

ПОВЕДЕНИЕ ПЛУТОНИЯ(V) В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

© 2022 г. А. А. Бессонов*, В. П. Шилов**

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

Поступила в редакцию 12.10.2021, после доработки 08.06.2022, принята к публикации 15.06.2022

Плутоний(V) в средах, близких к нейтральным, существует в виде катиона PuO_2^+ , который мигрирует и проявляет слабую склонность к комплексообразованию и сорбции. Рассмотрены условия сорбции Pu(V) на поверхности минеральных частиц разной природы и восстановление Pu(V) до Pu(IV) с образованием PuO_2 , стимулированное поверхностью. Действие видимого света ускоряет процесс. Механизмы, основанные на полупроводниковых свойствах минералов, реакции диспропорционирования или реакции с продуктами α -радиолиза не могут быть реализованы по разным причинам. Предлагается механизм, включающий образование возбужденным ионом Pu(V) с невозбужденным ионом Pu(V) димера, так называемого эксимера, который сорбируется на поверхности минерала и превращается в PuO_2 . Проведен термодинамический расчет, подтверждающий возможность такой реакции. При концентрациях плутония 10^{-18} – 10^{-16} моль/л основное влияние на поведение плутония оказывает взаимодействие с органическими веществами, микроорганизмами, фотолиз и реакции с продуктами радиолиза воды, возникающими под действием излучений изотопов урановых семейств и ^{40}K .

Ключевые слова: плутоний(V), поведение в окружающей среде

DOI: 10.31857/S0033831122060028, **EDN:** MFFVYT

Плутоний может существовать в растворах в нескольких степенях окисления одновременно – Pu(III) , Pu(IV) , Pu(V) , Pu(VI) , или в виде гидратированных ионов $\text{Pu}^{3+}_{\text{aq}}$, $\text{Pu}^{4+}_{\text{aq}}$, $\text{PuO}_{2\text{aq}}^+$, $\text{PuO}_{2\text{aq}}^{2+}$. Ионы подвергаются гидролизу в зависимости от pH среды. Ион пятивалентного плутония, $\text{PuO}_{2\text{aq}}^+$, обладает наименьшим зарядом и поэтому гидролизуется слабо. Формой существования Pu(V) в водных растворах является катион PuO_2^+ , который способен мигрировать в окружающей среде. Это обстоятельство необходимо учитывать при прогнозировании поведения плутония в районах действующих атомных электростанций, заводов по переработке облученного ядерного топлива, в хранилищах радиоактивных отходов, в местностях, загрязненных в результате испытаний ядерного оружия, техногенных аварий. В зависимости от условий Pu(V) может вступать в реакции гидролиза, комплексообразования, окисления–восстановления на коллоидных частицах разного происхождения. Поведение плутония, в том числе пятивалентного, в окружающей среде (гео- и биосфере) было и остается предметом

многих исследований. Часть из них обобщена в обзорах [1–3]. В работе [1] изложены ядерно-физические свойства изотопов плутония, степени окисления, поведение в растворах, реакции образования комплексов с неорганическими и органическими лигандами, процессы образования коллоидов и т.д. Отмечается, что в морских и поверхностных водах (в контакте с атмосферой) плутоний существует в форме Pu(V) , в подземных водах доминируют Pu(III) и Pu(IV) , особенно при низких значениях pH.

Основное внимание в обзоре [2] уделено источникам поступления плутония в окружающую среду (почву, подземные воды, моря и океаны, донные отложения, горные породы), формам существования и миграции в виде катиона PuO_2^+ и Pu(IV) , сорбированного на коллоидных частицах разной природы, в также механизмам восстановления Pu(V) на поверхности минеральных частиц. В обзоре приведены данные о содержании плутония в поверхностных и глубинных водах и в осадках Ирландского моря. Следовые количества растворенного

плутония представлены ионами Pu(V) и Pu(VI). Кроме того, суммированы данные о распределении $^{239+240}\text{Pu}$ в морской воде в северной, центральной и северо-западной частях Тихого океана. Максимальные концентрации достигают 80 мБк/м^3 (около 10^{-16} моль/л).

