

Научная статья

УДК 542.61+546.57

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-138-147>

Экстракция сурьмы (III) производным 1,2,4-триазола из солянокислых растворов и определение условий отделения Sb (III) от Bi (III)

Насима Гимадисламовна Афзалетдинова

Уфимский Институт химии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Россия, Уфа

Аннотация. Изучена экстракция сурьмы(III) из солянокислых растворов 1-[2-(2,4-дихлорфенил)-4-пропил-1,3-диоксолан-2-ил]-1H-1,2,4-триазолом. Найдены оптимальные условия извлечения. Предположено, что сурьма (III) при времени контакта фаз 5 мин экстрагируется по анионообменному механизму. Экстрагируемый хлорокомплекс сурьмы (III) выделен и охарактеризован методами электронной, ИК-спектроскопии и элементным анализом. Изучена реэкстракция и концентрирование сурьмы (III) из растворов хлороводородной кислоты. Показана возможность отделения сурьмы (III) от висмута (III).

Ключевые слова: производное 1,2,4-триазола; сурьма (III); экстракция; концентрирование; разделение; висмут (III).

Для цитирования: Афзалетдинова Н.Г. Экстракция сурьмы (III) производным 1,2,4-триазола из солянокислых растворов и определение условий отделения Sb (III) от Bi (III) // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2022. Т. 12, № 3. С. 138–147. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-138-147>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-138-147>

Extraction of antimony (III) with 1,2,4-triazole derivatives from hydrochloric acid solutions and determination of conditions for the separation of Sb (III) from Bi (III)

Nasima G. Afzaletdinova

Ufa Federal Research Center RAS, Russia, Ufa

Abstract. The extraction of antimony (III) from hydrochloric acid solutions with 1-[2-(2,4-dichlorophenyl)-4-propyl-1,3-dioxolan-2-yl]-1H-1,2,4-triazole was studied. Optimal extraction conditions are found. It is assumed that antimony (III) is extracted by the anion exchange mechanism at a phase contact time of 5 min. The extractable antimony (III) chlorocomplex was isolated and characterized by electron, IR spectroscopy and elemental analysis. The re-extraction and concentration of antimony (III) from hydrochloric acid solutions has been studied. The possibility of separating antimony (III) from bismuth (III) is shown.

Key words: 1,2,4-triazole derivative; antimony (III); extraction; concentration; separation; bismuth (III).

For citation: Afzaletdinova N.G.(2022) "Extraction of antimony(III) with 1,2,4-triazole derivatives from hydrochloric acidsolutions and determination of conditions for the separation of Sb(III) from Bi(III)", *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 12, no. 3, pp. 138–147.(In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-138-147>.

Известно, что сурьма обычно встречается в медных, серебряных и свинцовых рудах. Запасы сурьмы в земной коре составляют 0,2 г/т. Металл является стратегически важным минеральным сырьем и находит широкое применение в разных отраслях промышленности: металлургии, машиностроении, авиации, фармацевтике и других сферах. В мировом масштабе запасы сурьмы в Российской Федерации составляют 1/5 часть [1–2]. Россия является одним из мировых лидеров добычи сурьмяного сырья (до 26 тыс. т/год). Промышленное значение сурьмы в основном обусловлено ее использованием в качестве антипирена (добавки для увеличения огнестойкости) в пластмассах, покрытиях и электронике, а также как обесцвечивающий агент для стекла, компонент сплавов в свинцово-кислотных аккумуляторах, катализаторах для производства полиэтилентерефталата (ПЭТ) [3–5].

Sargar В.М. с соавторами [6] применяли 4%-ный раствор N-октиланилина в ксилоле для экстракционного отделения сурьмы (III) от Вi (III), Те (IV), Рb (II), Sn (IV), Сu (II), Au (III), Fe (III). Авторы работы [7] изучили отделение сурьмы (III) от кобальта (II) при экстракции из 3 моль/л хлороводородной кислоты N,N-диоктил-1-октиламином в метилизобутилкетоне. Отделение сурьмы (III) от других металлов также рассмотрено в работах [8–10].

Ранее нами было исследовано производное 1,2,4-триазола в качестве экстрагента при извлечении Вi (III) из растворов хлороводородной кислоты [11]. Однако в литературе отсутствуют данные по извлечению сурьмы (III) из солянокислых растворов производными 1,2,4-триазола, поэтому представляло интерес изучение экстракции этого металла одним из произ-

водных 1,2,4-триазола – пропиканазолом (1-[2-(2,4-дихлорфенил)-4-пропил-1,3-диоксолан-2-ил]-1Н-1,2,4-триазол, далее L) и рассмотрение возможности отделения сурьмы (III) от висмута (III).

