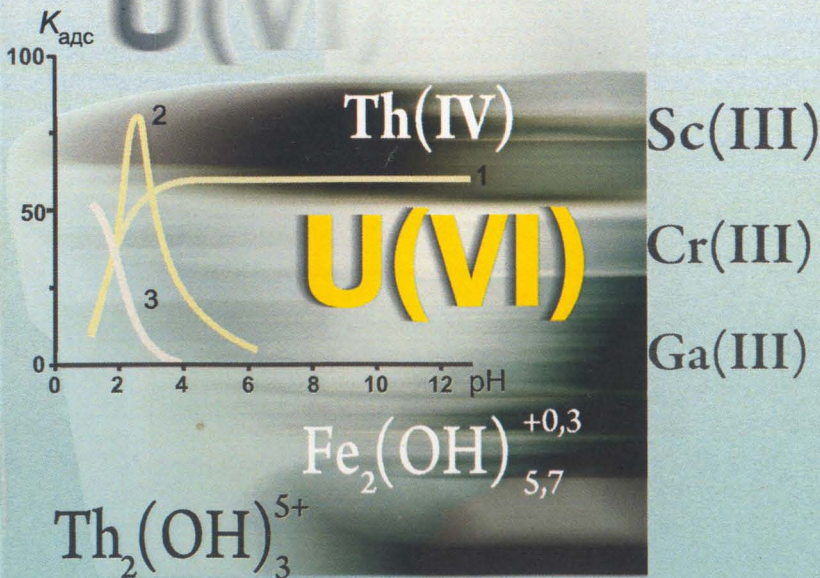




Ю.П. ДАВЫДОВ, Д.Ю. ДАВЫДОВ

# ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛ-ИОНОВ (РАДИОНУКЛИДОВ) В РАСТВОРЕ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Объединенный институт энергетических  
и ядерных исследований – Сосны

**Ю. П. Давыдов, Д. Ю. Давыдов**

---

# **ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛ-ИОНОВ (РАДИОНУКЛИДОВ) В РАСТВОРЕ**



Минск  
«Беларуская навука»  
2011

УДК 543.3:546.79

**Давыдов, Ю. П.** Формы нахождения металл-ионов (радионуклидов) в растворе / Ю. П. Давыдов, Д. Ю. Давыдов. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 301 с. – ISBN 978-985-08-1267-4.

В монографии излагаются закономерности процессов взаимодействия радионуклидов (металл-ионов) с молекулами воды с образованием последовательного ряда моноядерных и полиядерных гидроксокомплексов, частиц коллоидного размера. Даны примеры, показывающие роль гидроксокомплексов металл-ионов как катализаторов ряда процессов, их специфической сорбционной, экстракционной активности, что находит практическое применение при разработке способов разделения и выделения веществ из растворов.

Предназначена для радиохимиков, геохимиков, биохимиков, геологов, океанологов, специалистов, связанных с проблемами охраны и использования водных ресурсов, преподавателей и студентов.

Табл. 99. Ил. 119. Библиогр.: 730 назв.

#### Рецензенты:

доктор химических наук, профессор О. И. Шадыро,  
доктор технических наук Л. Н. Жигунова

**ISBN 978-985-08-1267-4**

© Давыдов Ю. П., Давыдов Д. Ю., 2011  
© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В монографии представлены результаты исследований по определению форм нахождения металл-ионов (радионуклидов) в растворах, образующихся в результате взаимодействия гидратированных катионов с молекулами воды с образованием последовательного ряда моноядерных, полиядерных гидроксокомплексов, частиц коллоидного размера. Развитие данного исследования сдерживалось отсутствием необходимых физико-химических методов исследований.

Чтобы получать достоверные данные о гидролизе катионов с образованием моноядерных гидроксокомплексов в растворах, необходимо проводить исследование с привлечением одновременно нескольких физико-химических методов. Именно такие методы (в том числе и разработанные авторами) всесторонне представлены в работе. Среди них – спектрофотометрия с использованием органических реагентов, диализ, ультрафильтрация, ионный обмен, адсорбция, электромиграция, центрифугирование, потенциометрическое титрование, метод радиоактивных индикаторов и другие. Это практически демонстрируется на примере исследования гидролиза нескольких катионов в растворах.

