать один атом как нечто обособленное, дающее основу для простого парного взаимодействия: есть коллективное взаимодействие, но оно зависит от числа валентных электронов, а значит, от положения элемента в Периодической таблице.

Показательный пример эволюции научных представлений — редкоземельные элементы, открытие которых продолжалось уже после доклада Менделеева о периодическом законе. К слову, гольмий и тулий были открыты в 1879 г., а диспрозий — в 1886-м. В ряду этих $4f$ -элементов — от церия (Ce) до лутеция (Lu) — меняются два параметра: радиус атома и число электронов на валентных f -орбиталях. А значит, варьируя характер воздействия на лантаниды мы можем экспериментально получить вещества с определенными свойствами. Во-первых, интересно изменение магнитного поведения однотипных веществ, содержащих разные редкоземельные элементы. Во-вторых, под дейст-

* Уильям Юм-Розери (1899–1968) — английский металлург, внесший значительный вклад в изучение кристаллического строения металлов и сплавов.

вием электромагнитного излучения возникает люминесценция в видимой, ультрафиолетовой или инфракрасной области спектра, в нужной нам области длин волн — также в зависимости от природы редкоземельного элемента. Пройдя весь ряд лантанидов, мы в зависимости от радиуса атома можем обнаружить изменения структурного типа или даже состава вещества, а в зависимости от природы, количества электронов на f -орбиталях и их расположения — изменения функциональных свойств, магнитных или люминесцентных.

Такие работы ведутся в самых разных областях, связанных, например, с синтезом ароматических карбоксилатных комплексов или с получением оксо-селеновых и оксо-теллурических производных, осложненных галогенидом. Зачем это нужно? Тут возникают очень интересные аспекты: мы ожидаем увидеть новое применение материалов — например, тонкие переключатели в спинтронике**. Для решения данной задачи нужны магниты не с трехмерным характером специфического воздействия (как у обычного, железного магнита), а с упорядочением пониженной размерности — одномерным или двумерным. Даже если вырастить кристаллы таких веществ, их магнитные свойства будут проявляться только в определенном направлении, которое под действием сильного поля можно менять. Словом, речь идет о работах, ориентированных в будущее.

Что же касается люминесценции лантанидов, эти свойства используются в более «приземленных» практиках — для изготовления биологических термометров, биологических меток в медицине, поскольку соединения лантанидов нетоксичны, применяются в микродозах и могут быть «пришты-

ты» к белковой основе. Так отслеживают распределение лекарственных препаратов в разных тканях организма. Люминесцентные материалы используют также при производстве металлоорганических светодиодов (oled — organic light emitting diode), например энергосберегающих лампочек. Задача — получить свечение определенного цвета: чисто белое, зеленое и т.д.

** Спинтроника — раздел квантовой электроники, занимающийся изучением спинового токопереноса (спин-поляризованного транспорта) в твердотельных веществах. Новое направление прикладных исследований развивается на стыке физики, химии и материаловедения и судит перерасти в новый технологический уклад, потеснив полупроводниковую микроэлектронику.



Некоторые исследования можно проводить только в инертной атмосфере. Для таких работ химики используют специальные герметичные перчаточные боксы.

Независимо от того, предваряют ли перечисленные исследования химии лантанидов получение нового материала с неизвестными пока свойствами, нацелены ли они на решение конечной практической задачи, фундаментальная составляющая в работе с этими элементами очень велика, хотя, казалось бы, их свойства так схожи. Все равно создать новый комплекс с разными металлами — каждый раз самостоятельная задача: надо изучить стабильность координационного числа того или иного элемента по отношению к данным лигандам, а также учесть многие другие аспекты.

Синтез не производится автоматически, его методика разрабатывается под конкретную задачу на основе фундаментальных изысканий. И сколько времени будет затрачено, заранее неизвестно. Можно угадать с первой попытки, добиться результата за 10–15 дней. Но иногда задача очень сложна: например, если в материале присутствует два *f*-элемента, их нужно изучать одновременно — могут проявиться синергетические свойства (взаимно усиливающие или ослабляющие друг друга). При нерациональном методе синтеза один химический элемент мешает другому, и решить проблему удастся не сразу. Показательный пример — исследование в лаборатории координационных соединений совместной люминесценции европия (Er) и тербия (Tb), находящихся в степени окисления +3: смешивание этих элементов в различных пропорциях долгое время не приводило к усилению сигнала. Оптимальное соотношение составило 99% тербия и 1% европия. Эти эксперименты в данный момент продолжаются с более сложными смесями — европия, тербия и гадолиния (Gd). Первый результат введения нового элемента вызывает оптимизм — удалось дополнительно усилить сигналы люминесценции, но впереди еще много работы. Есть «треугольник» элементов, нужно найти оптимальное сочетание сил, действующих в смеси, но эти силы пока еще не до конца известны: необходимо экспериментально установить, как тот или иной фактор воздействует на результат.

В завершение темы современной роли Периодической таблицы как профессионального инструмента химиков приведу еще один пример. Если сравниваешь элементы одной группы в семействе переходных металлов, то нужно представлять себе степень различия свойств их валентных *d*-орбиталей: *3d*-орбитали существенно отличаются

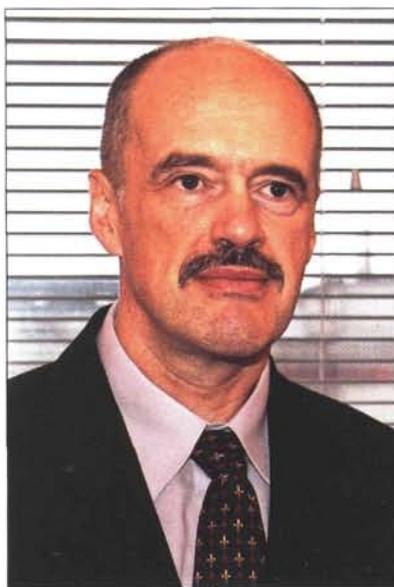
от *4d*-, последние же очень похожи на *5d*-орбитали. И это знание дает возможность, грамотно подбирая электронные конфигурации катионов металлов, делать так, чтобы они имели магнитный аналог в *3d*-ряду и немагнитный в *4d*-. А если это удалось, то можно временно забыть («вычестить») магнитную составляющую и исследовать другие факторы, воздействующие на свойства вещества. Например, выяснить, каков вклад фононного* согласованного колебания решетки или движения электронов проводимости.