Объекты и методы исследования

Растворы сурьмы (III) готовили растворением $SbCl_3$ квалификации «хч» (ТУ 6-09-17-252-88) в растворе хлороводородной кислоты (1:1) с последующим разбавлением дистиллированной водой до необходимых концентраций по HCl и по сурьме (III). Анализ сурьмы (III) проводили титрованием броматом калия по методике [12]. Формой нахождения ионов сурьмы (III) в растворах соляной кислоты до 2,4 моль/л является анион $[SbCl_4]^-$ [13] ($\lambda = 47600 \text{ см}^{-1}$).

Коэффициент распределения сурьмы (III) между органической и водной фазами рассчитывали по формуле

$$D_{Sb(III)} = \frac{C_{Sb(III),орг}}{C_{Sb(III),вод}},$$

где $C_{Sb(III),орг}$ и $C_{Sb(III),вод}$ – равновесные концентрации ионов висмута (III) в органической и водной фазах после экстракции.

Коэффициент разделения металлов $K_{разд}$ рассчитывали по уравнению

$$K_{разд} = \frac{D_1}{D_2},$$

где D_1 и D_2 – коэффициенты распределения разделяемых металлов.

Концентрацию хлороводородной кислоты в исходных растворах определяли титрованием 0,5–1,0 моль/л водным раствором КОН (индикатор – метилоранж).

В качестве экстрагента в работе применяли раствор L в толуоле. Растворы экстрагента готовили по его точным навескам.

Экстракцию проводили из свежеприготовленных растворов сурьмы (III) при температуре $(20 \pm 0,5^\circ\text{C})$ при соотношении водной и органической фаз 1:1. Перемешивание фаз осуществляли на магнитной мешалке типа R-3. Раздел фаз после перемешивания был четким, и происходил в течение 10 с после завершения контакта фаз.

Концентрацию хлорид-ионов в органической фазе определяли аргентометрическим методом с индикатором хроматом калия K_2CrO_4 [14]. Электропроводность экстрактов и комплексов измеряли в ацетоне на кондуктометре типа ОК 102/1 фирмы Radelkis. Электронные спектры поглощения регистрировали на спектрофотометре Specord M40 (Германия). ИК-спектры экстрагируемого комплекса были записаны на спектрофотометре IRPrestige-21 (Fourier Spectrophotometer Shimadzu) в области $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ в вазелиновом масле. Элементный анализ выполняли на приборе EA 3100 Elemental Analyzer (EuroVectorSrl).

Результаты и их обсуждение

Было изучено влияние концентрации хлороводородной кислоты на коэффициент распределения сурьмы (III) при извлечении его L. Как видно из полученных экспериментальных данных (рис.1), экстракция сурьмы (III) с ростом концентрации HCl проходит через максимум, приходящийся на 2,0 моль/л, что связано, вероятно, как с ростом степени протонирования атома азота в положении N_4 , так и существованием в данных условиях наиболее извлекаемого аниона сурьмы состава SbCl_4^- [15].

Влияние времени контакта фаз на установление экстракционного равновесия при извлечении сурьмы (III) из 2,0 моль/л HCl представлено на рис. 2. Экстракционное равновесие ус-

танавливается в течение 5 мин. Все последующие опыты по экстракции сурьмы (III) осуществляли при оптимальных условиях извлечения: 2,0 моль/л HCl , время контакта фаз – 5 мин.

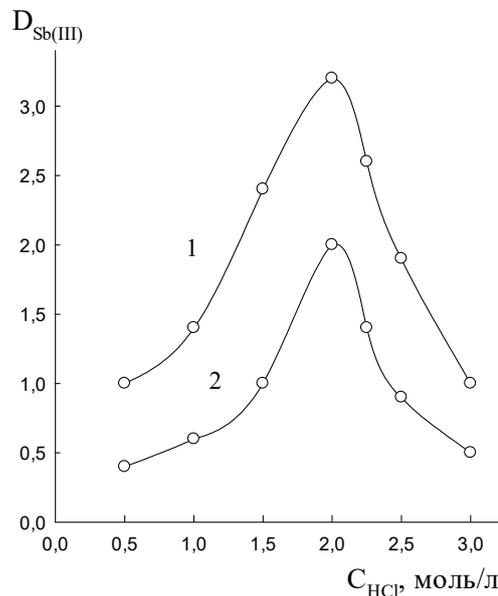


Рис. 1. Влияние концентрации соляной кислоты на распределение сурьмы (III): 0,003 моль/л Sb(III) , 0,3 (1) и 0,2 (2) моль/л L