Приведены экспериментальные данные по определению условий (концентрация, рН раствора), при которых металл-ион переходит из ионного в неионное состояние в растворе, а также экспериментальные данные по определению степени ядерности полиядерных гидроксокомплексов металл-ионов, количества ОН<sup>-</sup>-групп в таком полиядерном комплексе и его заряда.

Совершенно новые результаты излагаются по гидролитическому поведению катионов в присутствии посторонних многозарядных катионов в растворах. Оказалось, что образование полиядерных гидроксокомплексов  $Fe_p(OH)_q$  закономерно уменьшается в присутствии металл-ионов Th(IV), Cr(III), Sc(III), U(VI), Ga(III) в растворах.

Обобщенные и систематизированные результаты исследований изменяют устоявшиеся за долгие годы представления о процессе гидролиза металл-ионов, в особенности о гидролизе с образованием полиядерных гидроксокомплексов в растворе. В опубликованной литературе утверждается, что при гидролизе Fe(III) образуются двуядерные комплексы состава  $Fe_2(OH)_2^{4+}$ , а в монографии приводятся доказательства, что образуются комплексы  $Fe_2(OH)_{5,7}^{+0,3}$ . В случае Th(IV) общепринято, что образуются  $Th_2(OH)_3^{5+}$ , а в монографии разнообразными методами доказывалось образование  $Th_2(OH)_{7,8}^{+0,2}$ .

Значительная часть исследования посвящена изложению свойств, которыми обладают гидратированные катионы, моноядерные и полиядерные гидроксокомплексы металл-ионов в растворах. Наиболее подробно излагается сорбция разнообразных форм элементов сорбентами различной природы (ионообменными смолами, силикагелем, гидроксидами и др.). Показано, что сорбция гидролизованых форм металл-ионов (радионуклидов) не зависит от заряда сорбента и концентрации посторонних солей в растворе.

Представляется, что чем глубже наши знания о составе и устойчивости комплексов, частиц в растворах, тем эффективнее будут технологические решения по очистке растворов от тяжелых металлов, образующихся при работе промышленных предприятий, а также по очистке растворов от радионуклидов, образующихся при работе атомных электростанций и других промышленных предприятий, использующих радиоактивные изотопы.

Имеются две принципиально различные концентрации радионуклидов (металл-ионов) в растворах: более  $10^{-5}$  моль/л

(возможно образование истинных коллоидов, невозможно образование псевдоколлоидов) и менее  $10^{-5}$  моль/л (невозможно образование истинных коллоидов, возможно образование псевдоколлоидов).

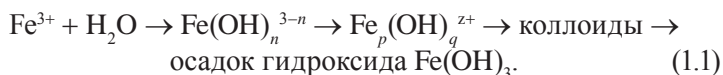
Дело в том, что при концентрации менее  $10^{-5}$  моль/л радионуклиды способны сорбироваться посторонними частицами коллоидного размера, всегда имеющимися в незначительных количествах в воде (сколько бы эту воду не очищали). Сорбируясь этими частицами, радионуклиды начинают вести себя как коллоидные частицы в растворе, т. е. образуют псевдоколлоиды.

Для решения технических вопросов по очистке растворов от радионуклидов не имеет принципиального значения, находится ли радионуклид в форме истинных коллоидов или в форме псевдоколлоидов. Важно определить условия, при которых радионуклиды в растворе находятся в форме частиц, которые задерживаются мембраной или осаждаются при центрифугировании.

Авторы выражают глубокую благодарность В. М. Сацукевич, А. В. Радкевичу, Н. А. Сапруновой за помощь при подготовке рукописи к изданию.

## ГИДРОЛИТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛ-ИОНОВ В РАСТВОРАХ

В растворе по мере изменения концентрации  $H^+$ -ионов, концентрации и природы катионов могут образовываться моноядерные и полиядерные комплексы самого разнообразного состава, полимерные частицы, достигающие коллоидного размера:



В присутствии комплексообразующих анионов уменьшается вероятность образования полиядерных форм и в то же время появляется возможность образования различного состава смешанных моноядерных анион-гидроксокомплексов. Каждая форма комплекса обладает особыми физико-химическими свойствами, определяющими поведение катионов в любых процессах – сорбционных, экстракционных, биологических и физиологических, в процессах миграции в природных водах. И чем полнее и глубже наши знания о составе, структуре, термодинамической устойчивости комплексов в растворах, тем эффективнее будут технические решения по гидрометаллургическим способам переработки сырья, способам извлечения веществ из растворов, регулированию химической активности катионов в самых разнообразных процессах.

В настоящее время считается установленным, что процесс гидролиза катионов в растворе происходит в две стадии: образование моноядерных и полиядерных гидроксо-

комплексов. Поскольку катионы в водных растворах находятся в виде аквакомплексов, например  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ , то образование моноядерных гидроксокомплексов можно представить уравнением:



Данное равновесие характеризуется константой гидролиза, которая для случая образования первого гидроксокомплекса равна

$$K_{\Gamma} = \frac{[\text{Fe}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}][\text{H}_2\text{O}]}. \quad (1.3)$$

Образование гидроксокомплексов в растворе можно представить и как результат замещения молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  в аквакомплексе металл-иона гидроксильным ионом:



Такое равновесие характеризуется константой устойчивости (или нестойкости):

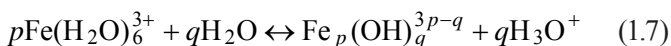
$$K_y = \frac{[\text{Fe}(\text{OH})^{2+}]}{[\text{Fe}^{3+}][\text{OH}^-]}. \quad (1.5)$$

Связь между константой гидролиза  $K_{\Gamma}$  и константой устойчивости  $K_y$  гидроксокомплекса устанавливается из соотношения

$$K_y = K_{\Gamma}/K_w, \quad (1.6)$$

где  $K_w$  – ионное произведение воды.

На второй стадии дальнейшее взаимодействие гидроксокомплексов может привести к образованию сложных полиядерных комплексов, достигающих иногда размера коллоидных частиц. Реакцию гидролиза с образованием гидроксокомплексов в растворе в общем виде можно представить уравнением:

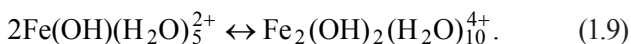




с константой равновесия

$$K_{pq} = \frac{[\text{Fe}_p(\text{OH})_q^{3p-q}][\text{H}_3\text{O}^+]^q}{[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}]^p[\text{H}_2\text{O}]^q}. \quad (1.8)$$

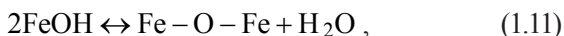
Реакцию с образованием полиядерных комплексов можно записать и как результат взаимодействия моноядерных гидроксокомплексов. Например, для случая образования двуядерных комплексов



Это равновесие характеризуется константой димеризации:

$$K_{22} = \frac{[\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}]}{[\text{Fe}(\text{OH})_2^{2+}]^2}. \quad (1.10)$$

При определенных условиях в растворе (с увеличением рН раствора) могут образоваться и оксокомплексы. Образование такого рода комплексов объясняется взаимодействием между собой моноядерных гидроксокомплексов по реакции



а также углублением гидролиза с отщеплением  $\text{H}^+$ -ионов в полиядерном гидроксокомплексе.

### **1.1. Особенности экспериментального обоснования равновесий при гидролизе катионов с образованием моноядерных гидроксокомплексов**

Известно большое число работ, посвященных изучению гидролитического поведения ионов металлов в растворах, в которых можно найти численные значения констант гидролиза большинства элементов Периодической системы элементов Д. И. Менделеева [1–5]. Обилие констант гидролиза во-первых, создает впечатление достаточно полной изученности процесса гидролиза катионов и, во-вторых, представляет широкие возможности для установления различ-

ных закономерностей устойчивости гидроксокомплексов в зависимости от свойств центрального катиона. Если воспользоваться численными значениями  $K_f$  для катионов без критического отбора, то появляется возможность обосновать любую закономерность. Можно, например, показать, что устойчивость гидроксокомплексов определяется величиной ионного потенциала ( $Z/r$ ), что величина  $K_f$  не зависит от величины  $Z/r$ . С другой стороны, можно также показать, что величина  $K_f$  взаимосвязана с величиной потенциала ионизации и т. д. Накопление констант гидролиза, вычисленных без достаточного экспериментального обоснования, может совершенно запутать и осложнить понимание особенностей гидролитического поведения металл-ионов в растворах.