Для нас, химиков, это очень интересные объекты, которые мы синтезируем, а затем исследуем совместно с физиками, так как для этого необходимы знания в области физики конденсированного состояния.

Создание уникальных биосенсоров и Периодическая таблица

доктор химических наук Аркадий Аркадьевич Карякин, профессор, заведующий лабораторией электрохимических методов кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Если вы откроете любой журнал по химии, начиная с самых солидных, например «Journal of the American Chemical Society», то найдете множество упоминаний Периодической таблицы химических элементов, даже если она не будет напрямую указана. Современное развитие Периодической системы — удел неорганической химии и радиохимии. Однако и в исследованиях других специалистов, в том числе энзимологов и аналитиков, она играет важную роль. В том числе и мы в конце 2018 г. опубликовали в упомянутом «Journal of the American Chemical Society» статью, посвященную синтезу наночастиц берлинской лазури, которые по своей каталитической активности превосходят природные пероксидазы (окислительно-восстановительные ферменты, использующие в качестве акцептора электронов перекись водорода, H₂O₂) [6]. Рассказывая о природе уникальных свойств материала, из которого синтезированы наночастицы, мы упоминаем о соседях железа по «триаде» — прямо, таким образом, ссылаясь на Периодическую систему элементов.



А.А.Карякин.

* Фонон представляет собой квант колебательного движения атомов кристалла.

Одно из направлений работы нашего исследовательского коллектива — создание электрохимических биосенсоров, применимых в различных сферах жизнедеятельности человека, в частности в медицинской диагностике. Около 25 лет назад мы синтезировали лучший электрокатализатор восстановления пероксида водорода (H_2O_2) [7, 8] — важнейшего метаболита и индикатора воспалительных процессов в живом организме, а также побочного продукта каталитических реакций с участием ферментов оксидаз. В числе последних наиболее известна глюкозооксидаза, которая используется для определения концентрации глюкозы в крови. Созданный электрокатализатор в 1000 раз активнее и в 1000 раз селективнее (избирательнее) обычно используемой платины. Биосенсоры на его основе по всем аналитическим характеристикам превосходят упоминаемые в литературе аналоги, обеспечивая развивающиеся в настоящее время в лаборатории подходы к неинвазивной диагностике. В частности, показана ее принципиальная возможность [9] и разрабатываются лабораторные образцы аналитических систем для неинвазивного мониторинга сахарного диабета.

Research tool и инструмент для систематизации знаний

доктор химических наук Александр Васильевич Яценко,
профессор кафедры общей химии
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Какой смысл вы вкладываете в определение «научная икона»? Обычно так говорят, имея в виду предмет уважаемый, но не приносящий непосредственной практической пользы. Наверное, неправильно говорить о Периодической таблице в таком ключе. Хотя, конечно, я не могу представить себе современного химика, который сидит, наморщив лоб, над Периодической таблицей, разглядывает ее и пытается делать на этой основе какие-то заключения. Но наши аналогии, ассоциации — во многом оттуда. Это и универсальный язык, и систематика. Смысл терминов «переходные металлы», «щелочные металлы», «галогены», «халькогены» химики всего мира понимают одинаково: речь идет о группах родственных элементов, обладающих близкими свойствами, что обусловлено сходством в электронном строении их атомов. А Периодическая система

элементов как раз и отражает аналогии в их электронном строении. Пожалуй, можно провести аналогию (не для всех очевидную) с таблицей умножения, которой почти безотчетно пользуются математики и вообще все, кто совершает вычисления, — обойтись без такого инструмента невозможно, во всяком случае это страшно усложнило бы жизнь: попробуйте, к примеру, возвести 10 в квадрат путем сложения.

На основе Периодической таблицы сегодня создают современные интерфейсы систем поиска информации — например, с помощью таблицы Менделеева обеспечивается гибкий поиск в Кембриджской базе структурных данных. В данном случае она становится именно *research tool*, т.е. инструментом, причем удобным. Оперирование подобными базами данных играет важную роль в работе исследователей, в том числе работающих так же, как я, в области органической кристаллографии. И действительно, если мы ставим задачу синтезировать новое вещество, определенным образом модифицируя молекулу, то должны в первую очередь выяснить, какие соединения, похожие на полученное нами, известны и каковы их строение и свойства. Структура каждого нового вещества — предмет публикации в научном журнале (иногда — высокорейтинговом) и депонирования в международной базе данных (ему предшествует экспресс-проверка на фальсификацию).