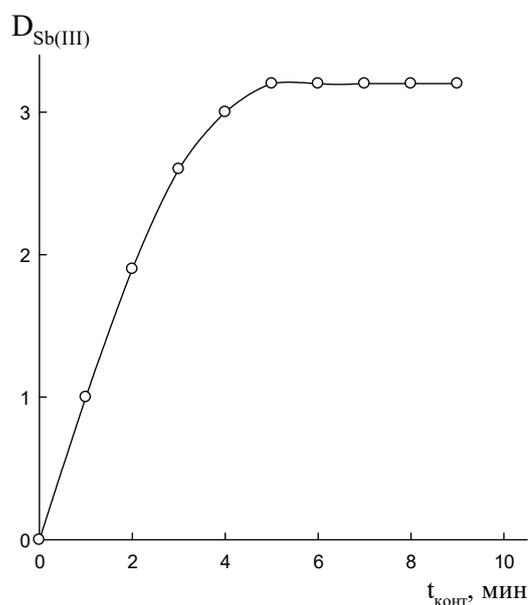


Рис. 2. Влияние времени контакта фаз на распределение сурьмы (III): 2,0 моль/л HCl , 0,003 моль/л Sb(III) , 0,3 моль/л L

Исследование влияния концентрации хлорид-ионов на извлечение сурьмы (III) показало, что с ростом концентрации хлорид ионов до 2,0 моль/л извлечение $Sb(III)$ уменьшается, что, вероятно, связано с подавлением экстракции хлорокомплекса сурьмы (III) состава $SbCl_4^-$ (рис. 3).

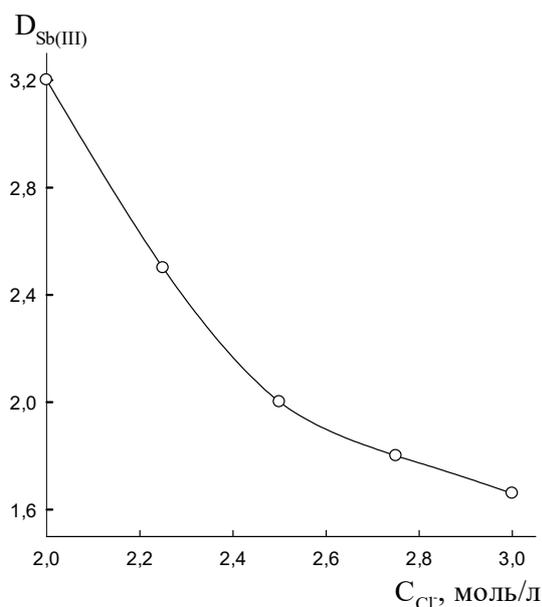


Рис. 3. Влияние концентрации хлорид-ионов на извлечение сурьмы (III): 2,0 моль/л HCl , 0,003 моль/л $Sb(III)$, 0,3 моль/л L

Для установления механизма экстракции сурьмы (III) с L изучена зависимость коэффициента распределения $Sb(III)$ от концентрации ионов водорода при постоянной ионной силе раствора, равной 3,0. Концентрацию хлороводородной кислоты варьировали от 2,0 до 3,0 моль/л. Постоянную ионную силу раствора поддерживали добавлением расчетных количеств хлорида натрия (от 0,0 до 1,0 моль/л). Тангенс угла наклона зависимости $lgD_{Sb(III)} = f(pH)$ равен -1 , что позволяет предположить, что извлечение сурьмы (III) осуществляется в форме аниона $[SbCl_4]^-$.

Далее были получены изотермы экстракции сурьмы (III) из 2,0 моль/л растворов хлорово-

дородной кислоты растворами L в толуоле. Анализ изотерм экстракции показал, что насыщение экстрагента происходит при соотношении $Sb(III): L = 1 : 1$ ($C_L = 0,1$ моль/л, $Y_{Sb(III)} = 0,05$ моль/л, $q = 1$).

Методом сдвига равновесия из наклона прямой, построенной в координатах $lgD_{Sb(III)} = f(lgS_{св.})$, доказано, что на один ион сурьмы (III) приходится одна молекула экстрагента (рис. 4). Изотерма экстракции, представленная в логарифмических координатах, подтверждает переход извлекаемого соединения из водной фазы в органическую, осуществляется в виде моноядерного комплекса состава $[SbCl_4]^-$ (рис. 5).

