

УДК 543.46

КАФЕДРА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ

© 2019 г. Л. Н. Москвин^а, *, С. С. Ермаков^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет Институт химии
198504 Россия, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский просп., 26

*e-mail: moskvinln@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.10.2018 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 19.04.2019 г.

Описана история создания кафедры аналитической химии в Санкт-Петербургском государственном университете, начиная с отправной идеи Д.И. Менделеева разделить единый курс химии на три: общей, органической и технической с практикумом по аналитической химии. Обсуждаются основные направления научной деятельности кафедры в настоящее время и их взаимосвязь со специализациями выпускников кафедры. Приводится список публикаций по результатам важнейших научных исследований, выполненных на кафедре, учебников и учебных пособий, подготовленных преподавателями.

Ключевые слова: кафедра, преподавание, аналитическая химия, специализация, учебники, научные направления.

DOI: 10.1134/S0044450219100086

1869 г. Д.И. Менделеев инициирует реформирование преподавания химии в Санкт-Петербургском университете. Вместо единого курса химии он предлагает выделить три основных курса: общей химии, органической химии, а также технической химии с большим практикумом по аналитической химии. Преподавание каждой дисциплины в этом случае должно обеспечиваться созданными в СПбГУ по его инициативе соответствующими кафедрами. С момента создания кафедру технической и аналитической химии возглавил Н.А. Меншуткин. В последующие годы этой кафедрой руководили известные химики Д.П. Коновалов, А.Е. Фаворский, В.Е. Тищенко. В 1933 г. принимается решение о ее разделении на две кафедры: аналитической и технической химии. Первую возглавил С.А. Толкачев. Наибольший вклад в ее развитие и становление внес Ю.В. Морачевский, руководивший кафедрой с 1944 по 1961 г.

Оглядываясь назад, невольно задумываешься над тем, почему Дмитрий Иванович Менделеев объединил аналитическую химию с технической? Почему это объединение оказалось столь прочным, что смогло просуществовать более 60 лет? Почему многие яркие страницы истории кафедры связаны с именами ученых, прославившихся своими научными достижениями в других областях химии? Н.А. Меншуткин – в кинетике и органической химии, А.Е. Фаворский – в органиче-

ской химии, Д.П. Коновалов – в химической термодинамике, В.Е. Тищенко – в химии и технологии получения природных соединений, Ю.В. Морачевский – наряду с аналитической химией, в геохимии.

Ответы на первые два вопроса представляются достаточно очевидными. Д.И. Менделеев мыслил не только научными категориями, но и категориями интересов отечества. А отечеству с его развивающейся промышленностью были нужны специалисты, знающие одновременно специфику химических производств и их химико-аналитического контроля. В течение всей ее истории кафедрой руководили крупные ученые, мыслявшие теми же категориями, что и Д.И. Менделеев, и считающие нужным сочетать, как мы теперь говорим, фундаментальные исследования с практической деятельностью. Даже в те годы, когда произошло разделение технической и аналитической химии, Юрий Витальевич Морачевский в лучших традициях аналитической школы Санкт-Петербургского университета обеспечил подготовку специалистов для геологии и горнорудной промышленности по одному из важнейших в то время для страны направлений – анализу минерального сырья, а в 50-е гг. в интересах развивающейся атомной промышленности – по аналитической химии редких элементов, в первую очередь урана и тория.

На последний вопрос нет однозначного ответа. Скорее всего, его надо искать в особенностях аналитической химии как области знаний. Каждый химик-экспериментатор независимо от своей узкой специализации в той или иной степени вынужден быть аналитиком. Многие из них бывают удовлетворены арсеналом аналитических методов, известных на момент постановки исследований. Но часто возникают ситуации, в которых продвижение в своей области знаний останавливается из-за отсутствия адекватных методов анализа. Для наиболее талантливых ученых это не является преградой. Они сами создают новые методы химического анализа. Достаточно вспомнить Санкт-Петербургского биохимика М.С. Цвета, который, для того чтобы понять строение хлорофилла, создал хроматографию. Часто «аналитические увлечения» остаются промежуточным этапом в их творческой биографии. Но этот этап не проходит даром. Для того чтобы создать что-нибудь новое в любой области знаний, необходимо глубокое понимание предмета. Именно этим скорее всего можно объяснить тот факт, что первый заведующий объединенной кафедрой технической и аналитической химии «кинетик» и «органик» Н.А. Меншуткин написал учебник «Аналитическая химия», выдержавший 16 русскоязычных изданий с 1871 по 1931 гг., переведенный и трижды изданный на немецком (1877, 1886, 1893 гг.), а в 1895, 1890 и 1903 гг. на английском языках.

