

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ХИМИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОДГОТОВКУ ХИМИКОВ-НЕОРГАНИКОВ

Шевельков А.В., Карпова Е.В., Васильев Р.Б.

Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

DOI 10.55959/MSU012444-6-2026-22-31-51

В начале XX века все химики обсуждали одни и те же темы. Они собирались все вместе. И, как правило, успевали прочитать все текущие научные статьи. И понимали друг друга. Им не составляло труда определить, кто из них сделал удивительное открытие, произвел фантастический прорыв в химической науке, заложил основы новых направлений.

Но прошло чуть более ста лет, и мы – химики XXI века – разделились по секциям, узким специализациям, и для понимания друг друга нам потребовались посредники, а присуждение учёных степеней разделилось на отдельные фрагменты (специальности), которые невозможно было представить себе в те времена, когда присуждались первые Нобелевские премии по химии. Объём научной информации, публикуемой в тысячах статей, сейчас отдельный учёный уже физически не может воспринять.

Так что объединяет современных химиков? Конечно, это общий подход к определению, что такое химия. Это понимание фундаментальных основ химической науки. Это представление о химической базе в виде таблицы Менделеева, 150-летие которой мы отметили недавно – в 2019 году. Но это только основы. Химические специализа-

ции разошлись настолько, что мы не всегда способны понять значимость совершенных открытий, сделанных химиками различных направлений нашей науки.

И возникает вопрос – до какой степени требуется унификация подходов к нашей науке и что может сделать для этого современная система высшего химического образования? И нужно ли стремиться к тому, чтобы все химики были «на одной волне»? Это вопрос, который стоит перед высшим образованием сегодняшнего дня, но который заслонен иными представлениями, царящими в тех органах государственной власти, которые считают необходимым и возможным диктовать свои условия. Иными словами, нам предстоит определить, какова роль химических наук в современном высшем образовании, как она сочетается с изучением других естественных наук, каковы современные направления развития химической науки и что следует делать академическому сообществу для достижения важной цели – развития химического образования в условиях стремительно меняющегося общества и возникающих новых технологий.

В некоторой степени этот вопрос перекликается с тем, каковы новые направления не только в химии, но и в смежных науках, насколько междисциплинарные исследования влекут за собой изменения в учебных планах химических факультетов университетов России.

Но прежде чем ответить на поставленные вопросы, нам следует определиться, каким мы видим развитие химии, какие новые направления возникают и каковы их перспективы, какие новые задачи ставит перед химией развитие современных технологий, как современная химия взаимодействует с другими естественными науками, какие междисциплинарные направления успешно развиваются или могут быть предвидены. Помимо этого, полезно учесть, что химия последних лет неразрывно связана с науками о материалах. И это относится не только к химии как предмету высшей школы. Так сформулирован раздел классификатора Российского научного фонда, так же названо отделение Российской академии наук.

Наша статья не претендует на полный обзор современных направлений развития химии. Скорее, наша задача – привести примеры развития новых направлений, связанных с неорганической химией, и показать необходимые пути развития химического образования на современном этапе, в первую очередь приводя в пример учебные траектории, направленные на подготовку специалистов в области неорганической химии и химии неорганических материалов.

1. Развитие новых направлений

1.1. Сверхпроводимость

Новые направления в химии возникают с определённой периодичностью уже более века. Одни направления оставляют значительный след в науке и далее трансформируются в ещё более новые направления. Другие оказываются тупиковой ветвью, но тем не менее играют важную роль в развитии химии на своём временном отрезке. К первому случаю можно отнести, например, металлоорганическую химию, возникшую, по сути, ещё в XIX веке. В середине прошлого столетия на её основе возникли сразу несколько направлений – химия карбониллов, химия металлоценов, металлоорганический катализ, каждое из которых было отмечено Нобелевскими премиями по химии, причем три из них были присуждены уже в XXI веке. Другое направление – теория поляризации, которая была создана в середине прошлого века для качественного и иногда даже полуколичественного описания важных тенденций в неорганической химии на основе описания смещения электронной плотности в химических соединениях. Теория сыграла важную роль в развитии прежде всего неорганической химии, но потеряла своё значение в результате развития квантовохимических методов и кратного повышения производительности компьютеров, что позволило расчётными методами описать химическую связь в молекулах и твердых телах.