Мои научные интересы связаны с красителями и пигментами, точнее, в настоящее время — с веществами класса азокрасителей. Разные кристаллические модификации пигмента не одинаковы по цветовым характеристикам, например, они имеют более или менее приятные оттенки, что объясняется характерным спектром поглощения: если химическое соединение поглощает

свет в узком диапазоне длин волн, мы однозначно воспринимаем его цвет как чистый, насыщенный, и, наоборот, при поглощении им света в широком диапазоне или при появлении в его спектре дополнительных полос возникает впечатление, что краски «грязные». Эти особенности обусловлены строением молекул вещества и тем, как они упакованы в кристалле. Так вот, оказалось, что в процессе кристаллизации цвет азокрасителя немного меняется, и при нанесении на поверхность даже одного и того же пигмента, но с помощью разных технологий (способом упаривания его рас-

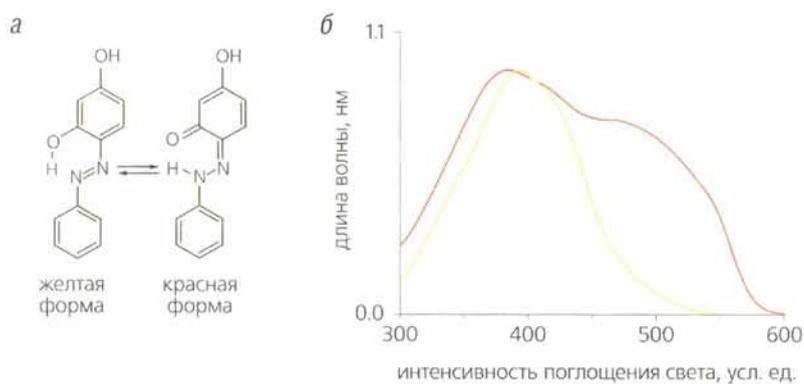


А.В.Яценко.

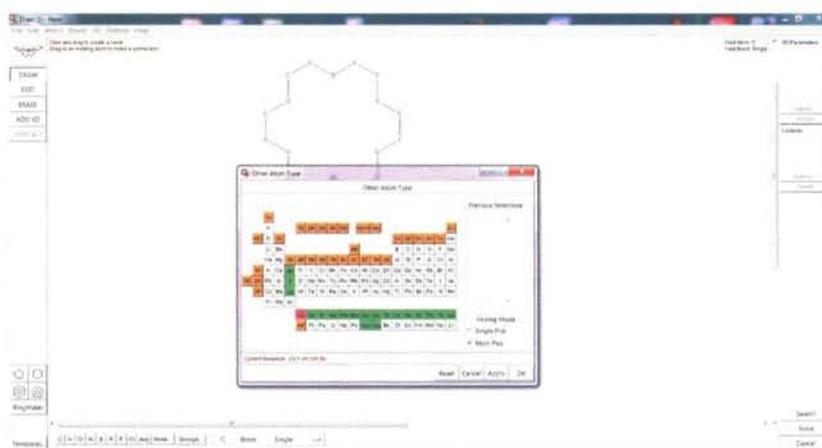
творя в ацетоне либо в хлористом метиле) цвет покрытия будет варьироваться.

Возникла гипотеза о различии структуры молекул азокрасителя, находящегося в растворе и в кристаллическом состоянии. Для ее проверки мы вырастили в лаборатории несколько монокристаллов, провели их рентгеноструктурный анализ и определили: да, действительно, в процессе кристаллизации азокрасителя при условии формирования определенной системы водородных связей происходит перемещение атома водорода из одного положения в другое — так называемый таутомерный сдвиг. Таутомерия — хорошо известное явление, но в данном случае мы открыли неизвестный ранее механизм изменения цвета у определенного класса красителей, связанный с влиянием межмолекулярных взаимодействий в кристаллическом состоянии. И для того чтобы подтвердить его универсальность, в ближайшее время нужно провести серию экспериментов, а также показать с помощью квантово-химических расчетов, что в определенных условиях будет устойчива та или иная форма молекулы азокрасителя.

Примечательно, что синтетические азокрасители, которые мы сейчас изучаем, имеют очень широкое и разнообразное применение. Так, в 1970-е годы выяснилось, что красители антрахинонового ряда, известные с XIX в., после небольшой химической модификации могут быть использованы для лечения онкологических заболеваний. Первоначально открыли антрациклиновые антибиотики, затем разобрались с механизмом их действия и установили: они имеют не только противомикробную, но и противоопухолевую активность в связи с тем, что их плоские молекулы встраиваются между парами азотистых оснований, образуя стойкий комплекс с ДНК и блокируя ДНК-зависимый синтез РНК. Дальнейший поиск веществ ант-



Одно и то же вещество может существовать в разных таутомерных формах (а) и эти формы имеют разные спектры поглощения (б), а, следовательно, разный цвет (желтый и красный).



Периодическая таблица в интерфейсе поисковой системы.

рациклинового ряда, малотоксичных и подходящих для применения в онкологии, привел, например, к открытию даунорубицина, с точки зрения строения молекулы — родного брата антрахиноновых красителей.



Современные исследования невозможны без приборов, позволяющих быстро получать результаты и анализировать их при помощи баз данных.

Иногда сожалеешь о том, что первые статьи Менделеева, датируемые началом 1860-х, современным химикам уже сложно воспринимать, настолько изменился наш профессиональный язык. В читальном зале библиотеки химического факультета студенты и сотрудники имеют возможность просматривать журналы «Chemische Berichte», издававшиеся с 1868 г. Так вот, читая статьи 1890-х годов, прекрасно понимаешь, о чем идет речь, хотя их язык и не идентичен современному. Но самые ранние выпуски журнала, увы, подобны «Слову о полку Игореве» — язык химии тогда отличался от современного. Между тем Периодическая таблица химических элементов, ставшая всеобщим достоянием в 1869 г., сегодня — важнейший инструмент систематизации знаний. И спустя 150 лет она представляет собой исключительную ценность для нашей преподавательской и научной работы.

Периодическая таблица — динамично развивающаяся система

доктор химических наук Александр Вадимович Иванов,
доцент кафедры аналитической химии
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,
заведующий лабораторией аналитической химии
и методов разделения
Института общей и неорганической химии
имени Н.С.Курнакова РАН

Даже если в своих научных исследованиях я не обращаюсь к Периодической таблице химических элементов явно, все же, не замечая того, постоянно сверяюсь с ней, ведь периодический закон Д.И.Менделеева наряду с теорией строения органических веществ А.М.Бутлерова, первым и вторым законами термодинамики — тот фундамент, на котором развивается современная химия.