Возможен и другой случай. Аналитические увлечения переходят в настоящую привязанность. Так, Ю.В. Морачевский, увлекаясь одновременно геохимией и аналитической химией, с годами все свое внимание сосредоточил на аналитических проблемах. Трудно найти монографию или даже учебник по аналитической химии, который выдержал бы такое успешное испытание временем, как капитальный труд «Анализ минерального сырья», подготовленный при его активном участии и под его редакцией. Впервые изданный в 1936 г. [1] и многократно переизданный в последующие годы, он до сих пор остается настольной книгой во многих аналитических лабораториях во всех случаях, когда возникают проблемы, связанные с пробоподготовкой при анализе твердофазных образцов. Проходит эйфория от всемогущества физических методов. Остается понимание того, что достоверность результатов химического анализа в первую очередь определяется выбором адекватных методов пробоподготовки.

Помимо перепрофилирования коллег-химиков существует еще одна общая тенденция в становлении ведущих специалистов по аналитической химии, которая отчетливо прослеживается в формировании преподавательского состава кафедры аналитической химии СПбГУ. В состав преподавателей аналитической химии органично

вошли физики-спектроскописты. Естественное стремление увидеть возможности практического применения разработанных спектральных методов привело их в аналитическую химию. Обогатившись аналитическими знаниями, они перешли к целенаправленному поиску новых методов химического анализа и расширению аналитических возможностей известных методов.

Новейшая история кафедры, охватывающая период с 1983 по 2013 гг., когда ею руководил радиохимик проф. Л.Н. Москвин, как и история ее создания и развития до этого, свидетельствует о том, что «подпитка» коллектива учеными из смежных областей химии и физики способствует появлению на кафедре новых научных направлений и совершенствованию программ ее преподавания.

Время, когда аналитическая химия органично сочеталась с технической химией, безвозвратно ушло в прошлое. Резко увеличилось число химических производств. Появились целые новые отрасли промышленности, такие как радиоэлектроника и атомная энергетика, постоянно нуждающиеся в химико-аналитическом контроле. Подготовка аналитиков, ориентированных на контроль определенных производств, стала задачей технологических вузов. Новое призвание университетская кафедра нашла в подготовке специалистов, профессионально владеющих современными инструментальными методами анализа: хроматографическими, спектральными, электрохимическими. Такие специалисты легко адаптируются к задачам практически любой современной аналитической лаборатории.

Для подготовки подобных специалистов потребовалась новая углубленная программа изучения аналитической химии и поиска концепции ее преподавания. В основу такой концепции заведующий кафедрой в этот период времени Л.Н. Москвин положил предложенную им дефиницию аналитической химии [2] как науки, изучающей характеристические свойства веществ, являющиеся проявлением их химического состава. Эти свойства могут иметь как химическую, так и физическую или биохимическую природу, а аналитическая химия соответственно включает изучение закономерностей проявления таких свойств из соответствующих смежных дисциплин, и в ней наряду с химиками находят свое место физико-химики, физики и биохимики, что логично объясняет формирование кадрового состава аналитиков. Эта концепция аналитической химии легла в основу новой программы ее преподавания в СПбГУ и написанного ведущими преподавателями кафедрами и коллегами по научным интересам с физического факультета трехтомного учебника по аналитической химии [3–5]. В этом учебнике помимо отмеченного выше

взгляда на аналитическую химию как научную дисциплину, реализовано ее разграничение с прикладными разделами, объединенными общим понятием химический анализ [5].

