

Устойчивость нептуния(V) в концентрированных растворах уксусной кислоты

© А. В. Гоголев*^а, В. П. Шилов^а, А. А. Бессонов^а, А. М. Федосеев^а

*Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,
119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4; *e-mail: gogolev@ipc.rssi.ru*

Получена 05.08.2018, после доработки 24.02.2019, принята к публикации 25.02.2019

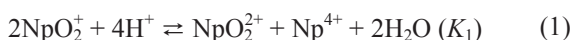
УДК 546.799.3

Ацетат Np(V) в ледяной уксусной кислоте и водных уксуснокислых растворах устойчив к диспропорционированию и находится в равновесии с осадком $\text{NpO}_2(\text{Ac})\cdot\text{H}_2\text{O}$. За время обезвоживания с помощью избытка уксусного ангидрида Np(V) диспропорционирует. Обратный процесс репропорционирования имеет место после внесения избытка воды в безводную уксусную кислоту, содержащую уксусный ангидрид, Np(IV) и Np(VI). Внесение HClO_4 вызывает быстрое диспропорционирование Np(V) в безводной уксусной кислоте и концентрированных уксуснокислых растворах. В спектрах взвесей в концентрированной уксусной кислоте, содержащих Np(V) и ацетат калия, имеются полосы поглощения с максимумами при 990 и 1020 нм, отнесенные нами к анионам $\text{NpO}_2(\text{Ac})_2^{2-}$ и частицам соединения $\text{K}_2\text{NpO}_2(\text{Ac})_3$ соответственно.

Ключевые слова: нептуний(V), уксусная кислота, диспропорционирование.

DOI: 10.1134/S0033831119050010

Нептунилтриацетат натрия был одним из первых полученных соединений Np [1, 2]. За прошедшее время накоплен значительный объем информации, относящейся к взаимодействию ацетат-ионов с ионами Np различной валентности в твердой и жидкой фазе и подробно цитированной в работах [3, 4]. Тем не менее, интерес к этой теме сохраняется и в настоящее время [5]. Ион NpO_2^+ , способный координировать до трех ацетат-ионов, является наиболее устойчивой формой в водных уксуснокислых растворах. Мы предположили, что при увеличении концентрации уксусной кислоты (HAc) устойчивость нептуноил-ионов снижается подобно тому, что наблюдается в случае Am(V) [6]. Реакция диспропорционирования Np(V)



протекает обычно либо в сильнокислых средах, либо в присутствии лигандов, образующих комплексы с Np(IV) и Np(VI), либо в растворах с пониженным содержанием воды. В представленной работе изучена устойчивость Np(V) в концентрированных растворах уксусной кислоты.

Экспериментальная часть

В работе использованы соединения изотопа ^{237}Np , преимущественно $\text{NpO}_2\text{Ac}\cdot\text{H}_2\text{O}$. Хлорная кислота х.ч. содержала 11 моль/л HClO_4 и 29.6 моль/л H_2O . Уксусная кислота (HAc) и уксусный ангидрид $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$ (Ac_2O) имели квалификацию ч.д.а. Растворы ацетата лития (LiAc) готовили из CH_3COOH и LiOH . Соединения $\text{KNpO}_2(\text{CO}_3)\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n \sim 2$) и $\text{K}_3\text{NpO}_2(\text{CO}_3)_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ осаждали из растворов K_2CO_3 согласно работе [7]. При необходимости использовали дважды дистиллированную воду.

Была сделана попытка получать раствор Np(VI) путем озонирования взвесей 2 ммоль/л Np(V) в уксусной кислоте, содержащей 2.6 моль/л H_2O . Относительно быстро (~5 мин) Np(V) переходит полностью в Np(VI). В спектре оптического поглощения таких растворов присутствует только полоса поглощения с максимумом около 1220 нм. Однако при дальнейшем озонировании в растворе снова появляется Np(V). После прекращения озонирования в растворе также быстро возникает Np(V). Вероятно, во время и после окончания озонирования имеет место взаимодействие Np(VI) с продуктами реакции озона с растворителем.