Как преподаватель, я готовлю для работы в учебном практикуме по аналитической химии определенные смеси катионов и анионов, и, когда студенты приступают к решению практической задачи, иногда приходится давать им подсказки из Периодической таблицы. Так, ионы никеля, железа, соответствующие элементам, которые находятся в середине периода и имеют незаполненную d -орбиталь, будут образовывать комплексные соединения с объемными органическими лиганда-

ми* — например, азотсодержащими, и наоборот, ионы цинка, меди, серебра, т.е. элементов с заполненной d -орбиталью, вступят в реакцию с неорганическими ионами (например, сульфид-ионом) или серосодержащими лигандами достаточно компактного строения и т.п. По сути дела, все взаимосвязи, с которыми мы встречаемся в экспериментах, построены на периодическом законе.

Для любого химика (и для людей многих других профессий) Периодическая таблица химических элементов — инструмент, меняющийся во времени, совершенствующийся. Я полагаю, что икона — это все же что-то неизменяемое, незыблемое, чему можно поклоняться, но что нельзя использовать, а значит, в данном случае эпитет «научная икона» весьма неточен.

Существует множество современных версий Периодической таблицы: с короткими периодами (все помнят ее со школы), с длинными (активно внедряется в научную практику последние 30 лет), со сверхдлинными периодами, объемный и винтовой варианты. Но суть системы — характер периодичности свойств химических элементов — сохраняется. Подобное изменение «дизайна» Периодической таблицы возвращает к мысли о сходстве с инструментом: в зависимости от сложности задачи он может быть сконструирован тоньше или грубее, но принцип действия сохраняется. Это инструмент из числа незаменимых. Слова Менделеева о том, что периодическому закону будущее сулит только развитие, оказались пророческими. Мы этому свидетели: если около 40 лет назад Периодическую таблицу завершал 105-й элемент — нильсборий (Ns)**, то в наше время известно 118 химических элементов, и продолжается открытие новых, короткоживущих. Исследователи ждут появления более стабильных элементов, что станет очередным подтверждением периодического закона.

История и предьстория открытия этого фундаментально-



А.В.Иванов.

* Лиганд — ион или молекула, присоединяющаяся к так называемому центральному атому — иону металла-комплексообразователя, в результате образуется комплексное соединение; такие реакции очень часто применяют в химическом анализе. Неорганические лиганды, как правило, имеют более простое строение и малый объем — F^- , S^{2-} , OH^- , H_2O , NH_3 и т.д.; органические лиганды (например, бипиридил, пиридилазоафтол, этиленгликоль) отличаются существенно более сложной структурой и большим объемом.

** С конца 1990-х годов этот элемент называют «дубний» (Db).

го закона природы очень интересны. В 1829 г. немецкий ученый Иоганн Дёберейнер пришел к пониманию периодичности свойств химических элементов и попытался создать систему триад. В ряде случаев ему удалось объединить элементы в триады, в которых атомный вес «среднего» элемента равнялся полусумме первого и третьего, однако правило срабатывало не всегда: не хватало точных данных об атомных массах и свойствах элементов. В 1843 г. соотечественник Дёберейнера химик-неорганик Леопольд Гмелин предложил систему триад, тетрад и пентад элементов, также несовершенную. В 1862 г. французский исследователь Александр Шанкуртуа потерпел неудачу в попытке выстроить последовательность элементов по их атомным весам в виде спирали: в одну группу попадали элементы, совершенно разные по химическим свойствам (вероятно, потому, что еще не были открыты инертные газы, галлий, германий и т.д.). Два года спустя (в 1864–1865 гг.) британский ученый Джон Ньюлендс распределил элементы по аналогии с музыкальными октавами, поскольку заметил, что как восьмая нота повторяет первую в нотном стане, так и восьмой элемент повторяет свойства первого химического элемента и т.д. Он даже попробовал описать эту последовательность с помощью звукоряда, распределяя элементы по возрастанию атомного веса. Но... «гармония» нарушалась там, где должны были находиться еще не открытые в то время галлий и германий. Ближе всех подошел к разгадке периодичности Юлиус Майер (Германия). В 1864–1867 гг. он составил систему химических элементов, в основе которой была валентность (как известно, большинство элементов имеет несколько валентностей). И Майер не стал включать в таблицу те элементы, которые нарушали бы найденную им закономерность.

Очевидно, что в 1860-х годах назрела необходимость систематизации элементов. И именно Менделеев в 1869 г. сформулировал периодический закон в самой оптимальной форме. А через несколько лет — в 1875 г. — французский химик Лекок де Буабодран впервые получил элемент галлий, предсказанный Менделеевым.

Личность Менделеева уникальна, и очень жаль, что распространение нескольких легенд о нем — в частности, о приснившейся Периодической таблице — затмевают истину. В действительности трудная и упорная работа над Периодической системой заняла у Менделеева несколько лет, он сам писал об этом. Циклическостью изменения свойств химических элементов он заинтересовался задолго до своего открытия.

Менделеев писал некоторые свои книги как учебники. Среди них — двухтомник «Основы хи-

Периодическая система элементов по группам и рядам.

Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ											
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1		Водород. H 1,008										
2	Гелий. He 4,0	Литий. Li 7,03	Бериллий. Be 9,1	Бор. B 11,0	Углерод. C 12,0	Азот. N 14,01	Кислород. O 16,00	Фтор. F 19,0				
3	Неон. Ne 19,9	Натрий. Na 23,05	Магний. Mg 24,36	Алюминий. Al 27,1	Кремний. Si 28,2	Фосфор. P 31,0	Сера. S 32,06	Хлор. Cl 35,46				
4	Аргон. Ar 38	Калий. K 39,15	Кальций. Ca 40,1	Скандий. Sc 44,1	Титан. Ti 48,1	Ванадий. V 51,2	Хром. Cr 52,1	Марганец. Mn 55,0	Железо. Fe 55,9	Кобальт. Co 58,9	Никель. Ni 59	(Cu) 63,5
5		Медь. Cu 63,6	Цинк. Zn 65,4	Галлий. Ga 70,0	Германий. Ge 72,5	Мышьяк. As 75	Селен. Se 79,2	Бром. Br 79,96				
6	Криpton. Kr 81,8	Рубидий. Rb 85,5	Стронций. Sr 87,6	Иттрий. Y 89,0	Цирконий. Zr 90,6	Нобий. Nb 94,0	Молибден. Mo 96,0		Рутений. Ru 101,7	Родий. Rh 102,0	Палладий. Pd 106,5	(Ag) 107,9
7		Серебро. Ag 107,53	Кадмий. Cd 112,4	Индий. In 115,0	Олово. Sn 119,0	Сурьма. Sb 120,2	Теллур. Te 127		Йод. I 127			
8	Ксенон. Xe 132,9	Цезий. Cs 132,9	Барий. Ba 137,4	Лантан. La 138,9	Церий. Ce 140,2							
9												
10				Иттербий. Yb 173	Тантал. Ta 183	Вольфрам. W 184			Осмий. Os 191	Иридий. Ir 193	Платина. Pt 194,8	(Au) 197
11		Золото. Au 197,2	Ртуть. Hg 200,0	Таллий. Tl 204,1	Свинец. Pb 206,9	Висмут. Bi 208,5						
12			Радий. Ra 226		Торий. Th 232,5		Уран. U 238,5					

Высшие солеобразные окислы:
R R'O RO RO² RO³ R'O³ RO⁴
Высшие газообразные водородные соединения:
RH⁴ RH³ RH² RH

Д. Менделеев.
1869—1905.

Вариант Периодической таблицы элементов.

мии», который в СССР переиздавали в 1930–1950-х годах, как и некоторые другие его фундаментальные труды. Но по терминологии, по стилю эти работы, увы, устаревают, и сейчас, вероятно, их читают только историки науки. Периодический закон — живой, развивающийся инструмент, автор же этого великого открытия — в определенном смысле «канонизированный» ученый.



В лаборатории химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Идея периодичности естественных систем

доктор химических наук Евгений Вениаминович Бабаев,
профессор, ведущий научный сотрудник
кафедры органической химии
химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Всю свою жизнь собираю исторические факты, связанные с Д.И.Менделеевым, с родом Менделеевых и обобщаю материалы, касающиеся Периодической таблицы химических элементов. Вообще-то я мечтал стать историком, но в школе в пятом классе на меня большое впечатление произвел вечер химических опытов, а потом в книжке «Химия и радиоматериалы» я впервые увидел Периодическую таблицу Д.И.Менделеева — и это было настоящее потрясение.

В 1980-е годы меня заинтересовал вопрос: почему не предпринимаются попытки систематизации молекул по аналогии с таблицей химических элементов? И я организовал на факультете междисциплинарный семинар «Принципы симметрии и системности в химии», в котором участвовали химики, математики и минералоги, а затем опубликовал в одноименном сборнике и в книге «Философские проблемы химии» первые статьи о периодической системе молекул, предложив оригинальную версию их группировки [10, 11]. Идея заключалась не в предсказании конкретных свойств, а в том, чтобы объединить исходные молекулы в ансамбли. Отклики были самые полярные. А в 1989 г. на XIV Менделеевском съезде в Ташкенте я познакомился с профессором Алоисом Хаасом из Рурского университета в г.Бохуме (Германия), и оказалось, что мы единомышленники. Начался новый период работы — встречи с рядом зарубежных исследователей, которые также пробовали составлять периодические таблицы молекул.

Хаас занимался периодической классификацией функциональных групп органических и неорганических веществ и ввел принцип параэлементов. Он заметил, что свойства небольших одновалентных радикалов, окруженных атомами фтора (NF_2 , CF_3 , SCF_3 , $\text{N}(\text{CF}_3)_2$ и др.), очень напоминают свойства галогенов (именно так возник термин «парагалогены»). Затем оказалось, что и двухвалентные перфторированные группы напоминают кислород или серу и т.д. [12, 13]. Опираясь на выявленную аналогию, этот ученый построил периодическую систему фторсодержащих функциональных групп (параэлементов), напоминаю-

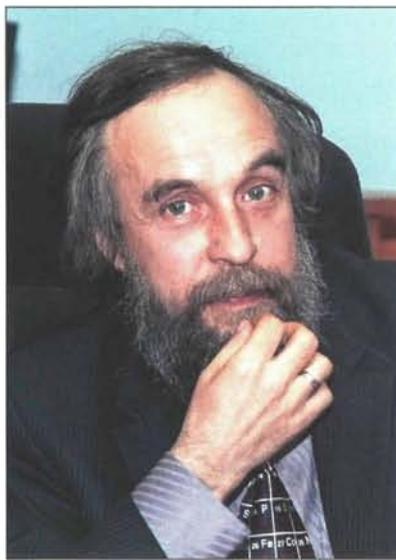
щую Периодическую таблицу Д.И.Менделеева [12] и предсказал ряд свойств новых параэлементов, а затем синтезировал неизвестные науке перфторированные соединения, образовавшие ранее не описанные подклассы веществ.

Энтузиастом поиска периодичности в молекулярной структуре веществ был американский физик Рей Хефферлин (1929–2015, Коллиджейл, США). Он строил объемные (трехмерные) таблицы двухатомных молекул [14] и методом интерполяции пытался оценить свойства неизвестных молекул.