Одновременно с поиском новых подходов к преподаванию общего курса аналитической химии возникла необходимость пересмотра направлений подготовки специалистов-аналитиков. Успехи в подготовке специалистов по любому из направлений во многом определяются уровнем научных исследований, проводимых преподавателями и сотрудниками кафедры. При этом в идеале каждое из направлений подготовки специалистов должно быть подкреплено развиваемым на кафедре научным направлением. Однако ни одна кафедра не в состоянии обеспечить проведение исследований по всем направлениям аналитической химии, поэтому строго выполнить это требование удастся только при подготовке специалистов высшей квалификации – кандидатов наук. С переходом на двухуровневую схему организации учебного процесса с определенными оговорками полное соответствие научных интересов преподавателей учебным программам оказалось легко осуществимым на завершающем этапе подготовки магистров. В общем случае необходим разумный компромисс между учебными программами и научными интересами преподавателей. Такой компромисс на кафедре аналитической химии СПбГУ был найден в развитии одного или нескольких научных направлений, представляющих важнейшие разделы аналитической химии: химические, электрохимические, спектральные методы анализа, методы разделения веществ и гибридные методы анализа, в первую очередь хроматографические. Наконец, в соответствии с современными тенденциями развития аналитической химии программы подготовки студентов сдвинулись в сторону автоматизации и миниатюризации на принципах методов проточного анализа.

Исследования в области проточных методов и автоматизации химического анализа на этих принципах, начатые на кафедре, изначально были ориентированы на разработку судовых природоохранных комплексов для контроля природных вод в реальном масштабе времени [6]. Разработанные системы контроля и методическое обеспечение к ним позволили непрерывно наблюдать за уровнем загрязненности природных вод в режиме движения судна, оснащенного соответствующими анализаторами, по обследуемой акватории [7]. Тем самым одновременно была создана база для подготовки специалистов в области анализа объектов окружающей среды и приобрели дополнительное значение выполнявшиеся ранее исследования в области поиска новых органических реагентов и условий образования “аналитических форм” определяемых веществ.

Идея развития проточных методов была подхвачена одним из учеников проф. Л.Н. Москвина А.В. Булатовым, ныне уже профессором, выбравшим в качестве направления исследований равновесные проточные методы [8], существенно расширившие возможности ранее применявшихся неравновесных методов, таких как проточно-инжекционный анализ.

Говоря о вкладе физиков в формирование новых научных направлений на кафедре, можно привести несколько примеров. Первое из них, начатое проф. А.И. Дробышевым и продолженное проф. А.А. Ганеевым, касается исследований процесса атомизации в новом газоразрядном атомизаторе – тонкостенном металлическом полом катоде (ТМПК) [9, 10]. Результаты этих исследований позволили обнаружить и исследовать высокоэффективный ионно-термический механизм распыления и атомизации. Высокие энергии ионов и электронов в таком атомизаторе приводят к существенному снижению матричных эффектов по сравнению с графитовой печью, что позволяет анализировать пробы сложного состава (биопробы, загрязненные воды, газоконденсат, бензин и др). без предварительной пробоподготовки. Кроме того, было установлено, что процесс атомизации в ТМПК сопровождается созданием своеобразных диффузных ловушек определяемых атомов, что увеличивает чувствительность метода и уменьшает влияние параметров разряда на аналитический сигнал. Показано, что ТМПК можно использовать и как эффективную резонансную ячейку для резонансно-ионизационных детекторов в лазерной спектроскопии. Кроме того, проф. А.А. Ганеев предложил новый метод дифференциальной атомно-абсорбционной спектроскопии – Зеemanовскую модуляционную поляризационную спектроскопию с высокочастотной модуляцией (ЗМПСВМ), обладающую уникальной селективностью [11]. Метод ЗМПСВМ позволил разработать анализаторы, работоспособные при неселективном поглощении 98% аналитического сигнала. В этом случае многие объекты удается анализировать без пробоподготовки и разбавления; благодаря этому снижаются пределы обнаружения, увеличивается производительность и улучшается правильность анализа.

Еще одно направление, развитое в работах А.А. Ганеева, – новый метод прямого элементного и изотопного анализа твердотельных проб, основанный на использовании импульсного тлеющего разряда в комбинированном полом катоде с детектированием образовавшихся ионов во времяпротлетном масс-спектрометре. Этот метод позволил с высокой чувствительностью одновременно определять широкий круг элементов в пробах различного состава – металлах, полупро-

водниках, диэлектриках – практически без пробоподготовки [12].