Проведенный анализ показал, что в настоящее время в случае трёх- и четырёхзарядных катионов с достаточной степенью достоверности определены лишь первые ступенчатые константы гидролиза, и имеются принципиального рода ограничения в определении последующих ступенчатых констант. Покажем это на примере четырехвалентного плутония. По данным работы [2], Pu (IV) при концентрации  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л образует в растворе полимеры при pH 1,6. Молекулярный вес полимеров равен 2 000 000, что соответствует частице со сферическим радиусом 140 Å. Можно полагать, что процесс образования менее сложных форм (димеров, тримеров и т. д.) при данной концентрации Pu(IV) **будет происходить** при более низком значении pH ~1,3. Гидролиз Pu<sup>4+</sup>-катионов начинается при pH 0,8 (образуется 10% комплексов Pu(OH)<sup>3+</sup>), т. е. при концентрации плутония  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л область для исследования гидролиза с образованием мономерных гидроксокомплексов составляет интервал pH 0,8–1,3. На основании вычисленных констант гидролиза рассчитана зависимость распределения гидроксокомплексов Pu(IV) различного состава от pH раствора (рис. 1.1).

Как видно в области pH 1,0–1,3 в заметном процентном отношении к концентрации Pu<sup>4+</sup>-катионов в растворе нахо-

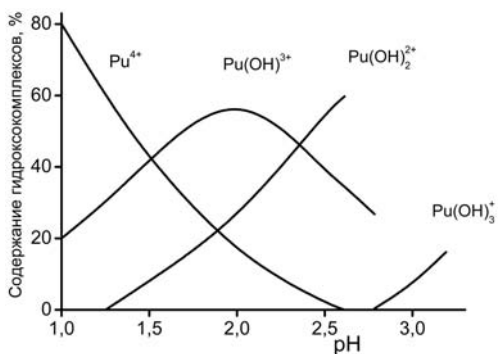


Рис.1.1. Распределение Pu(IV) по формам гидроксокомплексов в растворе

дится лишь комплекс  $Pu(OH)^{3+}$ . Второй комплекс  $Pu(OH)_2^{2+}$  образуется в растворе, начиная с pH 1,5. Таким образом, при концентрации Pu(IV)  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л в растворе не представляется возможным экспериментально определить вторую и последующие константы гидролиза. Казалось бы, чтобы исключить процесс образования полиядерных комплексов в растворе, необходимо проводить исследования при меньших концентрациях ионов металлов. Однако уменьшение концентрации ионов металлов, избавляя от процесса полимеризации, приводит к другому рода ограничениям: сужается круг методов, которые можно использовать для исследования гидролиза, и, главное, заметную роль начинает играть адсорбция иона металла на посторонних частицах коллоидного размера, всегда присутствующих в ничтожных количествах в растворах.

Из рис. 1.2 видно, что, начиная с pH 2,3, наблюдается значительная адсорбция Pu(IV) на посторонних коллоидных частицах с образованием псевдоколлоидов плутония в растворе. Оказывается, эти два процесса (полимеризация и адсорбция на посторонних коллоидных частицах) ограничивают возможности определения ступенчатых констант гидролиза ионов металлов.