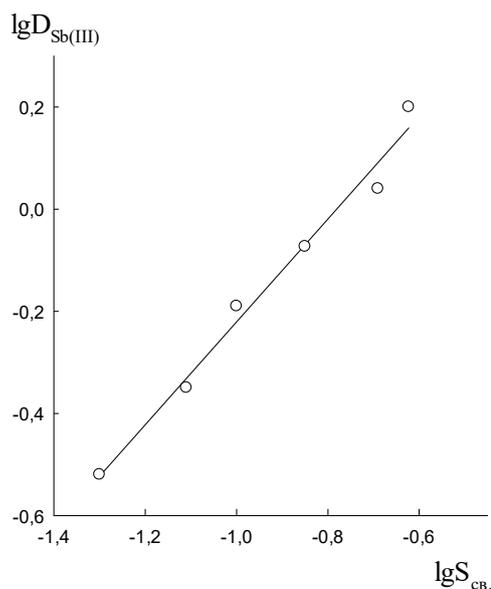


Рис. 4. Влияние концентрации свободного L на извлечение сурьмы(III): 2,0 моль/л HCl , 0,003 моль/л $Sb(III)$, 0,3 моль/л L

В ИК-спектре L наблюдаются полосы поглощения при 1587 (с.), 1558 (ср.) и 1506 cm^{-1} (с.) характерные для скелетных колебаний триазолового кольца [15]. Взаимодействие L как с хлороводородной кислотой, так и с сурьмой (III) сопровождается образованием ионных ассоциатов (табл. 1).

В комплексах интенсивность полосы поглощения при 1558 см^{-1} увеличивается и сравнивается с интенсивностью полосы поглощения при 1587 см^{-1} . Полоса поглощения при 1506 см^{-1} (с.), характеризующая скелетные колебания связи CN в триазоловом кольце в комплексе с сурьмой (III), не испытывает смещения. Протонирование триазолового кольца по атому азота осуществляется в положении N₄, что подтверждает предположение об извлечении сурьмы (III) в анионной форме.

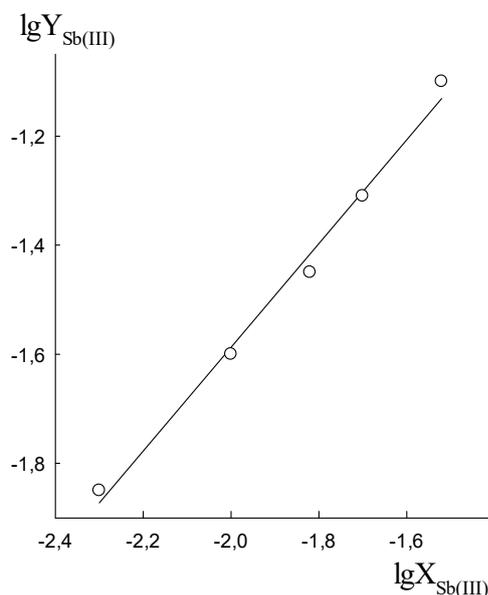


Рис.5. Изотерма экстракции сурьмы (III)

В ИК-спектре как экстрагируемого ионного ассоциата сурьмы (III) с L, так и комплекса с хлороводородной кислотой наблюдаются уширенные полосы поглощения средней интенсивности в области $2200\text{--}2800\text{ см}^{-1}$. Полученные данные не противоречат исследованию, проведенному в работе [16] в которой показано, что производное 1,2,4-триазола с хлороводородной кислотой образует комплекс состава $L\cdot HCl$, который в ИК-спектре проявляется в виде широкой полосы поглощения с максимумом 2496 см^{-1} , отвечающей колебаниям аммонийного катиона $=NH^+$.

Экстрагируемый комплекс сурьмы (III) с L состава $(HL)^+[SbCl_4]^-$ был выделен при экстракции из 2,0 моль/л HCl, промыт многократно гексаном и водой от возможного избытка экстрагента и соли сурьмы (III). Он представлял собой мазеобразное соединение, растворимое в обычных органических растворителях.

Таблица 1

ИК-спектроскопические характеристики Ln его комплексов с HCl и сурьмой (III)

	Скелетные колебания триазолового кольца, см^{-1}			$=NH^+$, см^{-1}
L	1587 (с.)	1558 (ср.)	1506 (с.)	-
$L\cdot HCl(2,0\text{ моль/л HCl})$	1587(с.)	1558 (ср.)	1507 (ср)	2570 (ср.)
$(HL)[SbCl_4](C_{HCl}=2.0\text{ моль/л})$	1587 (с.)	1557 (ср.)	1505)с.)	2496 (сл.ушир).