Интересным примером бурного развития химических направлений и смежных дисциплин стало открытие высокотемпературной сверхпроводимости в сложных купратах в 1986 году [1] и последовавший за ним бум исследования сверхпроводимости – от поиска новых сверх-

проводников с более высокими критическими температурами [2] до исследования физических основ сверхпроводимости, методов синтеза сверхпроводников, их устойчивости и деградации, наконец, до создания устройств и технологий. С одной стороны, решение многих химических, физических и инженерных задач позволило создать технологии производства сверхпроводящих кабелей, которые уже два десятилетия выпускаются в некоторых странах, включая Россию [3]. Но не менее важным результатом стали достижения в области неорганической химии, химии твердого тела, кристаллохимии, неорганического материаловедения, а также различных физических дисциплин, которые заложили основу новых направлений в химии и смежных дисциплинах.

Разумеется, фундаментальные исследования сверхпроводников никуда не исчезли. Поиск новых сверхпроводников с высокими критическими температурами, высокими критическими токами и полями продолжается. За последние два десятилетия найдено и исследовано немало различных сверхпроводящих соединений, которые принято группировать в семейства, основные из которых – арсениды железа и их аналоги, интерметаллиды и гидриды. Последние вызывают наибольший интерес, поскольку демонстрируют критические температуры в диапазоне 150–250 К, правда, при давлении несколько сот ГПа [4], что пока делает их применение нереалистичным.

К направлениям, выросшим из исследования купратных сверхпроводников, парадоксальным образом относится электрохимическое материаловедение, в первую очередь – разработка катодов для металл-ионных аккумуляторов [5]. С купратными сверхпроводниками их роднит общий подход к кристаллохимическому дизайну, синтезу и контролю морфологии сложных оксидов. Природа этих оксидов иная, меди они в своём составе не содержат, но общие принципы их конструирования и синтеза, а в более общем смысле – установление взаимосвязи между составом, строением и функциональными свойствами, почти во всём напоминают исследования купратных сверхпроводников в конце прошлого века.

Перечисление всех направлений, возникших в результате исследований купратных сверхпроводников, было бы очень длинным, и нет смысла упоминать все детали. Важнее то, что на рубеже веков возникло такое взаимодействие химиков, физиков и материаловедов, что представители разных специальностей стали понимать языки друг друга. Ввиду острой необходимости химии выучили язык физиков, физики – химиков, а вместе они не только стали понимать материаловедов, но и свои исследования всё больше нацеливают на разработку новых или улучшенных материалов для самых разных применений. Возникшее взаимодействие позволило объединить усилия представителей трёх разных специальностей, тем не менее в основе успешного взаимодействия лежит глубокая профессиональная подготовка химиков, физиков и материаловедов по своим специальностям.

В качестве примеров успешного объединения усилий химиков, физиков и материаловедов можно привести разработку магнитно-упорядоченных систем, материалов для спинтроники, фотокатализаторов, термоэлектрических материалов, материалов для фотовольтаики, сенсорных материалов.

1.2. Низкоразмерные системы

В конце XX века возник большой интерес к наносистемам, наноматериалам, нанохимии. Снижение размера вещества до такого состояния, когда поверхность соизмерима по размеру с объёмом, привело к целому набору новых свойств – механических, физико-химических, оптических, электронных.

Не вдаваясь глубоко в определение, что такое наноматериал или нанообъект и какие виды наноматериалов существуют, отметим, что под наноматериалами понимают такие химические вещества, хотя бы один из характерных размеров которых не превышает 100 нм [6]. Следовательно, наноматериалы могут быть классифицированы по трём группам соответственно их размерности – нольмерные, одномерные и двумерные.

Возможно, наиболее яркими представителями нольмерных наночастиц являются фуллерены, за открытие которых была присуждена

Нобелевская премия по химии [7]. Открытие фуллеренов и создало новое направление в химии, связанное с получением, изучением и применением нанобъектов. Направление развивается и в настоящее время, спустя 40 лет после открытия фуллеренов, но фокус исследований сместился в другие области. В их числе квантовые с их разнообразными применениями от фотолюминесцентных материалов, светодиодов и фотовольтаики до биомедицинских материалов и квантовых вычислений, в том числе уже вошедшие в бытовой обиход (материалы для дисплеев и телевизоров). Открытие квантовых точек, наноразмерных кристаллов полупроводников с нольмерной электронной системой, прежде всего бинарных соединений $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$, было отмечено Нобелевской премией 2023 года [8]. Заметим, премия была присуждена по химии, что отмечает именно химический аспект синтеза квантовых точек, открывший подход роста неорганических наноструктур в коллоидных системах. Этим же методом были получены также одномерные материалы (квантовые проволоки и наностержни) различных полупроводников и металлов.