В то же время в литературе довольно часто приводятся численные значения ступенчатых констант гидролиза ка-

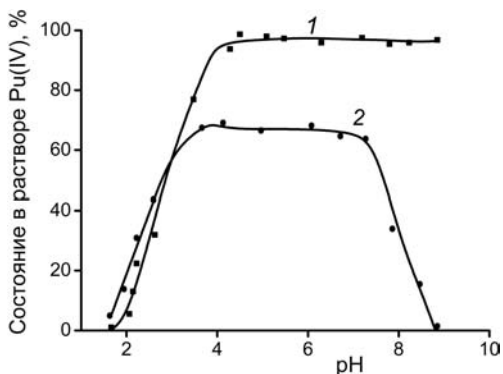


Рис. 1.2. Задержание Pu(IV) при ультрафильтрации растворов (1), адсорбция Pu (IV) на поверхности стекла (2)

тионов, на основании которых рассчитываются и рисуются диаграммы распределения гидроксокомплексов в зависимости от pH раствора. Такие диаграммы построены для многих элементов [4, 5]. Например, в случае Sc(III) приведена диаграмма (рис. 1.3) распределения гидроксокомплексов скандия в растворе вплоть до pH 9,0.

Однако полученные нами экспериментальные данные по диализу Sc(III) свидетельствуют (рис. 1.3), что, начиная с pH > 4,2, скандий переходит в неионное состояние и установить состав и устойчивость комплексов, которые могли бы

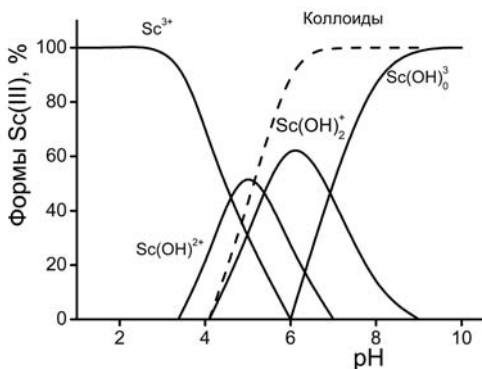


Рис. 1.3. Распределение Sc(III) по формам гидроксокомплексов в растворе

реализоваться в таком растворе, не представляется возможным [6]. Во всех без исключения случаях диаграммы распределения гидроксокомплексов в широком интервале рН не отражают реальных равновесий в растворах.

Анализ показывает, что не только ступенчатые константы гидролиза, но и первые константы гидролиза трех- и четырехзарядных катионов в ряде случаев вычислены без достаточного экспериментального обоснования. Например, в случае трехзарядных катионов редкоземельных и трансурановых элементов первые константы гидролиза, вычисленные различными методами, различаются на семь порядков (от  $10^{-9}$  до  $10^{-2}$ ) [1, 7, 8]. Основная причина расхождения в численных значениях констант гидролиза, на наш взгляд, заключается в произвольном отнесении наблюдаемого авторами изменения свойства металл-иона в растворе в зависимости от рН к определенному гидролитическому равновесию. Например, наблюдая изменение сорбции  $Y(III)$  [9], миграции в электрическом поле  $Y(III)$  и  $Am(III)$  [7], авторы приписали их гидролизу этих катионов и вычислили константы гидролиза. Полученные значения  $K_1$  в случае редкоземельных элементов равны  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  и на шесть-семь порядков отличаются от величины  $K_1$ , вычисленной на основании данных потенциметрического титрования [1, 8]. Единственным прямым методом исследования гидролиза металл-ионов в растворах является метод потенциметрического титрования, и все результаты, полученные с использованием косвенных методов, на наш взгляд, нужно сопоставлять с данным методом. Наблюдаемое расхождение на шесть-семь порядков в значениях  $K_1$  указывает на то, что использование одного косвенного метода может привести к неверному выводу об образовании гидроксокомплексов, когда они в действительности в растворе не реализуются.

Систематические (на протяжении более 40 лет) исследования по гидролизу катионов позволили выработать методологический подход, который позволяет, на наш взгляд, получать достоверные данные, характеризующие определен-

ные гидролитические равновесия в растворах. В основе нашего подхода лежит обязательное использование совокупности физико-химических методов при изучении гидролиза каждого металл-иона в растворе. Покажем это на примере **Pu(IV)**, хотя аналогичные исследования проводились для каждого из перечисленных элементов: U(IV) [10], U(VI) [11], Sc(III) [12], Y(III) [13], Th(IV) [14], Ga(III) [15], Cr(III) [16].

