

ИДЕИ А.И. ЧЕРКЕСОВА В НЕКОТОРЫХ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ОБЛАСТЯХ АНАЛИТИЧЕСКОЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ХИМИИ

© 2022 г. А. Н. Панкратов*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Россия

*e-mail: PankratovAN@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 06.07.2021 г.

После доработки 11.08.2021 г.

Принята к публикации 12.08.2021 г.

Статья А.И. Черкесова и Н.М. Алыкова “Спектрофотометрическое изучение некоторых бисазопродных хромотроповой кислоты и их взаимодействия с ионами металлов подгруппы скандия” стимулировала детальное изучение влияния таутомерии на аналитические свойства реагентов и их комплексов. Возникновение или усиление аналитического эффекта в спектрофотометрических реакциях часто вызвано таутомеризацией, сопутствующей, в частности, протолитическим равновесиям. Дано квантовохимическое (с явным учетом среды) обоснование протонирования ароматических аминокислот в водных растворах по β -атому азота азогруппы, которое обуславливает хиноидизацию, обеспечивающую образование аналитических форм с интенсивным аналитическим сигналом. Работы А.И. Черкесова по сульфоталексонам нашли продолжение в обосновании сравнительной устойчивости гетероциклической и открытой цвиттер-ионной форм молекул реагентов. Прогноз свойств атомов, ионов и соединений новых химических элементов на основе развития А.И. Черкесовым учения о периодичности даст ключ к выбору и адаптации аналитических методов. Предположение А.И. Черкесова о взаимосвязи ядерных и электронных степеней свободы в атоме предвосхитило исследования возможности ядерно-химических превращений при ядерной абляции, анализ звездного нуклеосинтеза. А.И. Черкесова можно считать провозвестником идеи Е.А. Смоленского, обобщившего принцип Паули и создавшего на этой основе метод многоэлектронных волновых функций, представляющий собой концептуально новое общее направление в компьютерной квантовой химии по сравнению с методами молекулярных орбиталей и валентных связей.

Ключевые слова: азо-хинонгидазонная таутомерия, прогноз аналитического сигнала в реакциях азосочетания, гетероциклическая, цвиттер-ионная формы молекул фталексонов, Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева, ядерно-химические превращения, принцип Паули и метод многоэлектронных волновых функций (МВФ).

DOI: 10.31857/S0044450222080084

Идеи А.И. Черкесова в области аналитической химии. В работе [1] проведено наукометрическое исследование публикаций по органическим реагентам с 1960 по 1975 гг. Выделены 11 модальных статей, на которые, по данным справочника Science Citation Index под редакцией Гарфилда, ссылались более четырех раз в течение года (при среднем в то время числе ссылок на одну химико-аналитическую статью 1.4 раза в год [1]). Одной из знаковых явилась статья Алексея Ивановича Черкесова и Наримана Мирзаевича Алыкова [2]. В ней системно исследованы более 40 азосоединений, из которых отобраны пять наилучших по чувствительности, контрастности перехода окраски, растворимости реагентов и их комплексов с ионами Sc(III), Y(III), лантаноидов в воде. Обсужден механизм реакций. Высказано предпо-

ложение о хинонгидазонной структуре хелатов. Новизна работы [2] для своего времени иллюстрируется такой деталью, как рассмотрение силы осциллятора, для которой не было устоявшегося русскоязычного названия: в статье она обозначена как “осциллирующий электронный заряд”. Возможно, исследование [2] послужило стимулом для появления работ (некоторые обобщены в обзоре [3]) по детальному изучению влияния таутомерии на аналитические свойства реагентов и их комплексов. Переход азотаутомеров *орто*- и *пара*-амино- и гидроксиазосоединений в хинонгидазонную форму происходит не только при хелатообразовании [2], но и в результате присоединения протона. Возникновение или усиление аналитического эффекта в спектрофотометриче-

ских реакциях часто вызвано таутомеризацией, сопутствующей протолитическим равновесиям [4].