Нужно отметить, что в работах исследователей из разных стран приведены подобные или более низкие значения содержания плутония в водах Мирового океана. Например, содержание растворенного плутония в верхних слоях Карского моря составляет $50\text{--}90 \text{ мБк/м}^3$ [4], верхних слоях северо-западной части Тихого океана – $1.21\text{--}2.19 \text{ мБк/м}^3$ [5]; в Тихом океане недалеко от Фукусимы в 2014 г. концентрация ^{239}Pu была в пределах $0.7\text{--}8.3$, ^{240}Pu – 7 мБк/м^3 [6]; содержание плутония в водах Индийского океана – до 3, в Аравийском море – 1.26 [7], в Средиземном море – 1.73 [8], в южной части Тихого океана – $0.5\text{--}4$ [9], в Южно-Китайском море – $1.59\text{--}2.94 \text{ мБк/м}^3$ [10]. Таким образом, содержание плутония в верхних слоях Мирового океана колеблется в пределах $10^{-18}\text{--}10^{-16}$ моль/л.

В приведенных работах не сообщается, какие доли свободного Pu(V) и Pu(IV), связанного в коллоид или псевдоколлоид, существуют в морской (океанской) воде.

В подземных водах некоторых территорий содержание плутония на 3–5 порядков выше. Например, в 4 км от озера Карачай (ПО «Маяк») концентрация Pu составляет 0.1 Бк/л , или 2×10^{-13} моль/л [2].

В обзоре [3] рассматриваются свойства плутония в разных степенях окисления, формы существования в водной фазе и способность к миграции, механизмы восстановления Pu(V) на поверхности минералов.

До 1980-х гг. считалось, что Pu(V) почти не сорбируется на минеральных фазах. В работах [11, 12] наблюдали при сорбции восстановление Pu(V) до Pu(IV).

Пауэлл и др. [13] детально изучили сорбцию Pu(V) на суспензии синтетического гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и гётита ($\alpha\text{-FeOOH}$) и восстановление Pu(V) до Pu(IV). В работе был использован ^{239}Pu с концентрацией 1.5×10^{-8} моль/л в 0.01 моль/л NaCl. Исследования выполняли в диапазоне pH 3–8. При

pH 3 не было адсорбции Pu(V) и не было его восстановления. Стимулированное поверхностью восстановление Pu(V) наблюдали для обоих минералов при pH 4.6 и выше. Например, в растворе с pH 8 в присутствии гётита через 15 мин после начала адсорбции в твердую фазу перешло 87 % Pu(V). Через 2 недели весь Pu(V) превратился в Pu(IV). В растворе, не содержащем суспензии гематита или гётита, в течение 30 сут Pu(V) оставался неизменным.

Пауэлл и др. [13] наблюдали ускорение восстановления Pu(V) до Pu(IV) в растворах в присутствии гематита или гётита под действием света. Авторы считают, что полупроводниковые свойства этих минералов влияют на восстановление адсорбированного Pu(V). Под действием света происходит перенос электронов из валентной зоны в зону проводимости. Но совершенно не понятен механизм восстановления Pu(V) в темноте. Авторы предположили, что восстановителями могут быть следы Fe(II) на поверхности минералов. Однако количество Fe(II), если оно имеется, ниже предела обнаружения. Обсуждаются и другие возможные механизмы восстановления Pu(V). Но в целом вопрос о механизме восстановления остается открытым.

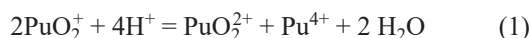
Романчук и др. [14] показали, что при сорбции на гематите Pu(VI) с концентрацией 10^{-9} и 10^{-14} моль/л происходит его трансформация в Pu(IV).

Восстановление Pu(V) при сорбции на магнетите (Fe_3O_4) обнаружили Пауэлл и др. [15]. При pH 5–8 восстановление происходило на поверхности магнетита, в растворе степень окисления плутония не изменялась. Восстановление на поверхности определялось взаимодействием сорбированного Pu(V) с Fe(II), присутствующем в магнетите.

Диоксид марганца обладает окислительными свойствами. Показано [12], что при сорбции на $\delta\text{-MnO}_2$ следовых количеств Pu(IV) происходит окисление Pu(IV) до Pu(V) и Pu(VI).

В обзоре [2] приводятся примеры восстановления Pu(V) на поверхности минералов, не обладающих окислительно-восстановительными или полупроводниковыми свойствами и не содержащих следов Fe(II). Например, Pu(V) медленно восстанавливается на кальците [16] или высокочистом кварце [17].

