



УДК 378.147

<https://www.doi.org/10.33910/3034-4255-2025-2-1-38-45>

Внедрение информационных технологий в преподавание общей химии в педагогическом вузе

Т. Б. Бойцова✉, Е. З. Власова, В. В. Горбунова, Е. И. Исаева, А. Н. Лёвкин

Аннотация. В статье рассматривается опыт внедрения различных типов цифровых технологий в курс общей химии для обучающихся по направлению «44.03.05 Химическое образование. Информатика и информационные технологии в образовании» в Российском государственном педагогическом университете им. А. И. Герцена. Подведены итоги использования таких технологий обучения, как цифровые инструменты для визуализации химических объектов, работа с открытыми цифровыми базами данных, применение виртуальных лабораторий, знакомство с методами вычислительной химии и т. д. Роль инструментов для визуализации заключается в том, чтобы сделать абстрактные химические понятия наглядными. Открытые цифровые базы представляют мощный источник для поиска необходимой для сравнительного анализа и исследовательской работы информации о строении и свойствах химических соединений. Автоматизация многочисленных вычислений, обработка экспериментальных данных, визуализация результатов, их обобщение и создание отчетности с помощью компьютера вычислительных методов. Показана роль информационных технологий в популяризации химических исследований и в осуществлении научно-исследовательской работы. В статье ставится вопрос о рациональном соотношении реального и цифрового виртуального эксперимента. Установлено, что внедрение информационных технологий повышает интерес к изучаемому предмету, облегчают процесс обучения и способствуют повышению успеваемости.

Ключевые слова: информационные технологии, цифровые ресурсы, преподавание химии, базы данных, виртуальная лаборатория

Implementation of information technology in teaching general chemistry at pedagogical university

T. B. Boitsova✉, E. Z. Vlasova, V. V. Gorbunova, E. I. Isaeva, A. N. Levkin

Abstract. The article discusses the experience of introducing various digital technologies into the general chemistry course for students majoring in program '44.03.05 Chemical Education. Computer Science and Information Technologies in Education'. The study examines the application of digital visualization tools, open-access chemical databases, virtual laboratory environments, and computational chemistry methods in chemical education. Digital visualization tools transform abstract chemical concepts into interactive, comprehensible formats, while open chemical databases provide essential structural and physicochemical data for comparative analysis and research projects. Automation of numerous calculations, processing of experimental data, visualization of results, their generalization and creation of reports using computer computational methods. Thus, information technology facilitates chemical research and promotes its outcomes. The article places a particular focus on determining the optimal balance between traditional laboratory work and digital experimentation. Results indicate that information technologies increase student motivation, facilitate learning and contribute to improved academic performance.

Keywords: information technology, digital resources, chemistry education, databases, virtual laboratory

Бурное развитие цифровых технологий в последнее десятилетие оказало влияние на все стороны жизни, в том числе и на сферу химического образования. Наличие в арсенале обучающихся смартфонов, планшетов, ноутбуков и прочих гаджетов открыло преподавателям широкие возможности для их использования в учебном процессе, как непосредственно на занятиях, так и в удаленном режиме. Встроенные в современные технологические платформы адаптивные системы обучения с обратной связью в реальном времени, персонализируют процесс обучения (Eitemüller et al. 2023), позволяя студентам продвигаться в усвоении дисциплины в своем собственном темпе и получать рекомендации по системе «точно в срок» в соответствии с индивидуальными особенностями (Solikhin et al. 2019). Возможности, которые предоставляют информационные ресурсы, при правильном использовании делают сложные химические концепции более доступными для понимания и усвоения студентами, повышают интерес к изучаемому предмету, облегчают процесс обучения и способствуют повышению успеваемости. В цифровую эпоху развитие критического мышления и аналитических навыков у студентов (Kosmodemyanskaya et al. 2022; Vardanyan 2023), воспитание поколения опытных химиков, нацеленных на решение сложных научных задач (Mahbub et al. 2024) базируется на использовании цифровых технологий.