Открытие фуллеренов во многом стало стартовой точкой для поиска новых аллотропов углерода, а позже и ряда других элементов, особенно IV группы, оказавшихся чрезвычайно плодотворными. В первую очередь это двумерные материалы, представляющие монослои соединений или элементов. Начало положил графен, отдельный свободно стоящий кристаллический монослой графита. Чрезвычайно высокая подвижность носителей заряда в таком, полученном весьма примитивными методами (отщеплением с помощью простого скотча), материале [9] впечатлила учёных и привела к лавинообразному потоку научных работ, а позже и Нобелевской премии по физике 2010 года для первооткрывателей. Рискнем предположить, что не последнюю роль сыграла научная смелость коллег, рискнувших сделать свободно стоящий двумерный монослой, поскольку ранее признанные корифеи науки постулировали нестабильность такой двумерной системы в свободном состоянии [10]. По всей вероятности, это сдерживало попытки экспериментальной реализации двумерных материалов в виде свобод-

но стоящих слоёв, несмотря на интересные теоретические предсказания электронных эффектов для них. Например, линейный закон дисперсии для гексагональной решётки атомов углерода в графите был теоретически предсказан ещё в 1947 году [11], а экспериментально обнаружен в графене только в 2005 году. Позже были получены и другие двумерные аллотропы разных элементов 14 группы Периодической системы (силицен, германен, станнен), а затем и 13 группы (борофен), 15 группы (фосфорен) и далее к бинарным соединениям, в первую очередь монослои слоистых дихалькогенидов переходных металлов, максены, монослои гексагонального нитрида бора, слоистые гидроксиды и многие другие соединения. Большинство этих материалов было известно химикам очень давно, однако их получение в форме монослоёв привело к целому спектру новых эффектов, обусловленных тем фактом, что все атомы находятся на поверхности, а также отсутствием влияния (например, электростатического) со стороны соседних слоёв.

Парадигма двумерных материалов привела к созданию новых устройств микроэлектроники, оптоэлектроники, фотоники, имеющих монослойную толщину и утилизирующих высокую подвижность носителей заряда, высокие анизотропные показатели преломления и высокие энергии связи экситонов при комнатной температуре вместе с монослойной толщиной. Данное направление двумерных материалов продолжает интенсивно развиваться, появляются новые весьма плодотворные идеи, например комбинации разных двумерных монослоёв могут образовывать ван-дер-ваальсовы гетероструктуры с новыми свойствами [12], причём нет ограничения на совпадение параметров кристаллических решёток, критического для классических эпитаксиальных гетероструктур.

Другой пример представляет новая степень свободы, связанная с поворотом слоев относительно друг друга, приводящая к совершенно необычным свойствам, связанным с образованием муаровых решеток, например, нестандартная сверхпроводимость в бислоях графена, повернутых на некий «магический» угол [13], причём статья 2018 года

имеет уже практически 10 тысяч цитирований. Такой подход сформировал новое направление в двумерных материалах, называемое твистроникой (twistronics), позволившее найти множество новых физических свойств в повернутых слоях. Здесь возникает интересный вопрос, а могут ли такие повернутые на магический угол двумерные слои быть интересны химикам, например для фотокатализа?

Нужно отметить, что доминирующее большинство двумерных монослойных материалов – производные слоистых кристаллов, однако есть исключения. Интересным примером такого исключения являются атомарно-тонкие свободно стоящие полупроводники неслоистых бинарных соединений $A^{II}B^{VI}$ с толщиной менее нанометра, полученные в коллоидных системах с помощью специальных подходов, подавляющих рост базальных граней [14]. Уникальной особенностью данного класса двумерных материалов является отсутствие неоднородности и разброса толщин, принципиально отличающей их от других типов наноструктур и делающей их аналогом химических соединений, то есть 2D полиморфами соединений $A^{II}B^{VI}$. Электронная структура данных материалов является аналогом полупроводниковых квантовых ям, получаемых методами молекулярно-лучевой эпитаксии и раньше являющихся делом интересов физиков. Теперь и химики могут присоединиться к изучению систем с уникальными экситонными свойствами. Высокая энергия связи экситона при комнатной температуре, превосходящая таковую для аналогов из слоистых соединений, делает этот класс двумерных полупроводников превосходным кандидатом для приложений в фотонике.