Другое новое направление, касающееся создания и развития спектральных методов, связано с возникшей в последние десятилетия необходимостью анализировать ультратонкие поверхностные слои различных твердофазных материалов, которая стимулировала появление более 70 различных физических методов, способных дать информацию о присутствии в образцах даже отдельных атомов. Проблема состояла в том, чтобы неразрушающим способом проникнуть вглубь образцов и проследить, как меняются при этом состояния атомов. Возможности для такого анализа открыла новая разновидность мессбауэровской спектроскопии на конверсионных электронах (КЭМС). В отличие от классической схемы КЭМС, было предложено облучать исследуемый образец потоком гамма-квантов под скользящим углом к поверхности (проф. В.Г. Семенов) [13].

Первые же эксперименты на образцах металлического железа, подвергнутого коррозии, доказали чрезвычайную чувствительность метода: были обнаружены рентгеноаморфные фазы железа(III), образующиеся на самых начальных стадиях процесса коррозии. Удалось, меняя угол скольжения мессбауэровского излучения, проследить порядок залегания различных оксидных фаз по глубине и таким образом сделать выводы о механизме процесса коррозии. Одновременно было обнаружено, что электромагнитное поле мессбауэровского излучения, проникая вглубь образца, изменяется сложным образом. Особенно значительны эти изменения при очень малых (до 0.1°) скользящих углах, когда имеет место явление полного внешнего отражения. В этом случае все излучение как бы запирается в поверхностном слое образца, причем толщина этого слоя не превышает 2 нм. Именно этот слой эмитирует электроны и соответственно является объектом анализа.

Экспериментальная реализация такой схемы анализа позволила изучить многослойные металлические системы Fe–Cr, представляющие собой чередующиеся слои металлических Fe и Cr толщиной около 1 нм каждый [14].

Одной из ярких страниц новейшей истории кафедры аналитической химии явилось создание и развитие новых направлений в методах разделения веществ и гибридных методах анализа (проф. Л.Н. Москвин, проф. О.В. Родинков). При всем многообразии известных хроматографических методов до начала 80-х гг. даже не возникала мысль о возможности осуществления хроматографического процесса между подвижной жидкой и неподвижной газовой фазой. Открытие эффекта удерживания газовой фазы на пористых гидрофобных носителях привело к созданию ме-

тодов жидкостно-газовой хроматографии (ЖГХ) и жидкостно-газоадсорбционной хроматографии (ЖГАХ) [15]. Создание этих методов явилось логическим завершением развития хроматографии как универсального способа осуществления межфазного распределения веществ. Помимо чисто теоретического интереса, появление ЖГХ привело к разработке высокоэффективных методов определения газов, растворенных в воде. С позиций ЖГАХ удалось объяснить механизм удерживания летучих органических веществ на гидрофобных сорбентах при их концентрировании из водных растворов, что привело к оптимизации соответствующих методик анализа [16]. Найдены теоретические и экспериментальные доказательства того, что за счет большей скорости диффузии веществ в неподвижной газовой фазе эффективность разделения в ЖГАХ существенно выше, чем в хроматографических процессах с неподвижной жидкой или твердой фазой.

Еще более значимой по своему практическому значению явилась идея хроматообменного массообменного процесса (ХМП) [17]. Эта идея открыла новые возможности для непрерывного разделения веществ. Подавляющее большинство методов разделения гомогенных смесей – жидкостная, газовая и флюидная экстракция, статическая и динамическая сорбция, хроматографические методы – основаны на различиях в межфазном распределении веществ. В этих методах апробированы все возможные сочетания фаз в различных агрегатных состояниях. Неизменными оставались принципиальные схемы реализации процессов межфазного распределения: смешение и разделение фаз или создание потока одной фазы относительно другой, находящейся в стационарном состоянии. За редким исключением любая из этих схем независимой системы фаз позволяет осуществить процесс разделения при периодическом вводе исходной смеси веществ и периодическом выводе конечных продуктов. В тех случаях, когда существует возможность непрерывного разделения, например в противоточной экстракции, как правило, возникают серьезные проблемы с расслаиванием фаз в потоке.