В работах [5, 6] дано квантовохимическое (с явным учетом водной среды) и экспериментальное обоснование протонирования ароматических аминокзосоединений по β -атому азота азогруппы, которое обуславливает хиноидизацию, приводящую к увеличению интенсивности аналитического сигнала. На этой основе выявлена совокупность факторов, позволяющая прогнозировать аналитические эффекты при определении нитрит-иона и нитрозосоединений по реакциям азосочетания в водных и мицеллярных средах: суммарный заряд молекулярных систем реагентов и аналитических форм, энергия катионной локализации, энтальпия гидратации, индекс липофильности (гидрофобности) $\lg P$.

Установленные закономерности открывают возможность предсказывать реакционную способность, выход аналитических форм реакций азосочетания с другими азо- и диазосоставляющими и в конечном итоге сравнительные аналитические характеристики реакций. Для такого прогноза необходимо: 1) выяснить вопрос о заряде и гидрофобности реагирующих частиц и продуктов; 2) с помощью подходящего квантовохимического метода оценить энергию активации реакций или энергию катионной локализации; 3) осуществить квантовохимическую оценку энтальпии гидратации либо (при неявном рассмотрении эффекта растворителя) энергии взаимодействия поляризованного растворенного вещества с континуумом растворителя для продуктов реакций, вычислить $\lg P$; 4) с учетом пунктов 1–3 обсудить роль реагентов и интермедиатов, а также влияние водной и мицеллярной сред на реакционную способность и аналитический сигнал [5, 6].

Значительное внимание А.И. Черкесов уделит синтезу, изучению и аналитическому применению фталексонов, сочетающих хромофорную трифенилметановую основу с хелатирующими комплексоновыми фрагментами [7]. В продолжение работ А.И. Черкесова с сотрудниками на основе квантовохимического исследования показано, что для изолированных молекул сульфоталексонов гетероциклическая форма термодинамически более стабильна, чем открытая цвиттер-ионная. Последняя, напротив, преобладает в водной среде [8]. По-видимому, цвиттеризация сульфоталексонов в водных растворах, с одной стороны, является одной из причин наличия окраски у самих аналитических реагентов, а с другой – способствует их комплексообразованию с неорганическими катионами и возникновению аналитического сигнала при фотометрическом определении ионов металлов. Так, отрицательный заряд группы SO_3^- может служить предпо-

сылкой облегченного подхода катиона металла к молекуле реагента. Положительный заряд, в значительной степени локализованный на центральном атоме углерода триарилметановой системы, должен благоприятствовать отщеплению протона фенольной гидроксильной группы с хиноидизацией ароматического кольца, сопровождающейся батохромным сдвигом длинноволновой полосы поглощения в электронном абсорбционном спектре реагента [7, 9]. Кроме того, возникающий при депротонировании реагента карбонильный центр (атом кислорода) обеспечивает координацию с катионом металла при образовании хелата [7, 9].

И еще один пример научной прозорливости А.И. Черкесова. В настоящее время существуют информативные компьютерные методы определения констант устойчивости комплексов с учетом реакций взаимного превращения форм, возникновения полиядерных, полилигандных, полимерных продуктов (в том числе в условиях гидротермального и темплатного синтеза) [10]. В пионерской работе [7] (С. 29) А.И. Черкесов предложил простой расчетно-графический вариант нахождения констант образования умеренно прочных комплексных соединений по степени связывания реагента ионом металла, предполагающий знание типа и стехиометрии реакции (состава комплекса), установленных ранее независимым путем. В свою очередь, степень связывания реагента находится графически по двум значениям оптической плотности растворов: при стехиометрическом соотношении компонентов и при условии практически полного связывания реагента ионом металла. Рекомендовано применение указанного варианта как раз к системам, в которых возможно формирование полиядерных комплексов, а также для комплексов, склонных к образованию непрочных полимерных соединений.