Присутствие валентных форм Np контролировали спектрофотометрически в кварцевой кювете ($l = 1$ см) на приборе Shimadzu UV 3101 PC (Япония) в диапазоне 380–1300 нм. Для расчетов концентрации Np использовали полосу поглощения аква-иона около 980 нм {молярный коэффициент погашения $\epsilon = 395$ л/(моль·см) [8]}. Так как положение максимумов полос поглощения зависит от состава раствора, были изучены спектры поглощения ацетатно-уксуснокислых растворов ионов Np.

ИК спектры твердых соединений регистрировали на приборе UR-20 (бывшая ГДР). Для приготовления твердых матриц, содержащих соединения Np, использовали плавленый KBr.

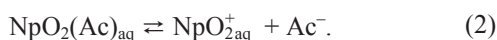
Результаты и обсуждение

Нептуноил-ионы NpO_2^+ в ацетатных и уксуснокислых растворах образуют осадок $\text{NpO}_2\text{Ac}\cdot\text{H}_2\text{O}$, растворимость которого снижается при уменьшении концентрации воды [9]. В процессе синтеза необходимого нам в исследованиях ацетата нептуноила

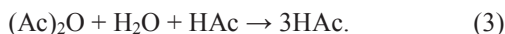
нами было отмечено, что в спектрах ледяной уксусной кислоты после отделения осадка $\text{NpO}_2(\text{Ac})\cdot\text{H}_2\text{O}$ появляются слабые полосы оптического поглощения, вероятно, принадлежащие Np(IV) и (VI) . В дальнейшем были выполнены эксперименты, необходимые для выяснения устойчивости Np(V) в концентрированных уксуснокислых растворах.

В результате добавления в ледяную уксусную кислоту ацетата нептуноила $\text{NpO}_2(\text{Ac})\cdot\text{H}_2\text{O}$ мы получили взвеси, пригодные для записи спектров оптического поглощения. В спектрах таких взвесей присутствуют явно выраженные полосы поглощения с максимумами ($\lambda_{\text{макс}}$) при 980.2–980.7 и 1008 нм (рис. 1, спектр 1). Центрифугирование приводит к отделению взвеси и исчезновению принадлежащей ей полосы поглощения с $\lambda_{\text{макс}} = 1008$ нм (рис. 1, спектр 2).

В растворе остается полоса с $\lambda_{\text{макс}} = 980.7$ нм, обусловленная, вероятно, равновесной смесью акваионов и моноацетатных комплексов Np(V)



Внесение в содержащую Np(V) ледяную уксусную кислоту уксусного ангидрида вызывает исчезновение полосы поглощения Np(V) ($\lambda_{\text{макс}} = 982$ нм) и рост полос в области поглощения Np(IV) ($\lambda_{\text{макс}} = 733$ нм) и Np(VI) ($\lambda_{\text{макс}} = 1249$ нм) (рис. 1, спектр 3). Такие изменения связаны с удалением из ледяной уксусной кислоты примеси воды по реакциям



Замещение молекул воды ацетат-ионами или молекулами уксусной кислоты смещает равновесие реакции (1) вправо. Автокаталитическая реакция (3) протекает в концентрированных растворах уксусной кислоты достаточно быстро [10]. Реакция (1) также относительно быстрая. Например, к 0.95 мл раствора, содержащего 16.6 моль/л $\text{HAc} + 1.7$ моль/л $\text{H}_2\text{O} + 0.53$ моль/л $\text{HClO}_4 + \text{NpO}_2(\text{Ac})$ добавили 0.3 мл $(\text{Ac})_2\text{O}$. Полоса поглощения с $\lambda_{\text{макс}} = 980.7$ нм и начальной оптической плотностью 0.57 в полученном растворе исчезла полностью через 28 мин после смешивания. В таком процессе параллельно протекают реакции (2) и (3) и смещается в правую сторону равновесие (1). Безводную уксусную кислоту при необходимости получали, добавляя в HAc $(\text{Ac})_2\text{O}$, и хранили до начала экспериментов ~20 ч.