Метод ХМП основан на использовании капиллярных эффектов. Массообмен осуществляется в капиллярно-пористой среде из гидрофобного материала, имеющего два типа пор (макро- и мезопоры) существенно различающихся по размеру. Макропоры создают систему каналов для прохождения полярной жидкой фазы. При давлении, под которым подается в систему полярная фаза, микропоры недоступны для нее из-за возникающего в них капиллярного давления. В результате они остаются проницаемыми для газов и неполярных жидкостей при меньших давлениях по сравнению с давлением полярной фазы. Появ-

ляется возможность создания одновременно потоков двух фаз, движущихся в произвольных направлениях в пределах одной пористой матрицы. В методах, реализующих принцип хроматомембранного процесса, совмещается высокая эффективность межфазного обмена, присущая хроматографии, с возможностью раздельного ввода и вывода потоков двух фаз из зоны массообмена, характерной для мембранных процессов, что позволяет осуществлять процесс разделения непрерывно.

Пока еще рано говорить обо всех возможных областях применения хроматомембранных методов. Первыми практическими результатами явились разнообразные схемы хроматомембранного концентрирования в проточно-инжекционном анализе, хроматомембранный парофазный анализ. Открылись новые возможности и для массообменных технологий: новые технологии оксигенации крови и деоксигенации воды [18] и технологии непрерывного разделения “благородных” и сопутствующих им в рудах примесных металлов [19].

Химический факультет СПбГУ широко известен своими достижениями в развитии электрохимических методов анализа, в первую очередь ионометрии. Эти успехи достигнуты главным образом за счет реализацией идеи “электронного языка” усилиями сотрудников кафедр физической химии, электрохимии, а в последние годы и радиохимии. После ухода из жизни автора этой идеи проф. Ю.Г. Власова центром мультисенсорных исследований стала кафедра аналитической химии (проф. Д.О. Кирсанов) [20].

Другим центром исследований по электрохимическим методам является научная группа, возглавляемая новым заведующим кафедрой аналитической химии проф. С.С. Ермаковым, избранным на эту должность после достижения Л.Н. Москвиным верхней возрастной границы (80 лет). С.С. Ермаковым развиты теоретические основы новых неравновесных электрохимических методов – инверсионной кулонометрии [21] и коммутационной амперометрии (совместно с томскими коллегами) [22–24], позволяющих на несколько порядков снизить пределы обнаружения по сравнению с традиционными вариантами измерений. Начаты исследования в области бесферментных амперометрических сенсоров [25, 26].

Перспективы на будущее кафедра связывает с молодыми учеными. Это, наряду с уже упоминавшимися профессорами А.В. Булатовым и Д.О. Кирсановом, большая группа кандидатов наук: В.В. Панчук [27], М.Я. Каменцев [28], А.Ю. Шишов [29], К.С. Вах [30], И.И. Тимофеева [31], А.С. Бугайченко [32].

После прихода на кафедру проф. Д.О. Кирсанова, назначенного Председателем комиссии НСАХ РАН по хемометрике, на кафедре стали

проводиться работы в области применения и развития хемометрических методов.

Кафедра сохраняет исторически сложившуюся традицию не ограничивать научные исследования методическими проблемами аналитической химии, развивая прикладные направления. Помимо уже упомянутых применений разработанных методов в решении экоаналитических и материоловедческих проблем, важным приложением явились работы в области диагностики заболеваний по составу выдыхаемого воздуха.