Идеи А.И. Черкесова в области теоретической химии. А.И. Черкесов нашел закономерность: свойства изоструктурных атомов или ионов элементов и их однотипных соединений, во многом определяющие аналитические характеристики различных методов анализа, – температура кипения, энергия (потенциал) ионизации, энергия химической связи, энергия кристаллической решетки, теплота диссоциации, частота собственных колебаний и др. – находятся в гиперболической зависимости от заряда ядра и главного квантового числа (n). Названные взаимосвязи аппроксимируются уравнениями гиперболы второго и третьего порядков [11, 12]. Оценена предсказательная сила утверждения о гиперболичности в отношении свойств тяжелых элементов и их соединений [12]. А.И. Черкесов полагал, что не электронная структура атомов, а нуклонный состав и структура ядер должны быть приняты за отправную точку при конструировании системы

химических элементов [12]. Способ формирования электронных оболочек атомов в соответствии с принципом Паули остается в силе. Однако число элементов в периодах и принцип повторяемости, составляющие основу Периодического закона Д.И. Менделеева, определяются числом независимых состояний нуклонов, а не электронов [12]. А.И. Черкесов описывал квантовые состояния нуклона набором из пяти квантовых чисел: диадного (D), орбитального (l), магнитного, спинового и изоспинового, определяющего так называемый изотопический спин (изоспин) нуклона [12–14]. Проекция изоспина (как и спина) на выделенное направление принимает значения $\pm \frac{1}{2}$ [12, 13]. Введение зарядовой координаты (изоспина [15]) означает признание у нуклона пяти степеней свободы: трех пространственных, спиновой и зарядовой координат [14]. Спорными могут быть связанные с понятием изоспина воззрения [13–15] о взаимопревращениях протона и нейтрона в ядре посредством виртуальной диссоциации с образованием π -мезонов. Возможно, эти представления следует рассматривать лишь как наглядную модель, подобно тому, как спин интерпретировали как угловой момент импульса электрона, возникающий вследствие его вращения вокруг собственной оси. А.И. Черкесов предложил в качестве составляющей полной антисимметризованной волновой функции системы нуклонов рассматривать спин-изоспиновую функцию, в отличие от известной спиновой [12]. Согласно принципу Паули, волновая функция системы тождественных микрочастиц при перестановке пространственных и спиновых координат двух частиц меняет знак, если эти частицы – фермионы, и не меняет знака, если они бозоны [16]. А.И. Черкесов предложил заменить указанную формулировку более общей: волновая функция антисимметрична относительно перестановки пространственных, спиновой и изоспиновой координат для любой пары нуклонов [13, 14]. Система химических элементов А.И. Черкесова [12–14] состоит из диад, каждая из которых включает два периода. Из нее вытекают правило последовательного заполнения электронных оболочек, сформулированное В.М. Ключевским, и отступления от этого правила при высоких значениях n [12–14]. Согласно А.И. Черкесову, число элементов в диаде соответствует числу нетождественных состояний нуклона и равно $4D^2$, емкость (длина) периода составляет $2D^2$. Наименьшее значение n электрона в периоде приравнивается номеру диады D . Номер периода равен $(n + 1)$ [12–14]. Выведены уравнения, которые позволяют решить задачи об атомном номере элемента, у которого в невозбужденном состоянии впервые появляется подуровень с заданным значением l , о заряде ядра, которым заканчивается формирование заполняющегося подуровня, выделить эле-

менты-аналоги и определить инварианты (не зависящие от электронной конфигурации) их атомов [12, 14].