Для подготовки будущих учителей химии важно внедрять цифровые ресурсы в учебный процесс уже на первом курсе обучения, а именно при изучении общей химии, поскольку овладение методами интеграции технологий в преподавание химии не только расширяет теоретические знания будущих учителей, но и способствует развитию их профессиональной компетентности.

Целью данной работы является анализ возможностей интеграции различных типов цифровых технологий в курс общей химии для обучающихся по направлению «44.03.05 Химическое образование. Информатика и информационные технологии в образовании» для повышения вовлеченности студентов в процесс обучения.

Достижения в области цифровизации сделали возможным поддержку процессов обучения различными способами. В преподавании химии получили развитие следующие типы цифровых технологий: (1) цифровые инструменты для визуализации (Hati, Bhattacharyya 2016), (2) открытые цифровые базы данных (Battle et al. 2010), (3) вычислительные методы (Tuvi-Arad, Blonder

2019), (4) виртуальные лаборатории и видеозаписи химических экспериментов (Hou et al. 2023). Также большую роль информационные технологии играют в популяризации химических исследований в повседневной жизни (Khada-povich 2016) и в осуществлении научно-исследовательской работы в области химии.

Рассмотрим, как реализуются перечисленные технологии в преподавании курса общей химии на кафедре неорганической химии РГПУ им. А. И. Герцена.

Цифровые инструменты для визуализации

Понимание химии студентами основано на их умении воспринимать информацию на трех уровнях: макроскопическом, микроскопическом и символьном. Восприятие, макроскопических объектов — химических веществ, оборудования и т. д., как правило, не вызывает трудностей у обучающихся. Вместе с тем, химия включает в себя множество абстрактных понятий, поэтому для многих студентов процесс понимания химических превращений на микроскопическом уровне часто является сложной задачей. Как раз помочь решить эту задачу, а именно «сделать объекты видимыми для глаз», призваны цифровые инструменты для визуализации химических структур и процессов. Подобно известной поговорке «Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать» хорошо разработанные интерактивные и трехмерные инструменты визуализации в химии обеспечивают четкий и интуитивно понятный вид часто очень сложных химических структур, систем и процессов. Например, компьютерное 3D моделирование атомных орбиталей при изучении тем «Строение атома», «Химическая связь» и пр. позволяет наглядно представить эти объекты в пространстве, помогая сделать их более осязаемыми для студентов. Простейшей, но наглядной программой для визуализации молекул является ChemTube3D — открытый образовательный ресурс, содержащий обширную коллекцию 3D-структур от атомных орбиталей, до сложных решеток кристаллических неорганических веществ, а также тренажер по правилам техники безопасности при выполнении лабораторных работ по общей химии «Bad Lab». Также весьма информативны бесплатные информационные ресурсы с открытым кодом — Jmol и IQmol для просмотра химических 3D структур (Hanson et al. 2013). Средства визуализации весьма удобны, поскольку могут быть задействованы с любого гаджета во время занятий и при подготовке к ним. Кроме того,

освоив данные программы в процессе обучения, студенты эффективно применяют их на педагогической практике в школе, а также в последующей педагогической деятельности на уроках и факультативах.

Открытые цифровые базы данных

В эту категорию входят химические базы данных соединений, их свойств и реакционной способности, с одной стороны, и профессиональные словари, энциклопедии и публикации, с другой стороны. В своей совокупности — это мощные источники данных по всем химическим отраслям. Основной проблемой современных студентов является несформированность навыков ориентирования и поиска нужных сведений в постоянно пополняющихся и развивающихся профессиональных базах данных. В связи с этим целесообразно затрагивать вопросы анализа и областей применения химических баз данных уже на начальных курсах обучения.