1.3. Искусственный интеллект и его роль в химии

Споры о пользе и вреде искусственного интеллекта (ИИ) и его применении в химии продолжают не первый год, однако нет сомнений в том, что ИИ внедряется в науку и будет в ней использован. Уже сегодня ярко проявляется значение ИИ в химии. В первую очередь, это относится к обработке данных. Огромное количество структур и спектров остаётся в лабораторных журналах и столах из-за невозможности описать все накопленные данные, на обработку которых не хватает

времени и «рабочих рук». Несистематизированная информация простаивает, не публикуется и не включается в общую систему научных знаний, основываясь на которой исследователи всех стран мира организуют свою научную работу, планируют эксперимент и обсуждают результаты. Роль ИИ как раз и заключается в том, чтобы на основе полученных заданий «обучиться» описанию экспериментальных данных и созданию структурированных массивов информации, пригодных для использования учёными, которые выступают в роли потребителя. В химических областях это означает анализы структурных и спектральных баз данных, обучение ИИ описывать результаты массовых экспериментов, систематизировать данные, проводить кластеризацию данных на основе их сравнительного анализа. В этом смысле ИИ становится незаменимым помощником химика-исследователя, невероятно ускоряя научный процесс. Согласно классификации академика В.П. Ананикова, эта роль выполняется ИИ-ассистентом [15].

Другая роль ИИ заключается в изыскании нетривиальной информации из имеющихся в распоряжении учёных данных. Это возможно на основе анализа огромного массива информации, который не доступен для учёного или команды исследователей ввиду непосильных временных затрат. Однако для использования такой функции ИИ требуется машинное обучение с использованием специально созданных программ, которых нет в обычном доступе (например, ChatGPT или Gemini), поэтому под каждую задачу требуется создание кодов, в основе которых лежат не только большие языковые модели, но и системные знания учёных-специалистов в конкретной области химии.

Вместе с тем нельзя не учитывать существенное препятствие на пути анализа данных при помощи ИИ, которое заключается в том, что опубликованная в научной литературе информация может быть неточной или вообще ошибочной. Следовательно, ещё одна задача, стоящая перед ИИ, это верификация данных – задача, требующая создания алгоритмов валидации данных и удаления недостоверных результатов из датасетов.

Вполне возможно, что в будущем ИИ можно будет применять для задач более высокого уровня, включая дизайн наиболее перспективных материалов на основе анализа взаимосвязи состав-структурасвойство, предлагать оптимальный путь синтеза сложных молекул и супрамолекулярных систем, определять наиболее рациональные методы анализа соединений или реакций, что, несомненно, облегчит работу химикам. Пример такого подхода хорошо иллюстрирует последняя статья в журнале Science [16], демонстрирующая поиск и открытие металлический тета-фазы нитрида тантала с исключительно высокой, рекордной теплопроводностью, почти втрое превышающей теплопроводность меди. Это открытие стало возможным благодаря сочетанию эксперимента с теоретическим поиском и предсказанием. Вместе с тем полагать, что ИИ заменит химика-исследователя, на сегодня оснований нет. Для решения этой задачи не только потребуются создание робота-исследователя, управляемого при помощи ИИ. Потребуется разработка совершенно новой системы проведения химического эксперимента, которая будет учитывать принципиальные различия в механике и логике работы человека и робота.

Но в любом случае необходимо понимать, что в словосочетании «искусственный интеллект» слово «искусственный» является ключевым. ИИ не является интеллектом в обычном понимании этого слова. ИИ основан на больших языковых моделях, поэтому ему присуща чёткость операций, основанная на точно заданной задаче и огромной скорости вычислений, а вот такие особенности человеческого мозга, как интуиция, озарение, гениальность никакому ИИ не подвластны. Поэтому роль ИИ в науках, включая химию, заключается в помощи исследователю в обработке и анализе данных. Генерация идей и развитие новых направлений в науке на долгие годы останется прерогативой человека. Поэтому никакой ИИ не заменит профессионально подготовленных химиков. Но вместе с тем, чем большей и более систематизированной информацией будет обладать учёный-химик, тем вероятнее и успешнее будет его прорыв в создании новых направлений в химии и науках о материалах.

И всё же приходится отмечать, что ИИ не всегда друг и помощник учёного. Известны многочисленные случаи неправомерного использования ИИ. Это может быть написание курсовых, дипломных работ и научных статей. Известны примеры поступления написанных ИИ статей в научные журналы. Статьи внешне выглядят научными и написанными, казалось бы, профессиональным языком, но в целом не имеют смысла, в них при соблюдении всех формальных требований отсутствует целеполагание и нет обоснованного заключения, да и содержание зачастую бывает абсурдным. Наконец, они полны ссылками на несуществующие статьи или публикации, не имеющие отношения к тематике представленной статьи. В настоящее время уже существуют доступные онлайн механизмы, позволяющие распознавать фальшивые научные работы.

Однако полностью исключать ИИ при подготовке научных трудов не имеет смысла. С помощью ИИ можно систематизировать научную литературу, обрабатывать массивы экспериментальных результатов. При этом задача исследователя заключается в анализе материала, подготовленного с помощью ИИ, его осмысление, составление заключения и, при возможности, прогнозов дальнейшего развития темы. Разумеется, существуют и будут существовать работы, непосредственно связанные с применением ИИ (машинного обучения) в химии.