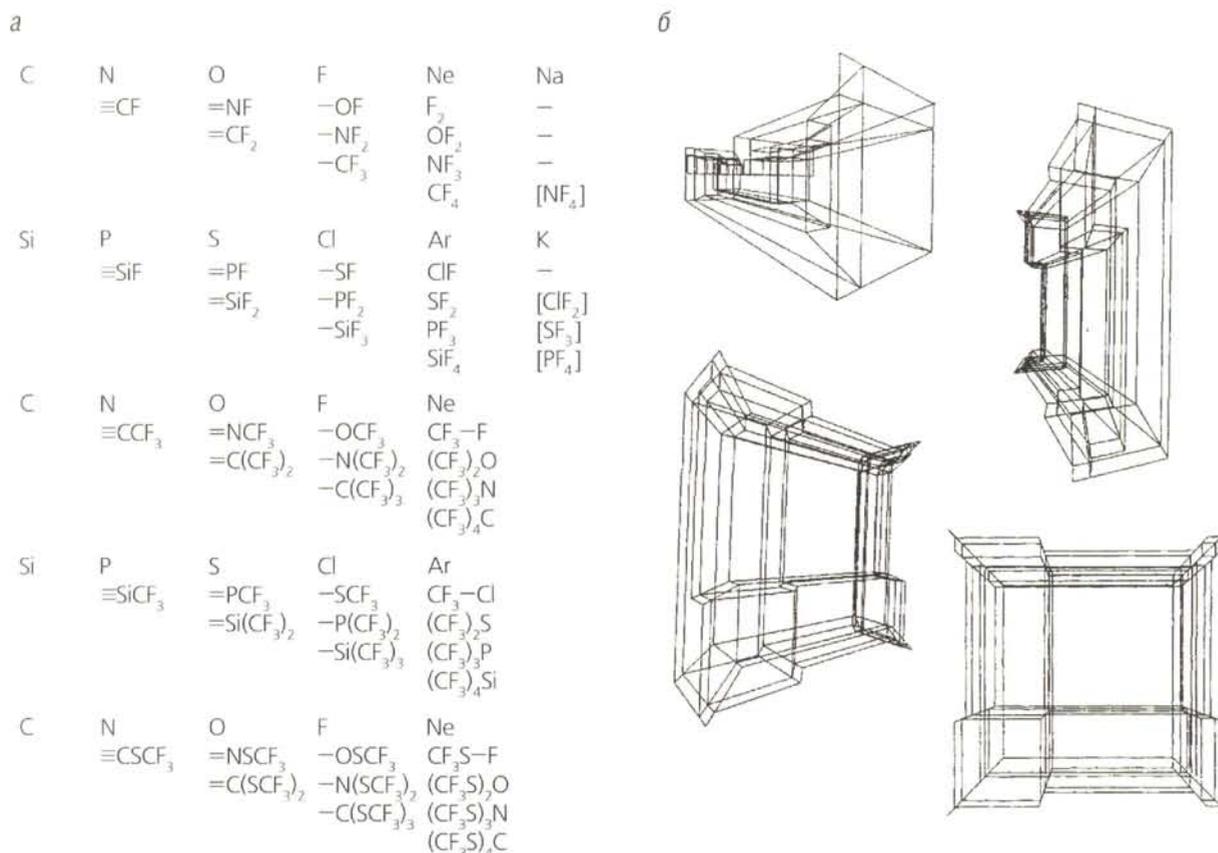
Многих ученых проблема периодических классификаций увлекала и прежде [10, 11, 14]. В начале XX в. Н.А.Морозов (1854–1946) впервые подметил аналогию между системой элементов и таблицей гомологичных рядов углеводов и использовал ее для прогноза тогда еще не открытых инертных газов. Позже советский химик-органик М.М.Шемьякин (1908–1970), немецкий исследователь Х.Г.Гримм (1887–1958) и польский химик А.И.Горский (1871–1924) пытались найти пути к решению проблемы периодической классификации [14]. По мере накопления данных о свойствах малых молекул их классификации разрабатывали такие исследователи, как С.А.Щукарёв (1864–1936), А.Ф.Конг, А.П.Монякин, В.В.Болдырев и др. Американский профессор Д.Диас из Канзасского университета предложил свой вариант периодической таблицы молекул бензеноидных углеводов, основанный на регулярной повторяемости элементов симметрии при переходе к все более сложным молекулам. Наконец, можно найти отголоски принципов молекулярной периодичности и в известном принципе изолюбальности Р.Хоффмана.

Мне повезло: я побывал на стажировках и у Хааса, и у Хефферлина, причем в соавторстве с последним мы опубликовали работу о проблеме молекулярной периодичности [14]. В основе нашего подхода (принципа гиперпериодичности, который Хефферлин любил называть «Babaev's Hyper-periodic Table» [15]) — следующая закономерность: ансамбли изовалентных молекул при внедрении группы с восемью валентными электронами порождают периодичность. Так мы описываем и обычную гомологию CH_2 -групп (так называемое правило Морозова), и принцип параэлементов Хааса (внедрение атома фтора как лиганда).

Квинтэссенцией поиска универсального подхода к систематизации молекул стала книга



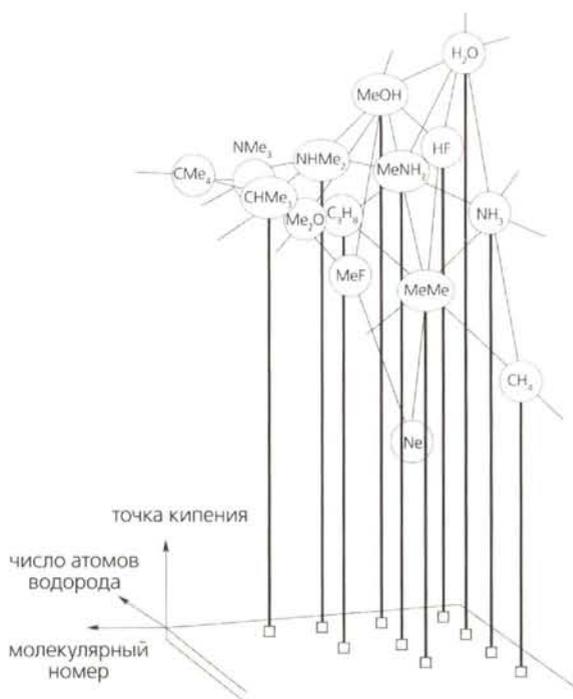
Е. В. Бабаев.