Различают три основных типа баз данных (Tuvi-Arad, Blonder 2019): (1) базы данных, которые содержат различные химические, физические и спектральные данные для большого набора соединений (например, NIST Chemistry WebBook, Crystallography Open Database, ChemSpider); (2) базы данных, которые включают в себя информацию о химических реакциях и помогают планировать синтезы (например, SciFinder, Reaxys), (3) текстовые ресурсы, направленные на пояснение терминов, процессов и т. д. (например, Википедия, The IUPAC Gold book, Encyclopedia Britannica). Не все из представленных выше баз имеют бесплатный доступ для преподавателей и студентов и не все профессиональные базы необходимы в подготовке учителя химии. Тем не менее важным является формирование у будущего учителя поисковых компетенций и осведомленности о возможностях больших данных. Умение находить и правильно использовать справочные данные (значения стандартных окислительно-восстановительных потенциалов, термодинамические величины, константы растворимости и т. п.) формируется во всех разделах общей химии при выполнении расчетов, связанных с определением возможности протекания химических реакций, условий выпадения осадков, предсказанием свойств веществ при изучении периодического закона и т. п.

Кроме перечисленных баз, наиболее востребованными у студентов ресурсами являются Периодические таблицы WebElements и Chemicool, в которых основные сведения об элементах дополнены историческими справками и инте-

ресными фактами. Однако информация в этих таблицах иногда не совпадает. Так, например, температура плавления и количество изотопов алюминия согласно WebElements составляют 2519 °С и 7, в то время как по Chemicool 2466.85 °С и 15, соответственно. Подобные расхождения используются на занятиях в качестве примера необходимости тщательной проверки точности и надежности источников данных. Поэтому дополнительная ценность использования цифрового контента заключается в критическом мышлении, которое студенты применяют при поиске нужной информации, отборе данных и их анализе.

В качестве текстового ресурса, необходимо для подготовки докладов, презентаций и поиска дополнительной информации по изучаемому материалу, у студентов-первокурсников популярны Википедия и XuMuK, содержание статей которых также требует критического отношения. Кроме встречающихся химических «ляпов» информация на сайтах часто не отражает современных достижений науки, требует обновления и актуализации. В рамках курса общей химии студентов знакомят с сайтом CoLab и порталом Chemnet.ru, которые содержат не только электронную библиотеку и электронные версии химических журналов, но и лекции известных ученых, информацию о химических олимпиадах и т. д., базой «Электронная библиотека по химии и технике», содержащей коллекцию журналов, научных статей, электронных версий учебников, справочников и т. д. по всем разделам химии, научной электронной библиотекой eLIBRARY.RU, сайтом freechemistry.ru со справочными данными о химических и физических свойствах веществ.

Многообразие ресурсов побуждает тщательно «фильтровать» информацию и источники ее предоставления. Только овладев такими компетенциями, учитель сможет научить своих учеников искать и извлекать информацию, вдохновить их думать и работать как профессиональные химики.

Использование вычислительных методов

Важнейшим направлением включения информационных технологий в обучение химии является автоматизация многочисленных вычислений, обработка экспериментальных данных, визуализация результатов, их обобщение и создание отчетности с помощью компьютера. Решение подобных задач можно начинать с использования электронных таблиц Excel.

Использование этой программы существенно ускоряет процесс работы с химическими данными. Даже начинающий пользователь сможет автоматизировать такие вычисления, как расчет значений молярной массы, количества и концентрации веществ, расчеты с использованием константы равновесия и т. д. Продвинутого пользователя с помощью этой программы сможет обрабатывать результаты экспериментов, рассчитывать статистические показатели, анализировать отклонения и строить графики, создавать диаграммы для визуализации результатов экспериментов. Мощным инструментом для анализа больших объемов данных станут сводные таблицы, которые позволят выявлять тренды и закономерности. Использовать можно как саму программу Excel пакета Microsoft Office, так и ее аналог Calc пакета OpenOffice.