1.4. Моделирование

Компьютерное моделирование в химии возникло более 50 лет назад. Одной из главных задач, им решаемых, стало полуколичественное, а затем и количественное описание химической связи в молекулах и твёрдых телах. В середине 60-х годов XX века Роальд Хоффман предложил простой метод оценки энергии орбиталей и вкладов атомных орбиталей в них, названный расширенным методом Хюккеля (PMX), за что в 1981 году был удостоен Нобелевской премией по химии [17]. PMX имеет ряд ограничений, вытекающих из заложенного в него пренебрежения межэлектронными и межъядерными взаимодействиями, из-за чего он не может воспроизводить равновесные межатомные расстояния. Вместе с тем PMX позволяет правильно опреде-

лять относительную энергетическую последовательность молекулярных орбиталей и полуколичественно устанавливать вклад атомных орбиталей в молекулярные орбитали для молекул с невысокой ионностью химической связи. Метод завоевал всеобщее признание химиков и был массово применявшимся рабочим инструментом вплоть до начала XXI века, когда более сложные расчётные методы, учитывающие интегралы межэлектронного взаимодействия, стали доступны ввиду повышения производительности вычислительных систем.

Пройдя через несколько этапов развития, связанных с применением разных подходов и моделей к описанию электронного строения молекул и твёрдых тел, в последние годы моделирование перешло на качественно новый уровень, затрагивающий тенденции в группах и периодах Периодической системы химических элементов (ПС). В декабре 2025 года опубликована статья группой под руководством профессора А.Р. Оганова, в которой представлена модель, объясняющая периодичность в реакционной активности элементов (простых веществ) ПС Д.И. Менделеева [18]. Хорошо известно, что концепция разности электроотрицательностей элементов как движущая сила реакционной способности, выдвинутая Полингом, не выдерживает критики из-за малой предсказательной силы. Более того, давно замечено, что периодичность изменения фундаментальных свойств в группах и периодах, таких как атомный радиус, первый потенциал ионизации или сродство к электрону, не соответствует специфической реакционной активности элементов. Ярким примером служит тот факт, что щелочные металлы литий, калий, рубидий и цезий интеркалируются в межслоевое пространство графита, а натрий – нет.

Парадоксальный ответ на вопрос, что лежит в основе реакционной способности химических элементов (простых веществ), заключается в том, что необходимо сопоставить электроотрицательность элемента и сопротивление атома элемента деформации электронной оболочки. Основываясь на такой модели, поддержанной анализом огромного массива данных, коллектив А.Р. Оганова смог с очень высокой точностью объяснить различную реакционную способность элемен-

тов. Например, разработанная модель объясняет, почему щелочные металлы менее реакционноспособные по отношению к переходным металлам, чем, например, галлий или олово.

Вероятно, в ближайшем будущем возникнет много моделей, основанных на обработке большого объёма данных (не иначе как с использованием ИИ), которые существенным образом приблизят нас к пониманию того, когда и в каком виде мы должны ожидать образования соединений в сложных системах. Уже сегодня понятно, что в неорганической химии (скорее, химии твёрдого тела) возникла задача направленного получения новых полярных интерметаллических соединений как функциональных материалов ближайшего будущего. В отличие от понятных всем неорганических и координационных соединений интерметаллиды не описываются простыми валентными соотношениями и в то же время не относятся к «электронным» металлам, описываемым правилами Юма-Розери. Задача направленного синтеза полярных интерметаллидов с заданными свойствами осложнена сочетанием локализованных и делокализованных ковалентных связей, и для решения этой задачи требуется найти оригинальные подходы к моделированию.

2. Обучение химиков-неоргаников

В последние годы в подготовку химиков в МГУ внедрён учебный план «2+2+2», который подразумевает общее обучение всех студентов в течение двух лет, переход на две траектории после второго курса (одна из них ориентирована на химию органических и живых систем, а вторая – на физико-химию материалов) и распределение по специализациям, не обязательно связанным с кафедрами химического факультета МГУ, на двух старших курсах.

Наша задача заключается в том, чтобы определить место неорганической химии и химии неорганических материалов на второй и третьей частях этого учебного плана, установить, какие неорганические и смежные предметы должны преподаваться студентам, выбравшим это направление, чтобы сформировать компетентных специали-

стов в неорганической химии и связанных с ней смежных дисциплинах.