Более детально ознакомиться со старыми и новыми направлениями исследований, выполняемых на кафедре аналитической химии, можно из публикаций, приведенных ниже в этом выпуске журнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ минерального сырья / Под ред. Морачевского Ю.В. Л.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1955. 1055 с.
2. Москвин Л.Н. Как преподавать аналитическую химию в университетах? // Журн. аналит. химии. 1990. Т. 45. № 12. С. 2304. (Moskvin L.N. How to teach analytical chemistry in universities? // J. Analyt. Chem. 1990. V. 45. № 12. P. 2304.)
3. Аналитическая химия. Т. 1. Методы идентификации и определения веществ / Под ред. Москвина Л.Н. М.: Изд. Центр “Академия”, 2008. 576 с.
4. Аналитическая химия. Т. 2. Методы разделения веществ и гибридные методы анализа / Под ред. Москвина Л.Н. М.: Изд. Центр “Академия”, 2008. 304 с.
5. Аналитическая химия. Т. 3. Химический анализ / Под ред. Москвина Л.Н. М.: Изд. Центр “Академия”, 2010. 368 с.
6. Москвин Л.Н., Москвин А.Л. Вода и водные среды: химический анализ “on line”, проблемы и решения // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 2. С. 155. (Moskvin A.L., Moskvin L.N. Water and aqueous environments: On-line chemical analysis, problems and solutions // Russ. Chem. Rev. 2005. V. 74. № 2. P. 145.)
7. Москвин А.Л., Москвин Л.Н., Ардашникова И.А. Системы непрерывного контроля качества воды в потоке // Журн. аналит. химии. 2000. Т. 55. № 12. С. 1305. (Moskvin A.L., Moskvin L.N., Ardashnikova I.A. Systems for continuous water quality control in a flow // J. Analyt. Chem. 2000. V. 55. № 12. P. 1173.)
8. Vakh C., Falkova M., Timofeeva I., Moskvin A., Moskvin L., Bulatov A. Flow analysis: A novel approach for classification // Crit. Rev. Anal. Chem. 2016. V. 46. P. 374.)
9. Дробышев А.И. Полый катод и тлеющий разряд Гримма / Спектральный анализ чистых веществ / Под ред. Зильберштейна Х.И. 2-е изд. СПб: Химия, 1994. С. 69.
10. Ganeev A.A., Sholupov S.E. A thin-walled metallic hollow cathode as an atomizer for Zeeman atomic absorption spectrometry // Spectrochim. Acta. 1998. V. 53. P. 471.