Работа с этими программами может стать первым знакомством с вычислительной химией — областью химии, использующей законы теоретической химии в специальных компьютерных программах для расчетов структуры и свойств химических объектов, таких как молекулы, ионы и т. д. В таких программах также рассчитываются и моделируются химические процессы, планируются синтезы, осуществляется поиск в базах данных комбинаторных библиотек (их также называют библиотеками молекулярных структур и базами данных химических соединений). Вычислительная химия использует математические алгоритмы, элементы статистики, интегрируя теоретическую химию, моделирование и экспериментальные наблюдения (Sendlinger et al. 2008).

Для моделирования молекул используются такие программы как HyperChem (химические вычисления, молекулярная механика, динамика сложных молекул), Chem3D (моделирование сложных трехмерных структур и графическое их представление), Crystal Impact Diamond (исследование кристаллических структур).

Вычислительные методы важны и для интерпретации экспериментальных данных. Сравнив результаты измерения с расчетами, можно сделать вывод о сущности процессов, происходящих в ходе эксперимента. Методы вычислительной химии также полезны для выбора и настройки наиболее подходящего оборудования для экспериментального изучения той или иной химической системы. Более того, достижения вычислительной химии позволяют прогнозировать существование химических соединений, неизвестных в природе или никогда не синтезированных.

Таким образом, вычислительная химия используется как для предсказания структуры и свойств химических объектов, так и для объяснения экспериментальных фактов.

Виртуальные лаборатории и видеозаписи химических экспериментов

В подготовке учителя химии важную роль играет формирование навыков практической работы в ходе выполнения «живого» химического эксперимента. Только так можно познакомиться с химическими веществами и химическими процессами, почувствовать запах, увидеть цвет, услышать звук, сопровождающие превращение одних веществ в другие. Реальному химическому эксперименту всегда предшествует тщательное планирование, а полученные результаты требуют осмысления и анализа, на основе этих действий строится траектория следующего исследования и т. д. Наконец, реальные эксперименты дают студентам возможность узнать о сложностях науки, сталкиваясь с непредвиденными событиями, такими как ошибки в измерениях, и таким образом развивают исследовательские и критические навыки.

В последние годы в учебный процесс активно внедряются виртуальные лаборатории (Aroch et al. 2024). Такие технологии безусловно не могут заменить химическую лабораторию, но могут эффективно дополнить и расширить ее возможности. Виртуальные лаборатории актуальны, когда планируемые эксперименты являются сложными, опасными, протяженными во времени, при отсутствии оснащения необходимого для проведения эксперимента. Еще одним преимуществом является экономия оборудования, реактивов, пространства и учебно-вспомогательного персонала. Кроме того, виртуальная лаборатория эффективна при отработке отдельных операций, последовательности действий, в качестве тренинга для подготовки к реальным условиям эксперимента, не только в условиях учебной аудитории, но и дома (Gavronskaia et al. 2016).

Виртуальные лаборатории могут препятствовать развитию практических навыков работы в лаборатории, в том числе навыков устранения неполадок в оборудовании и решения проблем, с которыми сталкиваются ученые при планировании экспериментов, а отсутствие рисков может порождать беспечность, несерьезность и безответственное отношение у студентов. С другой стороны, обычная химическая

лаборатория может быть компьютеризирована, что позволяет проводить измерения и анализировать различные параметры, обрабатывать экспериментальные данные. По мнению студентов с точки зрения достоверности данных и легкости формирования отчета такая лаборатория эффективнее.

В курсе общей химии для проведения лабораторных работ используется установка лабораторного практикума «Общая и неорганическая химия» (НПО Унитех), которая позволяет получать данные в режиме реального времени и выводить их как на экран компьютера, так и смартфона. Установка представляет собой совокупность измерительных устройств в одном приборе, который содержит: термодатчик с функцией термостата, фотоколориметр, кондуктометр, рН-метр, вольтметр, плитку, магнитную мешалку, источник тока. На данной установке можно проводить более 150 лабораторных опытов по курсу общей и неорганической химии. Все лабораторные работы могут выполняться непосредственно на комплексе с выводом результатов на дисплей, или с помощью программного обеспечения, на компьютере, ноутбуке, планшете или смартфоне. Обучающиеся 1 курса факультета химии используют установку на лабораторных работах по измерению ЭДС гальванического элемента и кинетических характеристик химических реакций.