Изменения учебного плана коснулись всех курсов обучения студентов. Если рассматривать каждое нововведение отдельно, то оно не всегда кажется кардинальным, но если рассматривать все изменения учебного плана вместе, то заметны очень серьёзные изменения.

В первом семестре обучения изменения курса неорганической химии не коснулись, и бывших школьников, как всегда, встречают и начинают учить преподаватели кафедры неорганической химии. По курсу неорганической химии в неделю 4 часа (2 пары) лекций, 3 часа (1,5 пары) семинаров и два дня (8 часов, по 2 пары в день) практикума. В этом же семестре введён новый курс – «Химический факультет: вчера, сегодня, завтра», в рамках которого студенты первого курса узнают про все кафедры химического факультета. В рамках этого курса появляется возможность рассказать об истории, успехах, научных перспективных работах, активно проводимых на кафедре неорганической химии. Эта информация поддерживается публикациями на официальном сайте кафедры, различных интернет-ресурсах кафедры и социальных сетях. Используя полученную в курсе информацию, студенты 1 курса распределяются на ознакомительную практику на выбранную кафедру факультета. Число студентов, которых может принять кафедра неорганической химии, нормировано и рассчитывается руководством факультета.

Необходимость включить в учебный план различные новые предметы привела к тому, что уже во втором семестре на курс «Неорганическая химия» число часов было уменьшено, сокращению подверглись как лекционные, так и семинарские занятия. Это, безусловно, усложняет задачу обучения курсу, но готовность и работа преподавателей кафедры со студентами в свободное время – консультации, дискуссии и пр. позволяют поддерживать обучение на высоком уровне. Также во втором семестре студенты выполняют свою первую курсовую работу – по неорганической химии, в рамках которой учатся научной работе: проведению поиска и анализа литературы, планиро-

ванию и выполнению неорганического синтеза, анализу полученного соединения, анализу, оформлению и представлению своих результатов в печатном виде и в виде презентации с докладом. Лучшие работы участвуют в конкурсах курсовых работ. Победители конкурса, будучи уже студентами второго курса, делают доклады перед новыми студентами первого курса в осеннем семестре. К конференции победителей конкурса курсовых работ мы относимся очень серьезно, поскольку на конкретных примерах студенты первого курса видят, как должны быть представлены в конце первого года обучения курсовые работы по неорганической химии. Представленные работы победителями конкурса курсовых работ – это также и реклама тех научных групп, где выполнялись лучшие курсовые работы, и это показывает первокурсникам, как много новых знаний и практических умений приобретают наши студенты к окончанию первого курса. В весеннем, втором, семестре появились новые элективные курсы, или иначе – курсы по выбору. Один из этих курсов – «Введение в химию материалов» курирует кафедра неорганической химии. Он нацелен, в том числе, и на ориентацию на работу в области неорганической химии и родственных ей областей. Этот серьезный курс для студентов-первокурсников читается ведущими сотрудниками кафедры неорганической, общей, коллоидной химии, радиохимии, электрохимии, кафедры высокомолекулярных соединений и кафедры химической технологии и новых материалов.

Окончание первого курса не означает полное расставание с неорганической химией. В третьем семестре у студентов среди появившихся в учебном плане элективных курсов есть два курса преподавателей кафедры неорганической химии: «От химии твёрдого тела к современным неорганическим материалам» и «Неорганические и координационные соединения». Мы рады, что все эти три перечисленных выше элективных курса – серьезных, хорошо продуманных, и подготовленных для студентов первого и второго курса, пользуются большой популярностью у студентов химического факультета. Посвящать в неорганическую химию также удаётся и в рамках обязательного курса «Научно-исследовательская работа» студентов второго курса. Про-

должают свою исследовательскую работу многие студенты, выполнявшие ранее курсовую работу как на кафедре неорганической химии, так и на других кафедрах. В четвертом семестре студенты выполняют курсовую работу по аналитической химии, но в то же время есть работы по неорганической химии.

В пятом семестре также существует обязательный курс «Научно-исследовательская работа», в рамках которого студенты могут работать на кафедре неорганической химии, и мы видим большой интерес студентов к проведению исследований на кафедре. В шестом семестре в курсе «Определение структуры веществ и материалов» нового модуля «Инструментальные методы в химии» кафедра неорганической химии ведёт три блока: по порошковой рентгеновской дифракции, термическому анализу и электронной микроскопии. Этот курс читается для обоих потоков студентов, на которые, как было уже сказано, разбивается курс студентов с третьего года обучения.