Логично и компактно располагаются блоки s -, p -, d - и f -элементов, легко прогнозируются свойства неоткрытых g - и h -элементов [14]. Теорией А.И. Черкесова подтверждаются актиноидная теория и суперактиноидная гипотеза Сиборга о размещении соответственно тяжелых и сверхтяжелых элементов в Периодической системе [11–13]. Предугадываются современные [17] указания на то, что в скором будущем Периодическая таблица вторгнется в восьмой период. Это вызывает вопросы о том, как следует расширить формат таблицы, и в какой мере она допускает продолжение. Несмотря на возможное расширение (scrambling – взбирание, вскарабкивание) электронных конфигураций посредством релятивистских эффектов, предполагается, что Периодическая таблица будет охватывать дискретно-оболочечный (shell-partitioned) формат отображения – *spdf*-стиль длиннопериодной формы. Чтобы понять, сколь далеко таблица может простираться, обсуждены ядерная устойчивость все больших систем, а также роль распада (деления), предопределяющего конец стабильности и обычных химических ожиданий. Значительно возрастает значимость гравитации, что обуславливает жизнеспособность стабильных ядер астрономического размера, уже присутствующих в природе в виде нейтронных звезд [17]. В начале 2017 г. в Периодическую таблицу включены оставшиеся четыре элемента, завершающих седьмой период экорадонем (атомный номер 118), который назван оганессоном (oganeson, Og) в честь советского и российского ученого, академика Юрия Цолаковича Оганесяна. Кароль оценил возможности дальнейшего заполнения Периодической таблицы и попытался ответить на следующие вопросы. В каком направлении Периодическая таблица продолжит развиваться? Насколько она расширится, будут ли и как скоро обнаружены новые элементы? Где? Существуют ли какие-либо из них в природе? Как синтезируют и регистрируют новые элементы? Каких химических свойств следует от них ожидать? [18].

Из рассуждений А.И. Черкесова следует взаимосвязь ядерных и электронных степеней свободы в атоме. Теория А.И. Черкесова не противоречит данным о происхождении химических элементов во Вселенной [12–14]. Возможно, ядерно-химические процессы инициируются при лазерной абляции [19–21], что может привести к пониманию процессов нуклеосинтеза во Вселенной и разрешить дискуссионные проблемы образования легких элементов в атмосфере Солнца и тяжелых элементов в недрах массивных звезд на поздних стадиях их эволюции [22]. Сказанное по поводу синтеза ядер легких элементов может

иметь отношение к эвристически ценному антропному принципу [23, 24], проявляющемуся в тонкой подстройке звеньев развития материи на космическом этапе для: а) энергии возбужденного уровня ядра атома углерода; б) расположения энергетических уровней ядра атома кислорода; в) автокатализа, обеспечивающего выход углерода при низкотемпературном режиме нуклеосинтеза; г) резонансного состояния бериллия в реакции ядерного синтеза; д) неблагоприятных резонансных условий для превращения углерода в кислород [24].

А.И. Черкесова можно считать провозвестником идеи Евгения Анатольевича Смоленского. Задавшись вопросом “А что же именно запрещает принцип Паули?”, Е.А. Смоленский решает его так: два электрона с параллельными спинами не могут находиться на эквипотенциальной поверхности. В частности, в триплетном состоянии атома гелия независимо от расстояния между электронами запрещено их расположение на одной сфере с центром в ядре. Гипотеза позволяет существенно сузить чрезмерно широкий класс приемлемых антисимметричных волновых функций, выделив только те, которые удовлетворяют граничным условиям, вытекающим из принципа Паули. Подходы, использующие гипотезу Е.А. Смоленского, в перспективе имеют преимущества перед требующими вычислительных мегаресурсов *ab initio* методами, и уже реализованы в методе многоэлектронных волновых функций (МВФ), представляющем новое общее направление в компьютерной квантовой химии по сравнению с методами молекулярных орбиталей и валентных связей ([25–33] и др.). Метод МВФ открывает принципиально новый способ генерации энергии, основанный на переходе возбужденных атомов гелия в суперстабильное возбужденное состояние в сильных и сверхсильных магнитных полях, допускающий создание источника когерентного излучения, мощность которого в тысячи и миллионы раз превосходит известные источники лазерного излучения [33]. В статье “Живое в концепции информационных отображений” сериального тома [34] (С. 164) А.А. Силин констатирует огромную упорядочивающую силу принципа Паули и предлагает обобщить этот принцип на всю природу, раскрыв его универсальный смысл в виде “ни шагу назад”.