В рамках темы «Стехиометрические расчеты» обучающиеся 1 курса выполняют лабораторную работу по определению эквивалентной массы металла волюмометрическим методом с использованием компьютеризированной установки РМС-Х «Стехиометрия». Достоинством использования данного цифрового оборудования является быстрота выполнения эксперимента и обработки результатов, достаточно хорошая воспроизводимость. Использование установки, не подключенной к компьютеру, основанной на использовании бюретки для определения объема вытесненной выделяющимся в результате реакции водорода воды, включает большее количество стадий эксперимента, более трудоемко, но зачастую приводит к большему пониманию студентами сути эксперимента.

При изучении темы «Химическая кинетика» используется установка РМС-Х «Кинетика». В основе лабораторной работы лежит колориметрический метод определения скорости химической реакции с помощью П-образного датчика оптической плотности, помещенного на кювету с исследуемыми растворами. Преимущество использования установки заключается

в возможности получения экспериментальных данных в графическом и табличном виде в режиме реального времени, что обеспечивает большую наглядность эксперимента, а также простоту обработки полученных результатов эксперимента.

В случае, когда правила безопасности запрещают использование определенных веществ, выходом является видеоконтент с химическими экспериментами. Видео с лабораторными экспериментами можно использовать как удачное дополнение на выступлениях с докладами, в презентациях, проектах, и с любого гаджета. Безусловно подготовка такого материала самими студентами повышает мотивацию, способствует формированию химической эстетики в постановке эксперимента, развивает навыки работы в команде.

Искусственный интеллект в обучении химии

Искусственный интеллект (ИИ) стал полноправным участником современного образовательного процесса. Он открывает новые возможности как для преподавателей, так и для студентов, позволяя создавать инновационные методы изучения различных дисциплин (Avksenteva et al. 2021), среди которых химия занимает особое место благодаря своей сложности и многогранности. Сегодня технологии искусственного интеллекта применяются практически во всех областях химии. Поэтому студенту-химику важно научиться применять методы ИИ.

К основным направлениям применения искусственного интеллекта в обучении химии можно отнести:

1. **Аналитику больших данных** (Big Data). В процессе исследований химики получают огромные объемы экспериментальной информации, которая требует обработки. Анализ больших данных помогает выявлять скрытые закономерности, оптимизировать процессы синтеза и предсказывать свойства новых соединений. Аналитику больших данных преподаватели могут использовать для создания дидактических материалов к занятиям, для постановки лабораторных работ, для формулировки тем курсовых и дипломных работ.

2. **Анализ молекулярных структур**. Это одна из ключевых областей применения ИИ в химии. Современные алгоритмы, на основе которых работают системы глубокого обучения, позволяют автоматически распознавать атомы и связи между ними, определять геометрическое

расположение атомов, молекул, предсказывать химические свойства и т. д. В качестве примера можно предложить использовать программу Crystallography AI.

3. Прогнозирование возможных химических реакций и синтез новых соединений. Решение этой задачи основано на использовании алгоритмов машинного обучения, которые способны анализировать базы знаний и данных, содержащие информацию об известных химических реакциях. Они составляют основу интеллектуальных систем поддержки принятия решений и способны дать студентам рекомендации, например, по выбору оптимального метода синтеза. Такие системы могут помочь в интерпретации полученных результатов, предложить инструкцию по проведению эксперимента. Поэтому они еще имеют и другое название — системы советчики. В качестве примера можно рассмотреть использование интеллектуальной системы поддержки принятия решений (Decision Support Systems), наполнив ее химическим содержанием.