Распределение на кафедры происходит теперь позже – в 7 семестре, курсы специализации появляются только с 8 семестра. Различия в учебных планах будут до 9 семестра, и поэтому только для потока студентов, выбравших направление физико-химического изучения материалов, в 8 семестре будет прочитан сотрудниками кафедры неорганической химии совместно с преподавателями физического факультета курс «Физика и химия твердого тела». Безусловно, каждый из перечисленных курсов на всех годах обучения будет показывать новые аспекты неорганической химии – синтез, получаемые продукты, их свойства и возможные применения.

Курсы специализации начинаются с восьмого семестра, но глобальное погружение в специализацию начнётся, конечно, с девятого семестра. И здесь тоже произошли изменения. На химическом факультете созданы укрупнённые специализации, в которые объединены дипломики сразу нескольких кафедр. Кафедра неорганической химии является базовой кафедрой для специализации «Химия неорганических веществ и материалов». В рамках этой специализации будут также обучаться студенты кафедр общей химии, часть дипломников ка-

федр химической технологии и новых материалов, радиохимии, электрохимии. В рамках укрупнённых специализаций будут реализованы как общие межкафедральные курсы, так и более узконаправленные спецкурсы, читаемые сотрудниками перечисленных кафедр.

Необходимый набор спецкурсов дипломники смогут выбрать, руководствуясь задачами и потребностями, которые возникают при выполнении ими дипломных работ. Курсы «Введение в специализацию» и спецпрактикум «Методы исследования» позволят студентам кафедры неорганической химии не только изучить теоретические основы методов, но и применять на практике наиболее востребованные методы исследования веществ и материалов. Курсы «Современная неорганическая химия» и «Фундаментальные основы неорганического синтеза», преподавание которых основывается на знаниях студентов, полученных ранее во всех базовых курсах первых четырёх лет обучения, дадут знания о современном состоянии науки, необходимых теоретических подходах в современных исследованиях. Полученные знания студенты закрепят и разовьют на практических занятиях в спецпрактикуме «Методы исследования неорганических веществ и материалов».

Большой набор спецкурсов по выбору, которые предлагают и сотрудники кафедры неорганической химии, и сотрудники кафедр, которые относятся к этой же специализации, обеспечивают выпускникам получение блестящей подготовки и позволяют проводить актуальные исследования, получать конкурентоспособные результаты своей научно-исследовательской работы. Подготовка высокого уровня позволяет нашим дипломникам к окончанию обучения иметь в своём портфолио не только выступления на конференциях «Ломоносов» (ежегодно проводится Московским университетом), школе молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии» (ежегодно проводится кафедрой неорганической химии), других Российских и зарубежных конференциях, но и иметь публикации одной или нескольких статей в ведущих Российских и зарубежных журналах, специализирующихся на неорганической химии и смежных областях химии.

Курсы учебного плана, в которых освещаются различные аспекты неорганической химии, представлены в таблице.

Таблица

Курсы, посвящённые различным аспектам неорганической химии
(продолжительность семестра 18 недель)

Курс	Форма отчёта	Семестр	Лекции, час/нед.	Семинары, час/неделя	Лаб. работы, час/нед.
Неорганическая химия	экзамен	1	4	3	
Лабораторные работы по неорганической химии	зачёт	1			8
Химический факультет: вчера, сегодня, завтра (1 лекция)	зачёт	1	2		
Ознакомительная практика (часть курса)	зачёт	1			2 (самост. работа)
Неорганическая химия	экзамен	2	2	2	
Лабораторные работы по неорганической химии	зачёт	2			8
Курсовая работа по неорганической химии	экзамен	2			3 (самост. работа)
Элективный курс «Введение в химию материалов» (по выбору)	зачёт	2	3		
Элективный курс «От химии твёрдого тела к современным неорганическим материалам» (по выбору)	зачёт	3	3		
Элективный курс «Неорганические и координационные соединения» (по выбору)	зачет	3	3		

Курс	Форма отчёта.	Семестр	Лекции, час/нед.	Семинары, час/неделя	Лаб. работы, час/нед.
НИР	зачёт	3, 5, 9, 10, 11, 12			
Определение структуры веществ и материалов	зачёт	6	2	1	
Химия и физика твёрдого тела (14 недель)	экзамен	8	3	2	
Введение в специализацию «Химия неорганических веществ и материалов» (14 недель)	зачёт	8	2	1	
Современная неорганическая химия	экзамен	9	3	1	
Фундаментальные основы неорганического синтеза	экзамен	9	4	1	
Спецпрактикум «Методы исследования»	зачёт	9			4
Спецпрактикум «Химические методы синтеза неорганических веществ и материалов»	зачёт	10			6
Дисциплины специализации по выбору студента	экзамен, зачёт	10, 11 10,10,11	10	6	
Семинар по специализации «Химия неорганических веществ и материалов»	экзамен	12	2		
Научный семинар	зачёт	11		2	
Преддипломная практика	экзамен	12			