11. *Sholupov S.E., Ganeyev A.A.* Zeeman atomic spectroscopy with high frequency modulation // *Spectrochim. Acta B*. 1995. V. 50. P. 1236.
12. *Ganeev A., Gubal A., Potapov S., Agafonova N.* Mass spectrometric techniques for direct analysis of solid materials // *Russ. Chem. Rev.* 2016. V. 85. № 4. P. 427. <https://doi.org/10.1070/RCR4504>
13. *Gittsovich V.N., Semenov V.A., Uzdin V.M.* Bulk and surface magnetic properties of dilute FeCr alloys // *J. Magn. Magn. Mater.* 1995. V. 146. P. 165.
14. *Andreeva M.A., Semenov V.G., Lindgren B., Häggström L., Kalska B., Chumakov A., Leupold I.O., Ruffer R., Prokhorov K.A., Salashchenko N.N.* Interface sensitive investigation of ⁵⁷Fe/Cr superstructure by means of nuclear resonance standing waves in time scale // *Hyp. Interact.* 2002. P. 119.
15. *Moskvin L.N., Rodinkov O.V.* Analytical application of liquid-gas and liquid-gas-solid chromatography // *Crit. Rev. Anal. Chem.* 1994. V. 24. № 5–6. P. 317.
16. *Родинков О.В., Москвин Л.Н.* Жидкостно-газоадсорбционная хроматография в процессах концентрирования летучих органических веществ из водных растворов // *Журн. аналит. химии*. 1996. Т. 51. № 11. С. 1133. (*Rodinkov O.V., Moskvin L.N.* Liquid-gas adsorption chromatography in the processes of pre-concentration of volatile organic substances from aqueous solutions // *J. Analyt. Chem.* 1996. V. 51. № 11. P. 1034.)
17. *Moskvin L.N.* Chromatomembrane method for the continuous separation of substances // *J. Chromatogr. A*. 1994. V. 669. P. 81.
18. *Москвин Л.Н., Родинков О.В.* Хроматомембранные методы: физико-химические принципы, аналитические и технологические возможности // *Известия РАН*. 2012. Т. 6. № 4. С. 723. (*Moskvin L.N., Rodinkov O.V.* Chromatomembrane methods: Physico-chemical principles, analytical and technological possibilities // *Russ. Chem. Bull.* 2012. V. 61. № 4. P. 723.)
19. *Москвин Л.Н., Красноперов В.М., Григорьев Г.Л.* Экстракционно-хроматографическое выделение платины(IV) и палладия(IV) // *Журн. аналит. химии*. 1982. Т. 37. № 5. С. 942. (*Moskvin L.N., Krasnoperev V.M., Grigor'ev G.L.* Extraction-chromatographic separation platinum(IV) and palladium(IV) // *J. Analyt. Chem.* 1982. V. 37. № 5. P. 942.)
20. *Kirsanov D., Babain V., Legin A.* Developing sensing materials for multisensor systems on the basis of extraction data. Book chapter / *Multisensor Systems for Chemical Analysis: Materials and Sensors*. Stanford: Pan Stanford Publishing, 2013. P. 1. <https://doi.org/10.4032/9789814411165>
21. *Timofeeva D.V., Tsapko, Y.V., Ermakov S.S.* stripping coulometry determination of lead and mercury at screen-printed electrodes // *J. Electroanal. Chem.* 2011. V. 660. № 1. P. 195.
22. *Belebentseva M., Navolotskaya D., Ermakov S., Moshkin V., Khustenko L.* Interrupted amperometry: An ultrasensitive technique for diffusion current measuring // *Electrochim. Acta*. 2016. V. 191. P. 510.
23. *Semenova E., Navolotskaya D., Ermakov S.* Interrupted amperometry: the new possibilities in electrochemical measurements // *Pure Appl. Chem.* 2017. V. 89. № 10. P. 1459.
24. *Семенова Е.А., Наволоцкая Д.В., Ермаков С.С., Мошкин В.В., Хустенко Л.А.* Коммутационная амперометрия на твердых электродах: определение гидрохинона и фенола // *Журн. аналит. химии*. 2016. Т. 71. № 12. С. 1308. (*Semenova E.A., Navolotskaya D.V., Ermakov S.S., Moshkin V.V., Khustenko L.A.* Interrupted amperometry on solid electrodes: Determination of hydroquinone and phenol // *J. Analyt. Chem.* 2017. V. 72. № 1. P. 113.)
25. *Gulina L.B., Pchelkina A.A., Nikolaev K.G., Navolotskaya D.V., Ermakov S.S., Tolstoy V.P.* A brief review on immobilization of gold nanoparticles on inorganic surfaces and successive ionic layer deposition // *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2016. V. 44. № 1. P. 46.
26. *Николаев К.Г., Ермаков С.С., Оффенхозер А., Мурзина Ю.* Бесферментное определение глюкозы на нанопроволоках, полученных прямым электрохимическим синтезом // *Журн. аналит. химии*. 2017. Т. 72. № 4. С. 314. (*Nikolaev K.G., Ermakov S.S., Offenhäusser A., Mourzina Yu.* Nonenzymatic determination of glucose on electrodes prepared by directed electrochemical nanowire assembly (DNA) // *J. Analyt. Chem.* 2017. V. 72. № 4. P. 371.)
27. *Panchuk V., Semenov V., Legin A., Kirsanov D.* Signal smoothing with PLS regression // *Anal. Chem.* 2018. V. 90. № 9. P. 5959.
28. *Kamencev M, Yakimova N., Moskvin L., Kuchumova I., Tkack K., Malinina Y.* Fast isotopic separation of 10B and 11B boric acid by capillary zone electrophoresis // *Electrophoresis*. 2016. V. 37. P. 3017. <https://doi.org/10.1002/elps.201600265>
29. *Shishov A., Zabrodin A., Moskvin L., Andruch V., Bulatov A.* Interfacial reaction using particle-immobilized reagents in a fluidized reactor. Determination of glycerol in biodiesel // *Anal. Chim. Acta* 2016. V. 914. P. 75.
30. *Vakh C., Pochivalov A., Koronkiewicz S., Kalinowski S., Postnov V., Bulatov A.* A chemiluminescence method for screening of fluoroquinolones in milk samples based on a multi-pumping flow system // *Food Chem.* 2017. V. 270. P. 10.
31. *Timofeeva I., Kanashina D., Kirsanov D., Bulatov A.* A heating-assisted liquid-liquid microextraction approach using menthol: Separation of benzoic acid in juice samples followed by HPLC-UV determination // *J. Mol. Liq.* 2018. V. 261. P. 265.
32. *Rodinkov O.V., Bugaichenko A.S., Vlasov A. Yu.* Compositional surface-layered sorbents for pre-concentration of organic substances in the air analysis // *Talanta*. 2014. V. 119. P. 407.