Обратный процесс репропорционирования протекает при добавлении H_2O к смешанному растворителю $\text{HAc}-(\text{Ac})_2\text{O}$, содержащему Np(IV) и Np(VI) . Избыток воды удаляет из раствора $(\text{Ac})_2\text{O}$ и смещает равновесие реакции (1) влево вследствие протекания реакций (2) и (3) и гидратации возникающих ионов Np(V) . В HAc , содержащей ~0.06 моль/л H_2O , Np(IV) и Np(VI) полностью превращаются в Np(V) за ~40 мин.

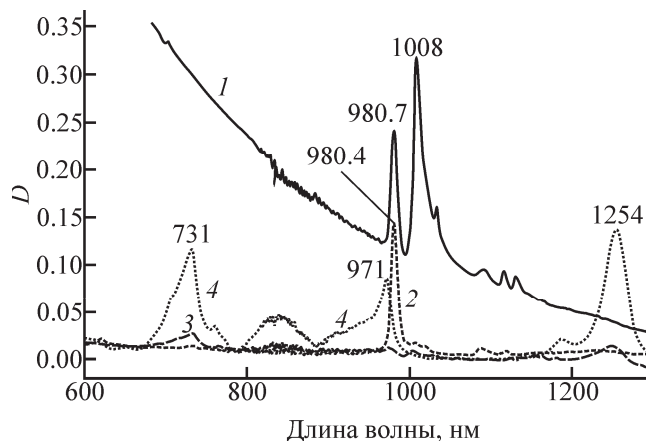


Рис. 1. Спектры растворов и взвеси, содержащих $\text{NpO}_2(\text{Ac})$: 1 – взвесь 1.6 мг $\text{NpO}_2(\text{Ac})\cdot\text{H}_2\text{O}$ в 17.5 моль/л HAc ; 2 – раствор после центрифугирования вышеуказанной взвеси; 3 – $[\text{HAc}] = 14$, $[(\text{Ac})_2\text{O}] = 2.1$, $\sum[\text{Np}] = 6 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 4 – $[\text{HAc}] = 15.2$, $[(\text{Ac})_2\text{O}] = 0.25$, $[\text{HClO}_4] = 0.4$, $\sum[\text{Np}] = 1.76 \cdot 10^{-3}$ моль/л.

Значение константы равновесия K_1 зависит от соотношения концентраций HAc , H_2O и HClO_4 . Например, в HAc , содержащей 0.9 моль/л $\text{HClO}_4 + 5.3$ моль/л H_2O $K_{\text{равн}} = 0.217$. В безводной уксусной кислоте, содержащей HClO_4 , Np(V) полностью диспропорционирует в соответствии с реакцией (1). Пример спектра раствора, полученного в результате полного диспропорционирования Np(V) , приведен на рис. 1, спектр 4.

Спектры ионов Np в растворах, содержащих ацетаты лития или калия, свидетельствуют о присутствии различных комплексных форм.

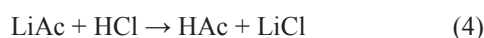
Для ионов Np(IV) наблюдается сдвиг $\lambda_{\text{макс}}$ в сторону длинных волн и уменьшение коэффициентов погашения. Например, в спектре 4 на рис. 1 $\lambda_{\text{макс}}$ находятся при 731 и 974 нм. Полоса с $\lambda_{\text{макс}} = 973$ нм в значительной степени перекрывается с полосой поглощения Np(V) с $\lambda_{\text{макс}} = 980.7$ нм. Смещение полосы поглощения Np(IV) с интервале $\lambda_{\text{макс}} = 723-733$ нм в водно-органическом растворителе ранее наблюдали в работе [10]. В растворе, содержащем 13 моль/л $\text{HAc} + 2.3$ моль/л $(\text{Ac})_2\text{O} + 0.4$ моль/л HClO_4 , значения $\lambda_{\text{макс}}$ для Np(IV) составляют 731.4 и 973.6 нм. Вероятно, в ацетатных и уксуснокислых растворах имеет место образование полимерных частиц Np(IV) , как это происходит в уксуснокислых растворах Pu(IV) [11].