Безусловно, происходящие изменения в обществе, мире, потребностях производителей, ситуации на рынке труда и т. д. диктуют новые запросы, и мы должны готовить выпускников, способных ответить на эти вызовы. Специалисты-неорганики нужны для решения многих вопросов, большое число высших учебных заведений Российской Федерации готовит выпускников по данному направлению. Во многих вузах имеются интересные наработки, а изменения, происходящие в Московском университете, всегда интересны и важны для высшего образования. Вопросы преподавания неорганической химии, изменения учебного плана, новые технологии в обучении активно обсуждаются на совещаниях заведующих кафедрами неорганической химии университетов России. Не было исключением и проведённое в 2025 году на базе кафедры неорганической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова VIII совещание, на котором рассматривались вопросы преподавания курса неорганической химии во взаимосвязи с современной химией и науками о материалах.

Вместо заключения

Неорганическая химия как дисциплина продолжает развиваться, являясь основой для изучения химии. Помимо основ, закладываемых с помощью Периодического закона, неорганическая химия обеспечивает развитие новых направлений в современном естествознании, которые, пройдя апробацию временем, становятся частью специальных дисциплин будущих химиков-неоргаников. Мы не можем предсказать, какие новые направления неорганической химии возникнут в грядущие десятилетия. Тем не менее мы можем ожидать, что при правильной постановке задачи и разумном развитии высшего химического образования в стране любые достижения неорганической химии будут учтены в учебных планах и рабочих программах курсов, обеспечивая высочайший уровень химического образования, частью которого была, есть и будет неорганическая химия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bednorz J. G., Müller K. A.* "Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system". *Zeitschrift für Physik B.* 64 (1986): 189–193.

2. *Putilin S.N., Antipov E.V., Chmaissem O., Marezi M.* Superconductivity at 94 K in $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$. *Nature*. 362 (1993): 226–228
3. <https://www.superox.ru/>.
4. *Drozhdov A.P., Kong P.P., Minkov, V.S., Besedin S.P., Kuzovnikov M.A., Mozaffari S., Balicas L., Balakirev F.F., Graf D.E., Prakashenka V.B., Greenberg E., Knyazev D.A.; Tkacz M., Eremets M.I.* "Superconductivity at 250 K in Lanthanum Hydride under High Pressures". *Nature*. 569 (2019): 528–531.
5. *Li M., Lu J. Chen Z., Amine K.* "30 Years of Lithium-Ion Batteries". *Advanced Materials*. 30 (2018): 1800561.
6. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2014-102/default.html>.
7. https://web.archive.org/web/20071011035122/http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1996/index.html.
8. *Sarma D.D., Kamat P.V.* 2023 Nobel Prize in Chemistry: A Mega Recognition for Nanosized Quantum Dots. *ACS Energy Lett.* 8 (2023) 5149–5151.
9. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. 306 (2004) 666–669.
10. *Landau L.D.* *Phys. Z. Sowjetunion* 11 (1937) 26.
11. *Wallace P.R.* The Band Theory of Graphite. *Phys. Rev.* 71 (1947) 622–634. (1947).
12. *Liu Y., Weiss N., Duan X.* et al. Van der Waals heterostructures and devices. *Nat Rev Mater* 1 (2016), 16042.
13. *Cao Y.; Fatemi V., Fang S.* et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature* 556 (2018) 43–50.
14. *Kurtina, D.A.; Garshev, A.V.; Vasil'eva, I.S.; Shubin, V.V.; Gaskov, A.M.; Vasiliev R.B.* Atomically-thin population of colloidal CdSe nanoplatelets: growth of rolled-up nanosheets and strong circular dichroism induced by ligand exchange. *Chem Mater*. 31 (2019) 9652–9663.
15. <https://chemrxiv.org/engage/api-gateway/chemrxiv/assets/orp/resource/item/686007901a8f9bdab570bfe6/original/classification-of-artificial-intelligence-applications-in-chemistry-from-automation-to-digital-scientific-thinking.pdf>.
16. *Li S.; et al.,* Metallic θ -phase tantalum nitride has a thermal conductivity triple that of copper. *Science*, eaeb1142 (2026) DOI:10.1126/science.aeb1142.
17. https://web.archive.org/web/20150328010319/http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1981/hoffmann-bio.html.
18. *Oganov A.R., Kostenko M.G.,* Simple electronegativity-based model for predicting formation of stable compounds across the periodic table. *Nat Commun* 17 (2026) 929.