* * *

Значение для аналитической химии работ, обсужденных в первой части настоящей статьи, не требует комментариев. Что касается второго раздела статьи, значимость соответствующего блока исследований А.И. Черкесова столь же очевидна и обусловлена, прежде всего, тем, что обширный ряд методов анализа и аналитических свойств ве-

ществ испытывает влияние Периодического закона Д.И. Менделеева. Прогноз свойств атомов, ионов и соединений вновь открываемых, трудных для экспериментального изучения химических элементов даст ключ к пониманию того, какие аналитические методы следует выбрать и адаптировать для их разделения, концентрирования, обнаружения и определения. Продвижение теории и компьютерных методов квантовой химии важно для развития теории строения и действия аналитических реагентов и форм, установления механизмов аналитических реакций, нахождения предсказательных соотношений структура – аналитические свойства (являющиеся в общем сложной функцией многих характеристик веществ и/или молекул и/или заместителей либо фрагментов). При этом под молекулой понимается электронейтральная молекула в обыденном понимании с закрытой электронной оболочкой (в основном и возбужденных состояниях), а также катион, анион, радикал, бирадикал, катион-радикал, анион-радикал, карбен, нитрен, ирид, молекулярный комплекс, эксиплекс, эксимер, сверхвозбужденная ридберговская молекула с размером до 1000 Å, ионный или молекулярный кристалл, кластер (супермолекула), надмолекулярная, супрамолекулярная, поверхностная структура, адсорбционная или каталитическая система и т.д. Упомянутые ядерно-химические процессы могут лечь в основу усовершенствования и модифицирования метода активационного анализа. В наши дни, в период становления новой постнеклассической нелинейно-синергетической научной парадигмы ([23, 24] и др.), самое время обратиться к истокам – воззрениям, изложенным в работах [11–14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ориент И.М.* Наукометрическое исследование публикаций по органическим реагентам // Журн. аналит. химии. 1977. Т. 32. № 3. С. 502.
2. *Черкесов А.И., Алыков Н.М.* Спектрофотометрическое изучение некоторых бисазопроизводных хромотроповой кислоты и их взаимодействия с ионами металлов подгруппы скандия // Журн. аналит. химии. 1965. Т. 20. № 12. С. 1312.
3. *Берштейн И.Я., Гинзбург О.Ф.* Таутомерия в ряду ароматических азосоединений // Успехи химии. 1972. Т. 41. № 2. С. 177.
4. *Ранке-Мадсен Е., Бишоп Э., Баньяи Е., Фритц Д.С., Меджи Р.Д., Рингбом А., Веннинен Э.* Индикаторы / Под ред. Бишопа Э. / Пер. с англ. Матвеевой И.В. / Под ред. Марова И.Н. М.: Мир, 1976. Т. 1. 496 с. (*Rancke-Madsen E., Bishop E., Bányai É., Fritz J.S., Magee R.J., Ringbom A., Wänninen E., Pungor E., Schulek E., Ottaway J.M., Kirkbright G.F., Erdey L.* Indicators / Ed. Bishop E. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig: Pergamon Press, an imprint of Elsevier Ltd., 1972. 746 p. (International Series of Monographs in Analytical Chemistry. V. 51). <https://doi.org/10.1016/C2013-0-02450-4>)