Для исследования готовился исходный раствор Pu(IV) в 1,5 моль/л  $\text{HClO}_4$ . Спектрофотометрически устанавливалось, что в растворе плутоний находится в 4-валентном состоянии. Измерения через полгода после приготовления раствора не обнаружили никаких изменений в спектре поглощения 4-валентного плутония.

Валентность плутония в рабочих растворах (концентрация Pu в  $2 \cdot 10^{-6}$  моль/л) определялась и контролировалась спектрофотометрически с использованием органического реагента арсеназо-3 (рис. 1.4).

Далее устанавливалась область pH, в которой можно исследовать процесс гидролиза, т. е. в которой он не осложнен ни полимеризацией, ни адсорбцией на посторонних частицах

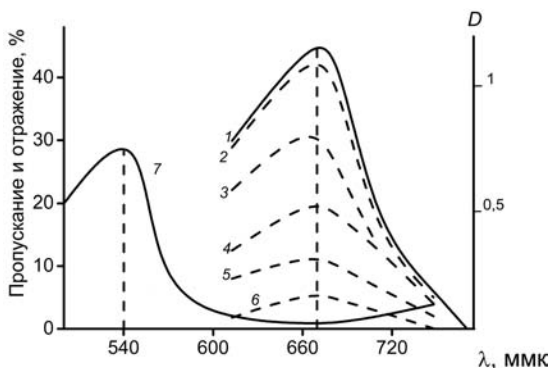


Рис. 1.4. Спектры поглощения растворов арсеназо-3 (7) и его комплексов с Pu(IV): 1 – 0,5; 0,4; 0,3; 0,2 моль/л  $\text{HNO}_3$ ; 2 – pH 1,0; 3 – 1,3; 4 – 1,6; 5 – 1,9; 6 – 2,1

коллоидного размера в растворе. Данные, представленные на рис. 1.5, показывают, что при концентрации  $\text{Pu(IV)}$   $1,2 \cdot 10^{-6}$  моль/л в интервале pH 0,7–2,5 коэффициент диализа  $K_d$  равен 1,0. Следовательно, в этом интервале pH  $\text{Pu(IV)}$  находится в растворе в виде мономерных форм.

Далее устанавливали «реперную» форму катиона, т. е. катиона, который подвергается гидролизу, и определяли тот интервал pH, в котором этот катион присутствует в растворе. Для решения этого вопроса использовали два метода – ионный обмен и спектрофотометрию. Опыты по сорбции  $\text{Pu(IV)}$  катионитом КУ-2 проводили с растворами с постоянной ионной силой, равной 0,5, создаваемой введением в раствор соли  $\text{NaClO}_4$ . Из данных, полученных методом ионного обмена (рис. 1.6), видно, что в интервале pH 0,0–0,7 не наблюдается изменения коэффициента распределения ( $K_p$ ), а данные, полученные методом спектрофотометрии (рис. 1.7), показывают, что в этом интервале pH не изменяется и оптическая плотность раствора ( $D$ ). Эти результаты свидетельствуют о том, что  $\text{Pu(IV)}$  находится в растворе в одной единственной форме.

Для определения формы нахождения  $\text{Pu(IV)}$  в растворе ставились опыты его по сорбции катионитом КУ-2 с перемен-

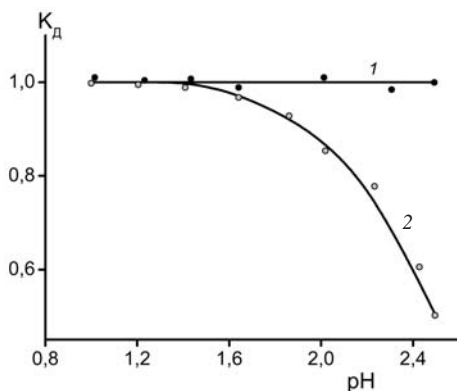


Рис. 1.5. Диализ  $\text{Pu(IV)}$  при концентрациях в растворе  $1,2 \cdot 10^{-6}$  (1) и  $6,0 \cdot 10^{-6}$  (2) моль/л