В спектре Np(VI) $\lambda_{\text{макс}}$ и ϵ также зависят от $[\text{H}^+]$ и $[\text{H}_2\text{O}]$. Значительный рост $\epsilon_{\text{макс}}$ для Np(VI) может быть объяснен полным замещением молекул воды на молекулы недиссоциированной HAc в координационной сфере иона металла. Подтверждением этого предположения может быть рост $\epsilon_{\text{макс}}$ при увеличении концентрации HClO_4 и $(\text{Ac})_2\text{O}$. Для раствора, содержащего 16.7 моль/л $\text{HAc} + 0.5$ моль/л $(\text{Ac})_2\text{O} + 4.54 \cdot 10^{-3}$ моль/л Np(VI) , $\lambda_{\text{макс}} = 1252$ нм и $\epsilon_{1251} =$

119 л/(моль·см). Максимальный сдвиг длинноволновой полосы Np(VI) ($\lambda_{\text{макс}} = 1256$ нм) в наших экспериментах наблюдался для раствора, содержащего 13 моль/л HAc + 2.3 моль/л (Ac)₂O + 0.4 моль/л HClO₄. В работе [3] изменения в спектре Np(VI) при росте pH ацетатных растворов связаны с последовательным образованием моно-, ди- и триацетатных комплексов.

Характерная для гидратированных ионов Np(V) полоса поглощения с $\lambda_{\text{макс}} = 980.4$ нм при увеличении концентрации HAc почти не сдвигается в длинноволновую сторону ($\lambda_{\text{макс}} = 980.7$ нм). В безводной уксусной кислоте $\lambda_{\text{макс}}$ сдвигается до 982 нм, при этом оптическое поглощение невелико вследствие малой растворимости NpO₂(Ac)·H₂O. По-видимому, вследствие малой величины константы автопротолиза концентрация ацетат-ионов в уксусной кислоте недостаточна для образования ди- и триацетатных комплексов Np(V). Устанавливается равновесие в соответствии с реакцией (2). Рост концентрации LiAc вызывает более существенный сдвиг $\lambda_{\text{макс}}$, при этом коэффициент погашения $\epsilon_{\text{макс}}$ значительно снижается (табл. 1). Аналогичный эффект вызывает рост концентрации NaAc [4, 5] и рост pH ацетатных растворов [3].

Из табл. 1 следует, что добавка HAc не влияет на $\lambda_{\text{макс}}$ и $\epsilon_{\text{макс}}$. В растворе, содержащем 9.5 моль/л HAc + 0.93 моль/л LiAc, $\lambda_{\text{макс}} = 985.2$ нм и $\epsilon_{\text{макс}} = 199$ л/(моль·см), что близко к приведенным в табл. 1 значениям при длинах волн 985.4 и 985.8 нм. Добавка сильной кислоты превращает ацетат-ионы в уксусную кислоту



и подавляет ее диссоциацию. Такое снижение концентрации ацетат-ионов приводит к диссоциации ацетатных комплексов нептуноила и возвращает $\lambda_{\text{макс}}$ и $\epsilon_{\text{макс}}$ к значениям, характерным для аква-иона нептуноила. Приведенная в табл. 1 в численном виде для растворов LiAc эмпирическая зависимость $\epsilon_{\text{макс}}$ от $\lambda_{\text{макс}}$ в графическом виде является линейной и может быть использована для определения наблюдаемого коэффициента погашения по спектру и расчета концентрации Np(V).

В концентрированных растворах уксусной кислоты, содержащих внесенные в составе соединений KNpO₂(CO₃)_n·nH₂O и K₃NpO₂(CO₃)₂·nH₂O ионы K⁺, ацетатные соединения нептуноила практически нерастворимы. Однако в HAc, содержащей 1 моль/л KAc, ацетатные соединения нептуноила растворяются, очевидно, вследствие комплексообразования с избытком ацетат-ионов. В спектре таких растворов имеется полоса поглощения с $\lambda_{\text{макс}} = 990$ нм. При последовательном добавлении H₂O $\lambda_{\text{макс}}$ смещается в сторону коротких длин волн (табл. 2).