4. Чат-боты и виртуальные ассистенты. Эти виртуальные сервисы выполняют функцию онлайн-собеседников. Они ведут диалог с пользователем, могут отвечать на вопросы, давать необходимые разъяснения, помогать в подготовке к экзаменам и тестированию. Можно создать бота-помощника (в Telegram или с использованием языка программирования Phyton), который способен объяснить механизм конкретной химической реакции или предложить правильный порядок действий при выполнении лабораторной работы.

5. Системы генеративного искусственного интеллекта (GigaChat, YandexGPT, ChatGPT) целесообразно использовать для создания нового учебного контента по химии в формате текста, кода, изображения, видео (нейросети Kandinsky и Шедеврум). Дидактическая эффективность генеративного искусственного интеллекта существенно увеличивается при его совместном использовании с современными интеграционными платформами (например Альбато). Например, можно полностью автоматизировать проверку знаний обучающихся от этапа создания теста до отправки обучающимся результатов тестирования по электронной почте.

Применение технологий искусственного интеллекта открывает широкие перспективы для совершенствования образовательного процесса по химии, повышению уровня профессиональной квалификации и преподавателей, и студентов.

Популяризация химических исследований

Несмотря на то что виртуальные лаборатории приобретают популярность на начальных этапах изучения химии, только реальный эксперимент в химической лаборатории может способствовать приобретению навыков и умений работы с химическими реактивами, посудой и оборудованием. Зачастую в рамках учебного процесса не удастся осуществить ряд экспериментов и часть их может реализоваться в рамках внеучебной деятельности. Для обучающихся по направлению «44.03.05 Химическое образование. Информатика и информационные технологии в образовании» особенно важно, начиная с первых курсов, развивать умение качественно проводить демонстрационный эксперимент. На факультете химии студенты 1 курса участвуют в организации и проведении ряда научно-популярных мероприятий. Особую популярность получили Интерактивная химическая лабораторная «ГерценЛаб» и Фестиваль «Химия без воды», мероприятия, направленные на повышение интереса обучающихся школ и вузов к химическим знаниям, в основе которых лежит химический эксперимент. Мероприятия в основном проходят на базе РГПУ им. А. И. Герцена, но нередко команду организаторов приглашают принять участие на выставках разного уровня, например «Россия» (ВДНХ, Москва), «Наука всем!» (Санкт-Петербург). В случае, когда возникают сложности с проведением демонстрационного эксперимента, организаторы используют видеоэксперимент, выполненный и записанный самостоятельно в лаборатории. Количество видеоэкспериментов, выполненных и обработанных обучающимися превышает 50 опытов и требует от студентов не только навыков проведения эксперимента и его качественной записи с учетом особенностей химических реакций, но и навыков обработки цифровой информации, видеомонтажа. Кроме того, использование современных мультимедиа устройств, в том числе видеокамер и электронных дисплеев, позволяет масштабировать детали эксперимента в режиме реального времени, акцентируя внимание аудитории на особенностях его протекания. При проведении эксперимента в больших аудиториях, залах целесообразно выводить детали эксперимента на экран.

Заключение

Таким образом, цифровые инструменты значительно улучшают понимание студентами

концепций химии и улучшают навыки решения химических задач и проблем. Внедрение информационных технологий в курс общей химии для обучающихся на двухпрофильном бакалавриате весьма полезно для создания учебной среды и пространства для научных исследований. В то же время интеграция технологий в химическое образование способствует накоплению опыта преподавания и подготовке студентов к карьере учителя химии и информатики. Несмотря на существующие проблемы, технологии способствуют повышению интереса у студентов к процессу изучения химии и улучшению результатов обучения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Финансирование

Исследование выполнено за счет внутреннего гранта РГПУ им. А. И. Герцена (проект №68-BГ).

Funding

This research was supported by an internal grant from Herzen State Pedagogical University of Russia (project No. 68-VG).

Вклад авторов

Бойцова Татьяна Борисовна: формулировка идеи и задач исследования, рецензирование, редактирование и руководство в написании окончательного варианта. Написание раздела «Открытые цифровые базы данных».