Реакция диспропорционирования Pu(V)



не влияет на его восстановление при сорбции на поверхности минерала. Скорость диспропорционирования описывается уравнением

$$-d[\text{Pu(V)}]/dt = 3k[\text{H}^+][\text{Pu(V)}]^2, \quad (2)$$

здесь k – константа скорости первой стадии реакции (1). В растворе 0.2–1.0 моль/л HClO_4 при 25°C $k = 3.6 \times 10^{-3} \text{ л}^2 \cdot \text{моль}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [18]. При взаимодействии двух одинаково заряженных частиц константа скорости снижается с уменьшением ионной силы. Но из-за сорбции Pu(VI) и Pu(IV) снижается потенциал пары Pu(VI)/(V) и растет потенциал пары Pu(V)/(IV), что приводит к повышению величины k . В растворе с pH 7 и концентрацией Pu(V) $< 10^{-6}$ моль/л скорость диспропорционирования Pu(V) близка к 10^{-22} моль/(л·с). Кроме того, при диспропорционировании только половина Pu(V) превращается в Pu(IV).

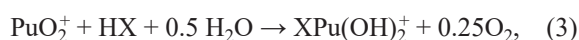
Устойчивость Pu(V) в растворе без твердой фазы в течение 30 сут свидетельствует о том, что продукты радиолиза весьма медленно восстанавливают Pu(V). При α -радиолизе воды образуются с небольшим выходом гидратированный электрон e_{aq}^- , атом H, радикал OH, молекулярные продукты H_2 и H_2O_2 . Атом H присоединяется к растворенному кислороду и образует HO_2 , который при pH выше 4.5 переходит в O_2^- . Гидратированный электрон присоединяется к O_2 . Радикал OH окисляет Pu(IV) и Pu(V), O_2^- и H_2O_2 восстанавливают Pu(VI). H_2O_2 очень медленно реагирует с Pu(V).

Романчук и др. [14] изучили сорбцию Pu(VI) и его восстановление до Pu(IV) на гематите с помощью изотопа ^{237}Pu , который превращается в ^{237}Np в результате электронного захвата (K -захвата) без генерации α - или β -частиц, продуктов радиолиза в системе не было. Процесс восстановления не отличался от такового в случае использования ^{239}Pu .

Хиксон и др. [17] исследовали влияние радиолиза на сорбцию Pu(V) и его восстановление до Pu(IV) на кварце с использованием изотопов ^{242}Pu и ^{238}Pu (период полураспада 3.76×10^5 и 87.7 лет соответственно). При равном содержании изотопов мощность дозы (с учетом энергии частиц) от ^{238}Pu в 3700 раз больше, чем от ^{242}Pu . В работе варьирова-

ли соотношение изотопов, но заметного влияния на восстановление Pu(V) не обнаружили.

Заварин и др. [19] изучили сорбцию Pu(V) на монтмориллоните как функцию pH, ионной силы и времени. При pH < 5 скорость сорбции плутония снижается с увеличением ионной силы. Авторы считают, что сорбция протекает по механизму ионного обмена с катионами, а при более высоких значениях pH сорбция идет по механизму комплексообразования с алюмосиликатными и силанольными центрами на поверхности минерала. Сорбция плутония может быть описана [3, реакция (3.1)] реакцией



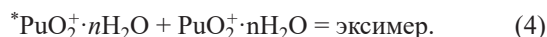
где HX – соединение, способное обменивать H^+ . Отсюда следует, что ионы $\text{PuO}_2^+ \cdot n\text{H}_2\text{O}$, сорбированные на поверхности, должны образовать квартет, в котором одновременно 4 атома H отрываются от 2 молекул H_2O и переходят к ионам плутония, оставшиеся атомы O связываются в O_2 . Эта версия маловероятна.

Рассматривается [3] стабилизация Pu(IV) на поверхности минерала вследствие увеличенного градиента концентрации в двойном электрическом слое. С ростом концентрации Pu(V) становится возможным образование полимеров Pu(IV). Однако неясно, откуда берутся электроны для восстановления Pu(V). Исследования проводили с использованием суспензии гематита.

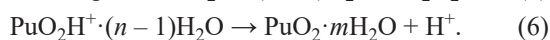
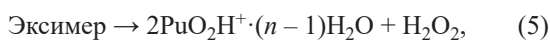
В обзоре [3] отмечается, что свободная энергия (ΔG) образования поверхностных комплексов Pu(IV) или поверхностных осадков снижается достаточно, чтобы повысить потенциал восстановления пары Pu(V)/Pu(IV) и благоприятствовать восстановлению Pu(V). Источником электронов служит вода. При этом будет продуцироваться молекулярный кислород. Механизм не рассматривается.