Таблица 1. Влияние [LiAc] на спектр водных растворов в области наиболее интенсивной полосы поглощения при [Np(V)]₀ = 3 ммоль/л

[LiAc], моль/л	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	$\epsilon_{\text{макс}}$, л/(моль·см)
0	980	395 ^a
0.11	981.4	279
0.22	983	245
0.41	984.2	226
0.58	985.4	212
0.81	985.8	193
0.72 ^b	985.8	194
0.65 ^b	980.8	375

^a Из работы [8].

^b Раствор содержит 1.9 моль/л HAc.

^b Раствор содержит 1.7 моль/л HAc + 1.1 моль/л HCl.

Таблица 2. Влияние [H₂O] на спектр ацетатных растворов в области наиболее интенсивной полосы поглощения Np(V)

[AcH], моль/л	[KAc], моль/л	[H ₂ O], моль/л	$\lambda_{\text{макс}}$, нм
16.5	1.0	1.0	990
15.7	0.95	3.6	988.6
15	0.91	6	987.6
13.7	0.83	10	986.2
12.7	0.77	13.6	985.2
11	0.67	19	985.7
9.5	0.9	23.7	985.2 ^a

^a Для этого раствора $\epsilon_{\text{макс}} = 197$ л/(моль·см), что соответствует зависимости $\lambda_{\text{макс}}-\epsilon_{\text{макс}}$ для содержащих Np(V) растворов LiAc (табл. 1).

Введение (Ac)₂O в уксуснокислые растворы, содержащие 1 моль/л KAc и растворимые ацетатные комплексы Np(V), не вызывает диспропорционирования. Внесение сильной кислоты приводит к быстрому диспропорционированию Np(V) в тех же условиях.

В отсутствие (Ac)₂O ледяная уксусная кислота медленно растворяет NpO₂Ac·H₂O. Через 3 сут концентрация Np(V) в растворе над осадком составляла $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ моль/л. В спектре относительно устойчивой взвеси (рис. 1, спектр 1) присутствует полоса поглощения с $\lambda_{\text{макс}}$ около 1008–1009 нм, которая исчезает после центрифугирования раствора.

Аналогичный спектр был получен для кристаллических NpO₂Ac·H₂O и NpO₂Ac в матрицах из NaCl [12]. По-видимому, взвесь с $\lambda_{\text{макс}}$ около 1008–1009 нм содержит мелкокристаллический ацетат нептуноила.

В содержащих KAc уксуснокислых растворах спектр взвеси имеет два максимума при 1009 и 1018–1022 нм (рис. 2, спектр 2). Соединение с $\lambda_{\text{макс}} \sim 1020$ нм образуется в чистом виде при внесении K₃NpO₂(CO₃)₂·nH₂O в безводную уксусную кислоту (рис. 2, спектр 1). Электронный спектр поглощения (ЭСП) этого соединения в матрице из KBr содержит

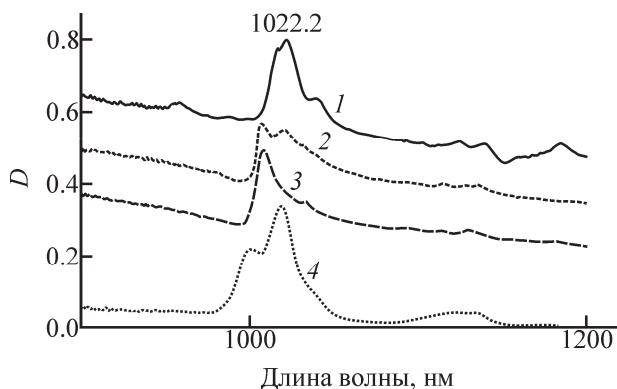


Рис. 2. Спектры взвесей соединений Np(V) в уксусной кислоте: 1 – 5 мг $K_3NpO_2(CO_3)_2 \cdot nH_2O$, $[HAc] = 16.7$, $[(Ac)_2O] = 0.5$ моль/л; 2 – 4 мг $NpO_2(Ac) \cdot H_2O + K_xNpO_2(Ac)_{x+1} \cdot nH_2O$, $[HAc] = 16.7$, $[(Ac)_2O] = 0.5$ моль/л; 3 – 0.7 мг $NpO_2Ac \cdot nH_2O$, $[HAc] = 14.6$, $[(Ac)_2O] = 1.7$ моль/л; 4 – 2.928 мг $K_xNpO_2(Ac)_{x+1} \cdot nH_2O + 212$ мг KBr.