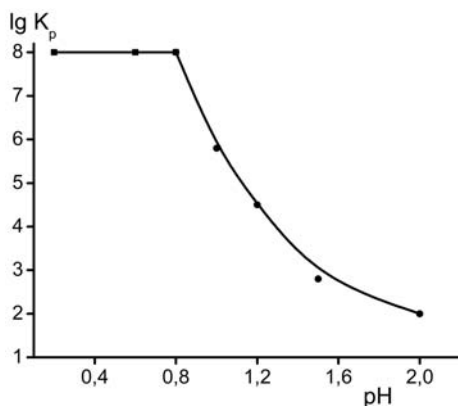


Рис. 1.6. Сорбция Pu(IV) катионитом КУ-2 из растворов с постоянной ионной силой 0,5

ной ионной силой, т. е. изучалось, как изменяется величина сорбции Pu(IV) в зависимости от концентрации H<sup>+</sup>-ионов.

Из данных, представленных на рис. 1.8, видно, что в интервале pH 0,0–0,7 зависимость  $\lg K_p - \lg [H^+]$  линейная и  $\text{tg} \alpha = 4,0 \pm 0,2$ . Этот результат означает, что при сорбции Pu(IV) катионитом на один сорбированный катион Pu(IV) в раствор выделяются четыре H<sup>+</sup>-иона. Следовательно, в указанном

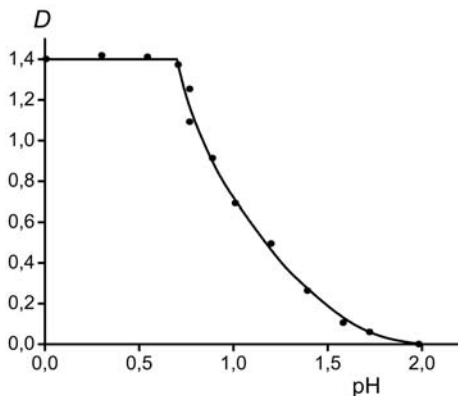


Рис. 1.7. Изменение оптической плотности растворов Pu(IV) с изменением pH раствора (ионная сила раствора 0,5)



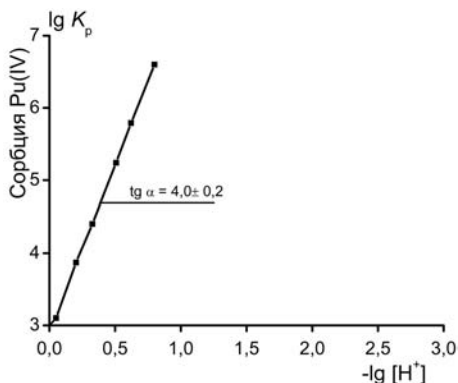
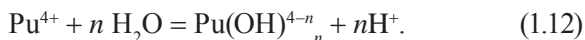


Рис. 1.8. Сорбция Pu(IV) катионитом КУ-2 из растворов с переменной ионной силой

интервале рН Pu(IV) находится в растворе в виде гидратированных катионов  $Pu(H_2O)_6^{4+}$ . И только после этого в интервале рН 0,7–2,3 определялся состав гидроксокомплексов и их термодинамическая устойчивость в растворе.

С этой целью нами разработан спектрофотометрический вариант метода с применением органических реагентов. Использование органических реагентов (в данном случае арсеназо-3) позволяет проводить исследования с низкими концентрациями ионов металлов в растворе ( $C_{Pu} = 2 \cdot 10^{-6}$  моль/л), что очень важно при изучении гидролиза, так как уменьшение концентрации избавляет от процесса полимеризации в растворе. Другое преимущество состоит в том, что смещение гидролитического равновесия за счет комплексообразования органического реагента с  $Pu^{4+}$ -катионами может быть учтено.

Для оценки возможности применения органических реагентов (в частности, арсеназо-3) для исследования состояния Pu(IV) в растворах в области гидролиза необходимо было выяснить, как действует используемый реагент на установившееся гидролитическое равновесие в растворе:



Задача в данном случае состояла в том, чтобы определить, насколько быстро смещается равновесие (1.12) в левую сторону при введении в раствор арсеназо-3 за счет комплексообразования с ним  $\text{Pu}^{4+}$ -катионов.