5. *Pankratov A.N.* Azo-coupling reactions used in analytical chemistry: The role of reactants, intermediates, and aqueous medium // *Helvetica Chim. Acta.* 2004. V. 87. № 6. P. 1561.
<https://doi.org/10.1002/hlca.200490143>
6. *Панкратов А.Н.* Аналитические реакции азосочетания: взгляд с точки зрения квантовой химии // *Журн. аналит. химии.* 2005. Т. 60. № 10. С. 1036. (*Pankratov A.N.* Analytical azo coupling reactions: A quantum-chemical consideration // *J. Anal. Chem.* 2005. V. 60. № 10. P. 920.)
<https://doi.org/10.1007/s10809-005-0210-y>
7. *Черкесов А.И., Астахова Н.К., Осокин А.С., Пушинов Ю.В., Мысовская Е.И., Аргиева А.И., Рыжов В.Н., Алыков Н.М., Арзамасцева С.Ф., Черкесов А.А., Смирнов А.Н., Казаков Б.И., Васильчук Н.С., Грунин А.В., Краснов А.И., Тонкошкурков В.С., Посторонко А.И., Карибьянц М.А., Коняхина А.А., Задумина Э.А., Андросова Т.Д., Емжин В.В., Мамин В.И., Щепко В.И.* Фталексоны (синтезы, изучение и аналитическое применение): Науч. труды кафедры орг. химии / Под ред. Черкесова А.И. Саратов: Саратовск. гос. педагогич. ин-т, 1970. 212 с.
8. *Панкратов А.Н., Мустафин А.И.* Строение хелатообразующих аналитических реагентов сульфоталексонов // *Журн. аналит. химии.* 2005. Т. 60. № 5. С. 455. (*Pankratov A.N., Mustafin A.I.* Structure of sulphothalaxons, chelating analytical reagents // *J. Anal. Chem.* 2005. V. 60. № 5. P. 397.)
<https://doi.org/10.1007/s10809-005-0107-9>
9. *Умланд Ф., Янсен А., Тириг Д., Вюниш Г.* Комплексные соединения в аналитической химии. Теория и практика применения / Пер. с нем. Петрухина О.М. М.: Мир, 1975. 533 с. (*Umland F., Janssen A., Thierig D., Wünsch G.* Theorie und praktische Anwendung von Komplexbildnern. Frankfurt am Main: Akademische Verlagsgesellschaft, 1971. 759 S.)
10. *Скопенко В.В., Цивадзе А.Ю., Савранский Л.И., Гарновский А.Д.* Координационная химия. М.: ИКЦ "Академия", 2007. 487 с.
11. *Черкесов А.И.* О гиперболической зависимости некоторых физических и химических свойств изоструктурных атомов элементов и их соединений / Материалы областной науч. конференции по химии / Под ред. Усова Ю.Н. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1972. С. 74.
12. *Черкесов А.И.* Теоретические аспекты естественной системы химических элементов. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1974. 80 с.
13. *Черкесов А.И.* Нуклонный принцип построения естественной системы химических элементов // *Изв. вузов. Химия и хим. технол.* 1975. Т. 18. № 5. С. 691.
14. *Черкесов А.И.* Короткая диадная форма системы химических элементов Д.И. Менделеева (Методическая разработка для углублённого изучения периодического закона). Саратов: Саратовск. пед. ин-т, 1981. 4 с.
15. Изотопический спин / Википедия, Свободная энциклопедия. https://ru.wikipedia.org/wiki/Изотопический_спин (14.03.2022).