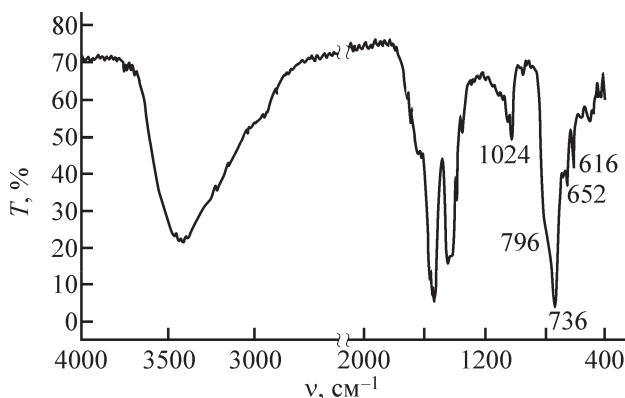


Рис. 3. ИК спектр предполагаемого соединения $K_2NpO_2(Ac)_3$. Взято 2.982 мг $K_2NpO_2(Ac)_3$ в 212 мг KBr.

полосу с $\lambda_{\max} = 1018$ нм (рис. 2, спектр 4). Для сравнения на рис. 2 дан спектр 3, принадлежащий взвеси $NpO_2Ac \cdot H_2O$ в HAc в отсутствие ионов калия с одним максимумом при 1009 нм. Очевидно, что полоса поглощения с $\lambda_{\max} = 1018$ –1022 нм обусловлена присутствием ионов калия в твердой фазе взвеси.

Интенсивную полосу поглощения в ИК спектре с максимумом при 736 см^{-1} и плечом при 796 см^{-1} (рис. 3), очевидно, следует отнести к антисимметричным валентным колебаниям нептуноила(V). Ранее неоднократно отмечалось [13], что заметное смещение этой полосы в низкочастотную область однозначно свидетельствует о наличии в структуре соединений катион-катионного (КК) взаимодействия нептуноильных групп. Кроме того, расщепление $\nu_{as}(NpO_2^+)$ может служить свидетельством их взаимной бидентатной координации, что подтверждается положением максимума основной полосы в электронном спектре поглощения соединения (1018 нм, рис. 2).

Слабая полоса при 652 см^{-1} может быть отнесена к симметричным валентным колебаниям $\nu_s(NpO_2^+)$. В этом случае можно сделать заключение о присут-

венной неравноценности связей Np–O в диоксокатионе. Это часто имеет место при монодентатной КК координации ильных катионов. На наличие такой особенности строения соединения указывает присутствие в ЭСП второй полосы поглощения (1001 нм). Таким образом, по данным спектрального анализа можно предполагать наличие в структуре соединения двух кристаллографически неэквивалентных нептуноильных группировок, причем одна из них является бидентатно связанной, тогда как другая монодентатно координирована к соседнему атому Np. Однако окончательное заключение о строении синтезированного соединения может быть сделано только после приготовления его в виде монокристаллов и проведения прямого структурного исследования.

Термическое разложение ацетата нептуноила калия при нагреве до 800°C приводит к черному остатку, который в растворе 0.1 моль/л HNO_3 мгновенно становится зеленовато-желтым. В раствор переходит Np(V), однако большая часть осадка не растворяется. Потеря массы при термическом разложении составляет 33%. Расчеты показывают, что в исходном веществе на 1 моль NpO_2Ac приходится 1.9 моль KAc. Вероятно, основным веществом в твердой фазе, дающим спектр 4 на рис. 2, является $K_2NpO_2(Ac)_3$.