Примеры периодической классификации молекулярных структур: *а* — группировка фторсодержащих функциональных групп по принципу параэлементов Хааса; *б* — проекции четырехмерной таблицы двухатомных молекул Хефферлина в трехмерное пространство.

1999 г. «Chemical Topology: Introduction and Fundamentals», в которой мною написана глава «Интуитивные концепции химической топологии» [16]. Химическая топология — это представление структурных формул на языке теории графов и двумерных поверхностей. (Граф — абстрактный математический объект, представляющий собой множество вершин и набор ребер, т.е. соединений между парами вершин.) Показано, что ключевой инвариант химической структуры — это ее эйлерова характеристика, выводимая из баланса между числом атомов и валентных электронов или же из числа вершин, ребер и циклов молекулярного графа. Под циклами следует понимать не просто циклы разного размера, имеющиеся в молекулах, но и специфические «двучленные» (с двойными связями) и «одночленные» (с неподеленными парами электронов); чтобы их увидеть, молекулярный граф нужно в буквальном смысле «надуть» [17]. В результате можно впервые сформулировать неординарный закон о неизменности эйлеровой характеристики ансамбля молекул в ходе химической реакции.

Время от времени я читаю популярные лекции о периодичности, природной и искусственной (о том, что вообще бывает периодическим в мире), анализирую литературу, и оказывается, что постро-



цикломатическое число	***	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	не определено				
											H ⁺	H					
									Be	C	O	Ne					
					Li ₂	Be ₂	B ₂	C ₂	N ₂	O ₂	F ₂						
			Li ₂ Be	Li ₂ C	Li ₂ O	LiCN	C ₃	LiOF	BeF ₂	FNO	F ₂ O	XeF ₂					
	Li ₄				Li ₂ O ₂	LiN ₃	C ₃ N ₂	P ₄	FN ₃	BF ₃	NF ₃	ClF ₃					
Li ₄ Be							N ₃ CN	C ₃ O ₂	N ₂ O ₃	NO ₃ F	CF ₄	SF ₄	XeF ₄				
							***				CF ₃ OF	PF ₅	IF ₅				
							***				CF ₃ NF ₂	CF ₃ CF ₂	SF ₆	XeF ₆			
											***			CF ₂ CF ₂	CF ₂ SF ₂	CF ₂ XeF ₂	IF ₇
Эйлерова характеристика	***	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8		

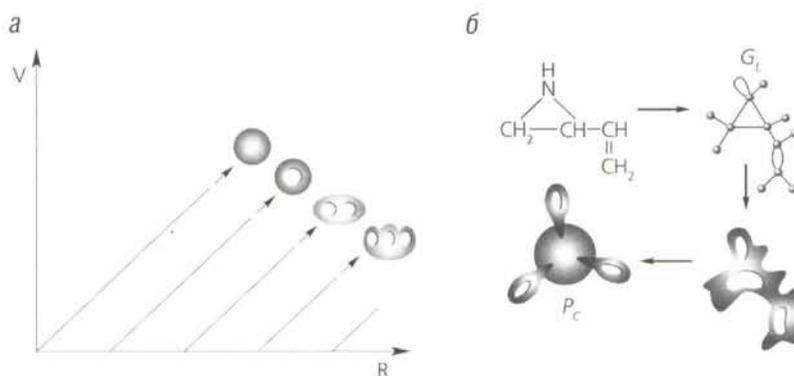
Гиперпериодическая система молекул Е.Бабаева, 1987–1994 (по: [2, 4]). Показаны родоначальники изовалентных рядов.

ение периодических систем в разных науках (например, биологии, геологии) — до сих пор открытая тема и тут возможно поступательное движение.

Периодичность в наших исследованиях иногда встречается совершенно неожиданно. Так, в начале 1990-х годов мы с коллегами нашли способ описания гетероциклических перегруппировок с помощью диаграмм (графов) [18]. И оказалось, что диаграммы — периодические. Но это не связано со свойствами элементов, из которых состоят химические вещества; в данном случае периодичность — свойство математических объектов, проявляющееся по мере их усложнения.

Говоря о Периодической таблице химических элементов, нельзя не упомянуть, что во многих странах работают ученые, увлеченные идеей улучшить ее классическую форму. Неудовлетворенность «несовершенством» облика графического изображения периодического закона присутствовала постоянно с момента его открытия и сохранилась у нескольких поколений исследователей (об этом свидетельствуют публикации в газетах и специализированных журналах, отечественных и международных, издававшихся с начала XX в. до 1980-х годов). Американский специалист по истории химии, в том числе по работам Д.И.Менделеева, Эрик Сцерри (автор множества книг о периодичности, редактор обзора «От Менделеева до Оганессона» [19]) систематически проводит конференции с участием энтузиастов упомянутой идеи. Но речь идет, скорее, о «дизайне» таблицы, а ее суть — периодичность свойств химических элементов — не может принципиально измениться. Что же касается трансформации формы, то, как правило, это делает таблицу менее понятной.

Интервью подготовила
Е.В.Сидорова



Представление структурных формул химических веществ на языке теории графов и двумерных поверхностей: а — распределение молекулярных графов по числу циклов; б — визуализация числа циклов в молекулярном графе.