Власова Елена Зотиковна: написание раздела «Искусственный интеллект в обучении химии».

Горбунова Валентина Васильевна: написание исходной рукописи, отбор и обзор современной литературы по публикации.

Исаева Екатерина Игоревна: разработка и анализ использования специальных компьютерных программах для расчетов структуры и свойств химических объектов. Написание раздела «Популяризации химических исследований».

Лёвкин Антон Николаевич: написание раздела «Использование вычислительных методов».

Author Contributions

Tatiana B. Boytsova — conceptualization of research idea and objectives; reviewing, editing, and supervision of final manuscript preparation; writing of 'Open Digital Databases' section.

Elena Z. Vlasova — writing of 'Artificial Intelligence in Chemistry Education' section.

Valentina V. Gorbunova — draft manuscript preparation; literature review and analysis of current publications.

Ekaterina I. Isaeva — development and analysis of specialized software for chemical structure and property calculations; writing of 'Promotion of Chemical Research' section.

Anton N. Lyovkin — writing of 'Computational Methods Application' section.

References

- Aroch, I., Katchevich, D., Blonder, R. (2024) Modes of technology integration in chemistry teaching: Theory and practice. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 25, no. 3, pp. 843–861. <https://doi.org/10.1039/D3RP00307H> (In English)
- Avksenteva, E. Yu., Aksyutin, P. A., Barakhsanova, E. A. et al. (2021) *Obrazovatel'naya inzheneriya. Ponyatiya. Podkhody. Prilozheniya [Educational engineering. Concepts. Approaches. Implementations]*. Moscow: Hotline — Telecom Publ., 240 p. (In Russian)
- Battle, G. M., Allen, F. H., Ferrence, G. M. (2010) Teaching three-dimensional structural chemistry using crystal structure databases. 2. Teaching units that utilize an interactive web-accessible subset of the Cambridge Structural Database. *Journal of Chemical Education*, vol. 87, no. 8, pp. 813–818. <http://dx.doi.org/10.1021/ed100257t> (In English)
- Eitemüller, C., Trauten, F., Striwe, M., Walpuski, M. (2023) Digitalization of multistep chemistry exercises with automated formative feedback. *Journal of Science Education and Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 453–467. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10043-2> (In English)
- Gavronskaya, Yu. Yu., Oksenchuk, V. V., Kiut, E. E. (2016) Virtual'nye laboratornye raboty po khimii [Virtual laboratory works in chemistry]. *Informatika i obrazovanie — Informatics and Education*, no. 9 (278), pp. 33–36. (In Russian)
- Hanson, R. M., Prilusky, J., Renjian, Z. et al. (2013) JSmol and the next-generation web-based representation of 3D molecular structure as applied to proteopedia. *Israel Journal of Chemistry*, vol. 53, no. 3–4, pp. 207–216. <https://doi.org/10.1002/ijch.201300024> (In English)
- Hati, S., Bhattacharyya, S. (2016) Incorporating modeling and simulations in undergraduate biophysical chemistry course to promote understanding of structure–dynamics–function relationships in proteins. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, vol. 44, no. 2, pp. 140–159. <https://doi.org/10.1002/bmb.20942> (In English)
- Hou, Y., Wang, M., He, W. et al. (2023) Virtual simulation experiments: A teaching option for complex and hazardous chemistry experiments. *Journal of Chemical Education*, vol. 100, no. 4, pp. 1437–1445. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.2c00594> (In English)