16. *Эткинс П.* Кванты. Справочник концепций / Пер. с англ. Ядровского Е.Л. / Под ред. Розенберга Е.Л. М.: Мир, 1977. 496 с. (*Atkins P.W.* Quanta: A Handbook of Concepts. Oxford Chemistry Series / Eds. Atkins P.W., Holker J.S.E., Holliday A.K. Oxford: Clarendon Press, 1974. V. 21. 309 p.) *Atkins P.W.* Quanta: A Handbook of Concepts. 2nd Ed. New York: Oxford University Press, 1991. 434 p.
<https://doi.org/10.1002/qua.560470308>
17. *Karol P.J.* The Mendeleev – Seaborg Periodic table: Through $Z = 1138$ and beyond // *J. Chem. Educ.* 2002. V. 79. № 1. P. 60.
<https://doi.org/10.1021/ed079p60>
18. *Karol P.J.* The Periodic table of the elements: A review of the future / *Elements Old and New: Discoveries, Developments, Challenges, and Environmental Implications* / Eds. Benvenuto M.A., Williamson T. Washington, DC: American Chemical Society, 2017. P. 41. (ACS Symposium Series. V. 1263).
<https://doi.org/10.1021/bk-2017-1263.ch002>
19. *Тимашев С.Ф., Симакин А.В., Шафеев Г.А.* Ядерно-химические процессы в условиях лазерной абляции металлов в водных средах (проблемы "холодного синтеза") // *Журн. физ. химии.* 2014. Т. 88. № 11. С. 1805. (*Timashev S.F., Simakin A.V., Shafeev G.A.* Nuclear-chemical processes under the conditions of laser ablation of metals in aqueous media (problems of "cold fusion") // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2014. V. 88. № 11. P. 1980.)
<https://doi.org/10.1134/S0036024414110168>
20. *Серков А.А., Акованцева А.А., Бармина Е.В., Шафеев Г.А., Мисуркин П.И., Лакеев С.Г., Тимашев П.С.* Роль структуры поверхности в инициировании ядерно-химических процессов при лазерной абляции металлов в водных средах // *Журн. физ. химии.* 2014. Т. 88. № 11. С. 1816. (*Serkov A.A., Akovantseva A.A., Barmina E.V., Shafeev G.A., Misurkin P.I., Lakeev S.G., Timashev P.S.* Influence of the surface structure on the initiation of nuclear-chemical processes under laser ablation of metals in aqueous media // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2014. V. 88. № 11. P. 1989.)
<https://doi.org/10.1134/S0036024414110144>
21. *Timashev S.F.* Physical vacuum as a system manifesting itself on various scales – from nuclear physics to cosmology. arXiv.org, Cornell University Library. Subject: General Physics. Comments. 45 p. <http://arxiv.org/abs/1107.1799v7> (14.03.2022).
22. *Тимашев С.Ф.* Радиоактивный распад ядер как инициируемый ядерно-химический процесс: феноменология // *Журн. физ. химии.* 2015. Т. 89. № 11. С. 1810. (*Timashev S.F.* Radioactive decay as a forced nuclear chemical process: Phenomenology // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2014. V. 89. № 11. P. 2072.)
<https://doi.org/10.1134/S0036024415110199>
23. *Садохин А.П.* Концепции современного естествознания. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 447 с.
24. *Лебедев С.А., Асланов Л.А., Борзенков В.Г., Казарян В.П., Кочергин А.Н., Кудрявцев И.К., Лесков Л.В., Лямин В.С., Познер А.Р., Шербаков А.С.* Философия современного естествознания / Под общ. ред. Лебедева С.А. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2004. 304 с.