Литература / References

1. Allen L.C., Knight E. Electronegativity: why has it been so difficult to define? *Journal of Molecular Structure (Theochem)*. 1992; 261: 313–330. 316–317.
2. Антипов Е.В., Путилин С.Н. Рекордсмены среди сверхпроводников. *Природа*. 1994; 10: 3–16. [Antipov E.V., Putilin S.N. Record holders among superconductors. *Nature*. 1994; 10: 3–16. (In Russ).]
3. Fedotov S.S., Khasanova N.R., Samarin A.Sh. et al. AVPO4F (A = Li, K): A 4 V Cathode Material for High-Power Rechargeable Batteries. *Chemistry of Materials*. 2016. 28(2): 411–415. Doi:10.1021/acs.chemmater.5b04065.
4. Кукушкин С.А., Осипов А.В., Феоктистов Н.А. Синтез эпитаксиальных пленок карбида кремния методом замещения атомов в кристаллической решетке кремния. *Физика твердого тела*. 2014; 56(8): 1457–1485. [Kukushkin S. A., Osipov A.V., Feoktistov N. Synthesis of epitaxial silicon carbide by the method of substitution of atoms in the crystal lattice of silicon. *Solid state physics*. 2014; 56(8): 1457–1485. (In Russ).]
5. Kukushkin S.A., Osipov A.V. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014; 47(31): 1–41. Doi:10.1088/0022-3727/47/31/313001.
6. Komkova M.A., Karyakina E.E., Karyakin A.A. Catalytically synthesized Prussian Blue nanoparticles defeating natural enzyme peroxidase. *Journal of the American Chemical Society, United States*. 2018; 140: 11302–11307. Doi:10.1021/jacs.8b05223.
7. Karyakin A.A., Gitelmacher O.V., Karyakina E.E. A high-sensitive glucose amperometric biosensor based on prussian-blue modified electrodes. *Anal. Lett.* 1994; 27(15): 2861–2869. Doi:10.1080/00032719408000297.
8. Karyakin A.A., Gitelmacher O.V., Karyakina E.E. Prussian blue based first-generation biosensor – a sensitive amperometric electrode for glucose. *Anal. Chem.* 1995; 67(14): 2419–2423. Doi:10.1021/ac00110a016.
9. Karyakin A.A., Nikulina S. V., Vokhmyanina D.V., et al. Non-invasive monitoring of diabetes through analysis of the exhaled breath condensate (aerosol) *Electrochem. Commun.* 2017; 83: 81–84. Doi:10.1016/j.elecom.2017.09.005.
10. Бабаев Е.В. Пространство изостерных ансамблей как форма естественной системы молекул. Принципы симметрии и системности в химии. Ред. Степанов Н.Ф. М., 1987; 30–52. [Babaev E.V. Space of isosteric ensembles as a form of natural system of molecules. Principles of symmetry and sistemology in chemistry. Ed. Stepanov N.F. Moscow, 1987; 30–52. (In Russ).]
11. Бабаев Е.В. Возможна ли периодическая система молекул? Философские проблемы химии. М., 1988; 35: 121–140. [Babaev E.V. Is the periodic system of molecules possible? Philosophical problems of chemistry. M., 1988; 35: 121–140. (In Russ).]
12. Haas A. Periodic system of functional groups: formalism only or heuristic principles. *Pure Appl. Chem.* 1991; 63: 1577–1590. Doi:10.1351/pac199163111577.
13. Haas A. The Element Displacement Principle: A New Guide in p-Block Elements. *Adv. Inorg. Radiochem.* 1984; 28: 167–202.
14. Babaev E.V., Hefferlin R. The Concepts of Periodicity and Hyper-Periodicity: from Atoms to Molecules. In: *Concepts in Chemistry: a Contemporary Challenge*. Ed. Rouvray D. Research Studies Press, L., 1996; 24–81.
15. *Philosophy of Chemistry: Synthesis of a New Discipline*. Eds Baird D., Scerri E., McIntyre L. Dordrecht, 2006.
16. Babaev E.V. Intuitive Chemical Topology Concepts. In: *Chemical Topology: Introduction and Fundamentals*. Mathematical Chemistry Series. Chapter 5. Eds Bonchev D., Rouvray R. 1999; 167–264.
17. Babaev E.V. The invariance of molecular topology in chemical reactions. In: *Graph theoretical approaches to chemical reactivity*. Eds Bonchev D., Mekenyan O. Seria: Understanding Chemical Reactivity. Dordrecht; Boston; L., 1994; 9: 209–220.
18. Babaev E.V., Lushnikov D.E., Zefirov N.S. Novel graph-theoretical approach to ring-transformation reactions – hierarchical-classification and computer design of heterocyclic rearrangement. *Journal of the American Chemical Society*. 1993; 115(6): 2416–2427. Doi:10.1021/ja00059a042.
19. Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table. Scerri E., Restrepo G. (eds.). Oxford, 2018.

Chemists on the Periodic Table: a Professional Tool, a Scientific Icon, or an Open Book?

E.V.Antipov^{1,3}, E.V.Babaev¹, V.P.Zlomanov¹, A.V.Ivanov^{1,2}, A.A.Karyakin¹, A.V.Shevelkov¹, A.V.Yatsenko¹

¹Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

²Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry (Moscow, Russia)

³Skolkovo Institute of Science and Technology (Moscow, Russia)

The review presents detailed and reasoned answers of the scientists of Chemical Faculty of Moscow State University to the questions of the editorial board on a role of “the main icon of chemistry” — the Periodic Table of Elements — in their scientific work; whether its value as a scientific instrument decreases at the beginning of the XXI c. The answers of the researchers are related to their specialization (inorganic chemistry, electrochemistry, analytical chemistry, organic chemistry, enzymology, etc.) and to their teaching activities. The role of the Periodic Table in the creation of new chemicals of specific value for basic research and applied problems is considered. The importance of the Periodic Table as a tool for systematization of knowledge of beginning chemists is analyzed.

Keywords: Periodic Table of Elements, D.I.Mendeleev, Faculty of Chemistry of Moscow State University.