На наш взгляд, восстановителем Pu(V) на поверхности минералов, т.е. источником электронов, является вода. В работе [20] предлагается следующий механизм: ион актинида, возбужденный термически или светом, образует с невозбужденным ионом димер – так называемый эксимер (это понятие известно в фотохимии органических соединений). Квантово-химическими расчетами показано, что реакции диспропорционирования U(V) и Pu(V) протекают через образование димеров [21]. В эксим-

мере две группы ОН от молекул воды в гидратной сфере каждого иона образуют молекулу H_2O_2 , которая отщепляется. Оставшиеся ионы имеют степень окисления на 1 меньше. В случае Pu(V) образование эксимера происходит в растворе – возбужденный ион встречается с невозбужденным ионом

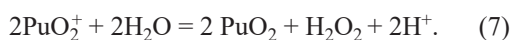


Далее эксимер сорбируется поверхностью, где протекают реакции



Но не исключено, что возбужденный ион Pu(V) сталкивается с ионом Pu(V) , сорбированным на поверхности, и там образуется эксимер.

Рассмотрим возможность предлагаемой реакции с позиции термодинамики:



Потенциал пары H_2O_2 , $2\text{H}^+/2\text{H}_2\text{O}$ при 25°C

$$E = E^0 + 0.059/2 \cdot \lg([\text{H}_2\text{O}_2][\text{H}^+]^2/[\text{H}_2\text{O}]^2),$$

где E^0 – стандартный потенциал, равный 1.763 В [22]. В нейтральном растворе потенциал пары снижается до 1.35 В. Потенциал пары $\text{Pu(V)}/\text{Pu(IV)}$ в растворе при рН 7 равен 1.11 В [23]. За счет сорбции Pu(IV) на поверхности минерала потенциал пары увеличивается и возникает возможность протекания реакции (7). Образующийся H_2O_2 диффундирует с поверхности в объем раствора, при этом его концентрация в поверхностном слое уменьшается и равновесие сдвигается вправо.

Романчук и др. [24] изучили сорбцию Pu(VI, V) на поверхности частиц TiO_2 под действием света и в темноте. В растворах 0.1 моль/л NaClO_4 , содержащих 10^{-8} и 10^{-6} моль/л плутония, с рН 4 на поверхности происходило восстановление плутония до Pu(IV) и образование PuO_2 . Свет ускоряет восстановление плутония, в темноте процесс идет медленно. Авторы считают, что под действием света в TiO_2 возникает пара электрон–дырка. Электроны восстанавливают Pu(VI) и Pu(V) , дырки исчезают в процессе рекомбинации. Но авторы не объясняют причину восстановления Pu(VI) в темноте. На рис. 1 работы [24] показано, что в темноте в растворе с рН 4.1, содержащем 2×10^{-8} моль/л Pu(VI) , за 100 ч восстановлено 30% плутония (7% в сутки), в растворе с рН 4.0 ($[\text{Pu}] = 1 \times 10^{-6}$ моль/л) за 100 ч

восстановлено 25% (6% в сутки). Известно [25], в растворе с рН 2.8 плутоний с концентрацией 5.8 ммоль/л под действием собственного α -излучения восстанавливается со скоростью 1.4% в сутки. По нашему мнению, дополнительное восстановление Pu(VI) в присутствии TiO_2 вызвано органическими примесями.

Микросферы TiO_2 были синтезированы посредством гидролиза тетрабутоксид титана в неводной среде. После синтеза частицы TiO_2 были гидротермально обработаны при 170°C 1 ч. Наличие органических примесей в TiO_2 не проверяли. Возможно, что оставшиеся органические молекулы медленно реагировали с адсорбированными Pu(VI) и Pu(V) , образуя Pu(IV) , а свет ускорял эту реакцию. При выщелачивании плутония с поверхности TiO_2 в растворе HClO_4 с рН 1.3 в водную фазу медленно переходил Pu(III) (в статье представлены соответствующие спектры поглощения на рис. 6). В данных условиях органические примеси восстанавливали Pu(IV) , находящийся в форме PuO_2 . Процесс ускорялся под действием света. Таким образом, вопрос о фотовосстановлении Pu(VI) и Pu(V) на поверхности TiO_2 остается открытым.