25. Смоленский Е.А. Новый подход к принципам построения волновых функций многоэлектронных систем // Изв. АН. Сер. хим. 1995. № 9. С. 1666. (Smolenskii E.A. New approach to principles of constructing wave functions for multielectron systems // Russ. Chem. Bull. 1995. V. 44. № 9. P. 1598.) <https://doi.org/10.1007/BF01151277>
26. Smolenskii E.A., Aristov P.P., Ishenko S.Ya., Shpilkin S.A., Maximoff S.N. Role of wave functions' nodal surfaces in interpretation of the Pauli principle // J. Chem. Inf. Comput. Sci. 1996. V. 36. № 3. P. 402. <https://doi.org/10.1021/ci950086t>
27. Чувылкин Н.Д., Смоленский Е.А., Зефиоров Н.С. Квантово-химические методы построения волновых функций многоэлектронных систем, альтернативные приближению Хартри – Фока // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 11. С. 1118. (Chuvylkin N.D., Smolenskii E.A., Zefirov N.S. Quantum-chemical methods for the construction of wave functions of many-electron systems alternative to the Hartree – Fock approximation // Russ. Chem. Rev. 2005. V. 74. № 11. P. 1027.) <https://doi.org/10.1070/RC2005v074n11ABEH001175>
28. Chuvylkin N.D., Smolenskii E.A., Molchanova M.S., Zefirov N.S. Geometrical properties of nodal surfaces of many-electron wave functions // Int. J. Quantum Chem. 2010. V. 110. № 10. P. 1809. <https://doi.org/10.1002/qua.22365>
29. Чувылкин Н.Д., Смоленский Е.А., Кузьмин И.В., Зефиоров Н.С. Узловые поверхности волновых функций молекулы водорода в триплетном состоянии $^3\Sigma_u^+$ // Изв. АН. Сер. хим. 2010. № 10. С. 1955. (Chuvylkin N.D., Smolenskii E.A., Kuz'min I.V., Zefirov N.S. Nodal surfaces of the wave functions of the hydrogen molecule in the triplet state $^3\Sigma_u^+$ // Russ. Chem. Bull. 2010. V. 59. № 10. P. 2005.) <https://doi.org/10.1007/s11172-010-0347-1>
30. Чувылкин Н.Д., Смоленский Е.А. Априорное определение узловых поверхностей пробных волновых функций атома лития // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 3. С. 649 (Chuvylkin N.D., Smolenskii E.A. A priori estimation of the nodal surfaces of trial wave functions of lithium atom // Russ. Chem. Bull. 2012. V. 61. № 3. P. 652.) <https://doi.org/10.1007/s11172-012-0094-6>
31. Чувылкин Н.Д., Смоленский Е.А., Кузьмин И.В. Априорное определение узловых поверхностей пробных волновых функций молекулы гидрида лития // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 11. С. 2547. (Chuvylkin N.D., Smolenskii E.A., Kuz'min I.V. A priori determination of the nodal surfaces of trial wave functions of lithium hydride molecule // Russ. Chem. Bull. 2013. V. 62. № 11. P. 2547.) <https://doi.org/10.1007/s11172-013-0369-6>
32. Чувылкин Н.Д., Смоленский Е.А. Актуальные вопросы квантовой химии многоэлектронных систем // Изв. АН. Сер. хим. 2015. № 10. С. 2277. (Chuvylkin N.D., Smolenskii E.A. Quantum chemistry of many-electron systems: High-priority aspects // Russ. Chem. Bull. 2015. V. 64. № 10. P. 2277.) <https://doi.org/10.1007/s11172-015-1154-5>
33. Смоленский Е.А., Пивина Т.С., Рыжов А.Н., Маслова Л.К., Зефиоров Н.С. Компьютерное моделирование физико-химических характеристик различных источников энергии // Изв. АН. Сер. хим. 2016. № 6. С. 1395. (Smolenskii E.A., Pivina T.S., Ryzhov A.N., Maslova L.K., Zefirov N.S. Computer-aided modeling of physicochemical characteristics of various energy sources // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 65. № 6. P. 1395.) <https://doi.org/10.1007/s11172-016-1468-y>
34. Шаталов А.Т., Олейников Ю.В., Борзенков В.Г., Батуев А.С., Соколова Л.В., Шульга Е.Н., Варанутин А.В., Авсюк А.Ю., Карпинская Р.С., Лисеев И.К., Олескин А.В., Эрлик С.Н., Волгин О.С., Силин А.А., Воейков В.Л., Добрякова А.В., Каганова З.Е., Сивоконь П.Е., Плюснин Ю.М., Фесенкова Л.В., Суворова О.С., Хен Ю.В. Биофилософия / Отв. ред. тома Шаталов А.Т. М.: Ин-т философии РАН, 1997. 250 с. (Серия: Философский анализ оснований биологии / Под науч. руководством Лисеева И.К.).