Готовился ряд растворов плутония в интервале pH 1,0–2,3, которые выдерживались при температуре 20 °С в течение  $\approx 1$  сут. После этого к каждому раствору с заданным значением pH добавляли раствор арсеназо-3 и через определенные промежутки времени производили измерения оптической плотности раствора в области максимума поглощения ( $\lambda = 665\text{--}670$  нм).

Результаты этих опытов представлены на рис. 1.9, из которого видно, что при концентрации  $\text{H}^+$ -ионов 0,5; 0,3 и 0,2 моль/л не наблюдается изменения оптической плотности раствора во времени. Следовательно, в растворах данной кислотности отсутствуют гидролизованные формы  $\text{Pu(IV)}$ . Эти данные указывают также, что равновесие при комплексообразовании  $\text{Pu}^{4+}$ -катионов с арсеназо-3 устанавливается в течение  $< 1$  мин. При наличии в растворе только мономерных гидролизных форм  $\text{Pu(IV)}$  происходит медленное смещение равновесия во времени, видимо, за счет постепенного перехода гидроксокомплексов  $\text{Pu(OH)}_n^{4-n}$  в гидратированные ионы  $\text{Pu(H}_2\text{O)}_6^{4+}$ , которые в свою очередь связываются в комплексы с арсеназо-3.

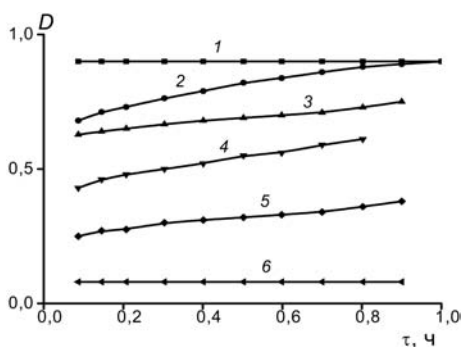


Рис. 1.9. Изменение оптической плотности растворов  $\text{Pu(IV)}$  при концентрации 0,5; 0,3; 0,2 моль/л  $\text{HNO}_3$  (1); pH: 1,0 (2), 1,2 (3), 1,4 (4), 1,7 (5), 2,3 (6)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Гидролитическое поведение металл-ионов в растворах</b>	6
1.1. Особенности экспериментального обоснования равновесий при гидролизе катионов с образованием моноядерных гидроксокомплексов .....	8
1.2. Особенности экспериментального обоснования равновесий при гидролизе катионов с образованием полиядерных гидроксокомплексов .....	19
<b>Глава 2. Гидролиз металл-ионов с образованием моноядерных и полиядерных гидроксокомплексов в растворах</b> .....	48
2.1. Гидролиз двухвалентных металл-ионов.....	48
2.2. Гидролиз трехвалентных металл-ионов.....	51
2.3. Гидролиз четырехвалентных металл-ионов .....	70
2.4. Гидролиз пяти- и шестивалентных металл-ионов .....	86
<b>Глава 3. Состояние микроколичеств радионуклидов в растворах</b> .....	90
<b>Глава 4. Физико-химические особенности свойств гидроксокомплексов в растворах</b> .....	123
<b>Глава 5. Состояние отдельных металл-ионов (радионуклидов) в растворах</b> .....	147
<b>Литература</b> .....	274

Научное издание

**Давыдов** Юрий Петрович  
**Давыдов** Дмитрий Юрьевич

**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛ-ИОНОВ  
(РАДИОНУКЛИДОВ) В РАСТВОРЕ**

Редактор *И. С. Александрович*  
Художественный редактор *И. Т. Мохнач*  
Технический редактор *М. В. Савицкая*  
Компьютерная верстка *О. Л. Смольская*

Подписано в печать 27.04.2011. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,86.  
Уч.-изд. л. 12,5. Тираж 120 экз. Заказ 108.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом  
«Беларуская навука». ЛИ 02330/0494405 от 27.03.2009.  
Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.