Потенциальным источником поступления Pu(V) в окружающую среду являются хранилища радиоактивных отходов. Поведение плутония в синтетических рассолах, моделирующих условия в хранилищах, зависит от мощности дозы, поглощаемой системой. При мощности дозы от α -излучения ^{238}Pu около 0.60 Вт/л ($< 1.8 \times 10^{11}$ Бк/л) в растворе, содержащем менее 3 моль/л NaCl , Pu(IV) переходит в Pu(V) . Более мощная доза способствует образованию Pu(VI) . Но в растворе состава (моль/л) [26]: Na^+ 2.397, K^+ 0.0307, Cl^- 2.482, SO_4^{2-} 0.075, HCO_3^- 0.00082 (рН 7.0) с концентрацией $^{239}\text{Pu(V)}$ 0.3 (мощность дозы 1.4×10^{-4} Вт/л) или 0.5 ммоль/л (мощность дозы 2.3×10^{-4} Вт/л) наблюдалась убыль в растворе обеих валентных форм плутония. Через 100 сут концентрация Pu(V) в растворе была на уровне 3×10^{-7} моль/л. Сформировавшийся осадок растворялся в 1 моль/л HCl с выделением пузырьков, т.е. это был карбонат. Порошковая рентгенограмма также показала сходство осадка с KPuO_2CO_3 , однако авторы [26] считают, что осадок представлял собой $\text{NaPuO}_2\text{CO}_3$, поскольку ионов Na^+ в системе изначально было больше в 80 раз, чем ионов K^+ . Таким образом, в работе показано, что в изученных

условиях возможно осаждение Pu(V) без участия плутония в каких-либо окислительно-восстановительных реакциях.

В обзоре [2] отмечается различие в сорбции и восстановлении Pu(V) при его концентрациях 10^{-14} и 10^{-4} моль/л. При концентрации плутония 10^{-14} моль/л и ниже гидроксид Pu(IV) растворим, Pu(IV) существует в мономерной форме. Осадок PuO₂ на поверхности минерала не образуется. На поведение плутония значительное влияние оказывают органические вещества и микроорганизмы [2, 27]. При концентрациях плутония 10^{-18} – 10^{-16} моль/л (морская и океанская вода), по-видимому, основную роль играют взаимодействие с органическими молекулами, фотолиз и реакции с продуктами радиолиза воды, возникающими за счет излучения природных изотопов урана, элементов урановых семейств, ⁴⁰K [28], а также H₂O₂, образующегося под действием колебаний морских волн [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плутоний(V) существует в виде катиона PuO₂⁺. В водной фазе с pH не выше 8 этот катион проявляет слабую склонность к гидролизу и образованию комплексов с однозарядными неорганическими и органическими анионами, а также к сорбции. Тем не менее, сорбция на коллоидных частицах различной природы имеет место. При pH 4.6–8 сорбция на поверхности частиц оксидов железа, кальцита, кварца и других минералов сопровождается восстановлением Pu(V) до Pu(IV), который в виде PuO₂ осаждается на поверхность минерала. Предложено несколько механизмов восстановления Pu(V): 1) влияние полупроводниковых свойств оксида железа или других минералов; 2) наличие следов Fe(II); 3) реакция диспропорционирования; 4) взаимодействие с продуктами α-радиолиза воды. Критический анализ этих механизмов позволил предложить дополнительный вариант. В данной работе был предложен механизм восстановления Pu(V), включающий образование в растворе димера – так называемого эксимера – из возбужденного термически или светом иона PuO₂⁺ и невозбужденного иона плутония. Эксимер адсорбируется на поверхности минерала. Далее происходит отщепление H₂O₂ и возникновение Pu(IV) в форме PuO₂.