Взвеси $NpO_2(Ac) \cdot H_2O$, имеющие в спектре полосу поглощения с $\lambda_{\max} \sim 1008$ нм, были получены нами в уксуснокислых и содержащих ацетат лития растворах. В таких растворах присутствуют также полосы поглощения с λ_{\max} в интервале 980–985 нм. Согласно работам [4, 5], они принадлежат аква-иону и моноацетатному комплексу Np(V). Следовательно в растворе устанавливается равновесие согласно реакциям (2) и (5)



Однако, согласно рисунку в статье [3], моноацетатный комплекс имеет полосу поглощения, почти идентичную полосе аква-иона Np(V). Для $NpO_2(Ac)_2^-$ и $NpO_2(Ac)_3^{2-}$ расчетные максимумы находятся при ~ 981.2 и 985.4 нм соответственно. Образование трех ацетатных комплексов Np(V) подтверждено методом EXAFS [3]. Содержащая в своем составе ионы K^+ взвесь [предположительно $K_2NpO_2(Ac)_3$] была получена в безводной уксусной кислоте в присутствии KAc. Спектр такой взвеси содержит полосы поглощения с $\lambda_{\max} \sim 1020$ и 990 нм. При разбавлении водой полоса 990 последовательно сдвигается до 985 нм. Следовательно, для комплекса $NpO_2(Ac)_3^{2-}$ нахождение λ_{\max} при 985 нм представляется маловероятным.

В уксуснокислых растворах Np(V) устойчив и находится в виде $NpO_2^+_{\text{aq}}$ и $NpO_2(Ac)_{\text{aq}}$. Вследствие

малой растворимости из уксуснокислых водных растворов осаждаются $\text{NpO}_2(\text{Ac})\cdot\text{H}_2\text{O}$, из безводной уксусной кислоты также осаждаются $\text{NpO}_2(\text{Ac})$, вероятно, безводный. Ацетат нептуноила более растворим в ледяной уксусной кислоте, содержащей KAc . Из безводной и ледяной уксусной кислот, содержащих ацетат калия, осаждается соединение, в состав которого входят ионы калия. Предположительно осадок содержит $\text{K}_2\text{NpO}_2(\text{Ac})_3$. Ассоциация ионов становится возможной вследствие низкой диэлектрической проницаемости уксусной кислоты ($\epsilon = 6.2$) по сравнению с водой ($\epsilon = 80$).

Список литературы

- [1] Magnusson L. B., LaChapelle T. J. // J. Am. Chem. Soc. 1948. Vol. 70, N 11. P. 3534–3538.
- [2] Fried S., Davidson N. // J. Am. Chem. Soc. 1948. Vol. 70, N 11. P. 3539–3547.
- [3] Takao K., Takao S., Scheinost A. C. et al. // Inorg. Chem. 2009. Vol. 48, N 18. P. 8803–8810.
- [4] Rao L., Tian G., Srinivasan T. G. et al. // J. Solution Chem. 2010. Vol. 39, N 12. P. 1888–1897.
- [5] Maiwald M. M., Skerencak-Frech A., Panak P. J. // New J. Chem. 2018. Vol. 42, N 10. P. 7796–7802.
- [6] Ананьев А. В., Шилов В. П. // Радиохимия. 1992. Т. 34, N 1. С. 125–132.
- [7] Висящева Г. И., Волков Ю. Ф., Симакин Г. А. и др. // Радиохимия. 1974. Т. 16, N 6. С. 853–859.
- [8] Hagan P. G., Cleveland J. M. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1966. Vol. 28, N 12. P. 2905–2909.
- [9] Бессонов А. А., Григорьев М. С., Афонасьева Т. В., Крот Н. Н. // Радиохимия. 1989. Т. 31, N 4. С. 33–37.
- [10] Cohen B., Amis E. S., Sullivan J. C., Hindeman J. C. // J. Phys. Chem. 1956. Vol. 60, N 5. P. 701–702.
- [11] Alei M., Jonson Q. C., Cowan H. D., Lemons J. F. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1967. Vol. 29, N 9. P. 2327–2339.
- [12] Бессонов А. А., Афонасьева Т. В., Крот Н. Н. // Радиохимия. 1990. Т. 32, N 5. С. 31–35.
- [13] Крот Н. Н., Григорьев М. С. // Успехи химии. 2004. Т. 73, N 1. С. 89–100.