- Khadanovich, A. V. (2016) Informatsionnye tekhnologii v razvitii poznavatel'nogo interesa studentov k khimii [Information technologies in developing students' cognitive interest in chemistry]. In.: I. V. Semchenko (ed.). *Aktual'nye voprosy nauchno-metodicheskoy i uchebno-organizatsionnoy raboty: traditsii i modernizatsiya sovremennogo vysshego obrazovaniya. Materialy respublikanskoj nauchno-metodicheskoy konferentsii v 4 chastyakh. Ch. 2 [Current issues of scientific-methodological and educational-organizational work: Traditions and modernization of modern higher education. Proceedings of the Republican Scientific-Methodological Conference in 4 parts. Pt. 2]*. Gomel: Francisk Skorina Gomel State University Publ., pp. 163–167. (In Russian)
- Kosmodemyanskaya, S. S., Nizamov, I. D., Murinova, D. I., Sattarova, G. A. (2022) Primenenie adaptivnykh tsifrovyykh tekhnologiy v prepodavanii khimii [Application of adaptive digital technologies in chemistry teaching]. *Biznes. Obrazovanie. Pravo — Business. Education. Law*, no. 3 (60), pp. 360–365. <https://doi.org/10.25683/VOLBI.2022.60.328> (In Russian)
- Mahbub, S., Wafik, H. M. A., Uddin, A., Rahman, M. (2024) Integration of technology in chemistry education at university level. *Cognizance Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 4, no. 7, pp. 9–19. <https://doi.org/10.47760/COGNIZANCE.2024.V04I07.002> (In English)
- Sendlinger, S. C., DeCoste, D. J., Dunning, T. H. et al. (2008) Transforming chemistry education through computational science. *Computing in Science and Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 34–39. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2008.124> (In English)
- Solikhin, F., Sugiyarto, K. H., Ikhsan, J. (2019) The impact of virtual laboratory integrated into hybrid learning use on students' achievement. *Jurnal Ilmiah Peuradeun*, vol. 7, no. 1, pp. 81–94. <https://doi.org/10.26811/peuradeun.v7i1.268> (In English)
- Tuvi-Arad, I., Blonder, R. (2019) Technology in the service of pedagogy: Teaching with chemistry databases. *Israel Journal of Chemistry*, vol. 59, no. 6–7, pp. 572–582. <https://doi.org/10.1002/ijch.201800076> (In English)
- Vardanyan, A. V. (2023) Vliyanie protsessov tsifrovizatsii na razvitie kriticheskogo myshleniya u studentov vuzov [The impact of digitalisation processes on the development of critical thinking among university students]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk — International Journal of Humanities and Natural Sciences*, no. 6–2 (81), pp. 115–118. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-6-2-115-118> (In Russian)

Сведения об авторах

БОЙЦОВА Татьяна Борисовна — *Tatiana B. Boitsova*

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia.

SPIN-код: 2085-2402, Scopus AuthorID: 6603049498, ORCID: 0000-0002-6797-4147, e-mail: tbboitsova@gmail.com

Доктор химических наук, заведующий кафедрой неорганической химии.

ВЛАСОВА Елена Зотиковна — *Elena Z. Vlasova*

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia.

SPIN-код: 3101-7508, Scopus AuthorID: 57192163660, ORCID: 0000-0001-7356-5019, e-mail: yip.zavkaf@mail.ru

Доктор педагогических наук, заведующий кафедрой информационных технологий и электронного обучения.

ГОРБУНОВА Валентина Васильевна — *Valentina V. Gorbunova*

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia.

SPIN-код: 2945-7838, Scopus AuthorID: 7006039494, ORCID: 0000-0003-3736-0125, e-mail: vygorbunova@yandex.ru

Кандидат технических наук, доцент кафедры неорганической химии.

ИСАЕВА Екатерина Игоревна — *Ekaterina I. Isaeva*

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia.

SPIN-код: 7842-9005, Scopus AuthorID: 13907847700, ORCID: 0000-0001-8258-5628, e-mail: katiavolkova@yandex.ru

Кандидат химических наук, доцент кафедры неорганической химии.

ЛЁВКИН Антон Николаевич — *Anton N. Levkin*

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia.

SPIN-код: 1954-7582, Scopus AuthorID: 6505922523, ORCID: 0000-0002-8560-1301, e-mail: andgray@yandex.ru

Кандидат педагогических наук, доцент кафедры неорганической химии.