В морской воде, где концентрация плутония 10^{-18} – 10^{-16} моль/л, на поведение плутония влияют органические вещества, образующие комплексы с плутонием в разных степенях окисления, микроорганизмы и продукты радиолиза воды, возникающие под действием излучения природных изотопов урановых семейств и ⁴⁰K, растворенных в воде.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kersting A.B. // Inorg. Chem. 2013. Vol. 52. P 3533–3546.
2. Романчук А.Ю., Калмыков С.Н., Kersting A.B., Zavarin M. // Успехи химии. 2016. Т. 85, № 9. С. 995–1010.
3. Hixon A.E., Powell B.A. // Environ. Science. Process. Impact. 2018. N 10. P. 1306–1322; Zavarin M., Powell B.A., Bourbin M., Zhao P., Kersting A.B. // Environ. Sci. Technol. 2012. Vol. 46. P. 2692–2698.
4. Travkina A.V., Goryachenkova Y.A., Borisov A.P., Solovieva G.Y., Ligaev A.N., Novikov A.P. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2017. Vol. 311, N 3. P. 1663–1680.
5. Men W., Zheng J., Wang H., Ni Y.Y., Aono T., Maxwell S.L., Tagani K., Uehida S., Yamada M. // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. Article 1892.
6. Casacuberta N., Christl M., Buesseler K.O., Lau Y., Vockenhaber C., Castrillejo M., Synal H.A., Masque P. // Environ. Sci. Technol. 2017. Vol. 51, N 17. P. 9825–9835.
7. Gastaud J., Povinec P.P., Aoyama M., Hirose K., Sanchez-Cabeza J.A., Levy I., Roos P., Eriksson M., Bose E., Rozzoug S. // Prog. Oceanogr. 2011. Vol. 89, N 1–4. P. 92–100.
8. Lindahl P., Keith-Roach M., Worsfold P., Choi M.S., Shin H.S., Lee S.H. // Anal. Chim. Acta. 2010. Vol. 101, N 1–2. P. 61–69.
9. Hirose K., Aoyama M., Fukasawa M., Kim C.S., Komura K., Povinec P.P., Sanchez-Cabeza J.A. // Sci. Total Environ. 2007. Vol. 381, N 1–3. P. 243–255.
10. Wu J.W., Dai M.H., Xu Y., Zheng J. // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 610. P. 200–211.
11. Sanchez A.L., Murray J.W., Sibley T.H. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1985. Vol. 49. P. 2997–2307.

12. *Keeney-Kennicutt W.L., Morse J.W.* // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1985. Vol. 49. P. 2577–2588.
13. *Powell B.A., Fjeld R.A., Kaplan D.I., Coates J.T., Serkiz S.M.* // *Environ. Sci. Technol.* 2005. Vol. 39, N 7. P. 2107–2114.
14. *Romanchuk A.Yu., Kalmykov S.N., Aliev S.A.* // *Radiochim. Acta.* 2011. Vol. 99. P. 137–144.
15. *Powell B.A., Fjeld R.A., Kaplan D.I., Coates J.T., Serkiz S.M.* // *Environ. Sci. Technol.* 2004. Vol. 38, N 22. P. 6016–6024.
16. *Zavarin M., Roberts S.K., Hakem N., Sawvel A.M., Kersting A.B.* // *Radiochim. Acta.* 2009. Vol. 93, N 2. P. 83–102.
17. *Hixon A.E., Arai Y., Powell B.A.* // *J. Colloid Interface Sci.* 2013. Vol. 403. P. 105–112.
18. *Rabideau S.W.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1957. Vol. 79, N 21. P. 6350–6353.
19. *Zavarin M., Powell B.A., Bourbin M., Zhao P., Kersting A.B.* // *Environ. Sci. Technol.* 2012. Vol. 46. P. 2692–2698.
20. *Шилов В.П.* // *ЖФХ.* 1996. Т. 70, № 10. С. 1915–1917.
21. *Steele H., Taylor R.J.* // *Inorg. Chem.* 2007. Vol. 46, N 16. P. 6311–6318.
22. *Bratsch S.G.* // *J. Phys. Chem. Data.* 1989. Vol. 18, N 1. P. 1–21.
23. *Вайгель Ф., Кац Дж., Сиборг Г.* Плутоний // *Химия актиноидов / Под ред. Дж. Каца, Г. Сиборга, Л. Морсса / Пер. с англ. под ред. Б.Ф. Мясоедова. М.: Мир, 1997. Т. 2. С. 334.*
24. *Romanchuk A.Y., Kalmykov S.N., Egorov A.V., Zubavichus Y.V., Shiryaev A.A., Smirnov V.A., Garshev A.V.* // *Radiochim. Acta.* 2016. Vol. 104, N 12. P. 843–851.
25. *Шилов В.П., Гоголев А.В., Федосеев А.М.* // *Радиохимия.* 2011. Т. 53, № 5. С. 396–402.
26. *Nitsche H., Roberts K., Xi R., Prussin T., Becraft K., Mahamid I., Silber H.B., Carpenter S.A., Gatti R.C.* // *Radiochim. Acta.* 1994. Vol. 66–67. P. 3–8.
27. *Romanchuk A.Yu. Vlasova I.E., Kalmykov S.N.* // *Front. Chem.* 2020. Vol. 8 Article 630
28. *Ершов Б.Г., Гришина М.М., Шилов В.П.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2018. № 6. С. 958–965.