Органическая фаза была проанализирована на содержание хлорид-ионов в экстрактах аргентометрическим методом. Установлено, что соотношение $[Sb(III)] : [Cl]$ равно 1:4. Результаты элементного анализа экстрагируемого комплекса также подтвердили состав, полученный экстракционным методом $Sb : L=1:1$.

Среднее значение молярной электропроводности (λ) ионных ассоциатов сурьмы (III) с L в ацетоне в интервале концентраций $0,0002\text{--}0,0030\text{ моль /л}$ составляло $90\text{ ом}^{-1}\text{ см}^2\text{ моль}^{-1}$, что согласовалось с литературными данными для интервалов значений молярной электропроводности для электролитов типа 1:1 [17].

Известно, что слабоосновные экстрагенты могут протонироваться при взаимодействии с раствором хлороводородной кислоты [18]. Нами предположено, что хлорокомплекс сурьмы (III) может извлекаться L по анионообменному механизму с образованием ионного ассоциата $(HL)^+[SbCl_4]^-$.

Концентрационная константа реакции экстракции была вычислена по следующему уравнению:

$$K = \frac{[(HL)(SbCl_4)]}{[SbCl_4][H^+] \cdot L_0} = \frac{Y_{Sb(III)}}{X_{Sb(III)} \cdot (2 - Y_{Bi(III)}) \cdot [H^+] \cdot (L - Y_{Sb(III)})}$$

где $Y_{Sb(III)}$ и $X_{Sb(III)}$ – равновесные концентрации висмута (III) в органической и водной фазах соответственно, $[H^+] = 2,0$ моль/л, L_0 и L – исходная и равновесная концентрации экстрагента.

Среднее значение концентрационной константы равно $4,70 \pm 0,10$ ($n = 5$; $P = 0,95$).

Таблица 2

Состав и молярная электропроводность экстрагируемых комплексов сурьмы (III) с L

L, моль/л	HCl, моль/л	$Y_{Sb(III)}$, моль/л	λ , $ом^{-1} см^2 моль^{-1}$	Y_{Cl^-} , моль/л	$C_L: Y_{Sb(III)}$	$Y_{Cl^-}: Y_{Sb(III)}$	Извлекаемая форма
0,05	2,0	0,05	96	0,196	1,0	3,9	$(HL)^+[SbCl_4]^-$
0,03	3,0	0,03	100	0,12	1,0	4,1	

Результаты экспериментов по определению коэффициента распределения и коэффициента концентрирования сурьмы (III) при соотношении водной и органической фаз 15 : 1 представлены в табл. 3. Из полученных результатов сле-

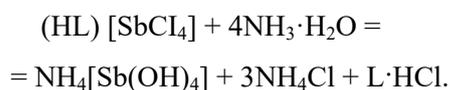
дует, что с ростом концентрации хлороводородной кислоты коэффициент распределения сурьмы(III) возрастает с 6,4 до 11,4, что объясняется ростом концентрации хорошо экстрагируемого хлорокомплекса $SbCl_4^-$.

Таблица 3

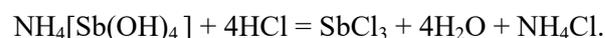
Концентрирование сурьмы(III) из 1,0 и 2,0 моль/л растворов хлороводородной кислоты

C_{HCl} , моль/л	X_{Sb} , моль/л	Y_{Sb} , моль/л	D	$K_{конц}$
1,0	0,0021	0,0135	6,4	4,5
2,0	0,0019	0,022	11,6	7,3

Была изучена однократная реэкстракция сурьмы (III) из органической фазы 0,5 моль/л раствором аммиака при времени контакта фаз 5 мини соотношении водной и органической фазы 1: 1. После реэкстракции анализ на сурьму (III) осуществляли по водной фазе титрованием броматом калия [12]. Реакцию реэкстракции сурьмы (III) можно представить следующим уравнением:



Экстрагент, выделяющийся в виде соли $L \cdot HCl$ в органической фазе, может быть возвращен в процесс извлечения сурьмы (III) после реэкстракции. Образовавшая соль сурьмы после реэкстракции состава $NH_4[Sb(OH)_4]$ при обработке раствором хлороводородной кислоты будет превращена хлорид сурьмы:



В присутствии избытка аммиака, первоначально образующийся осадок состава $Sb(OH)_3$ растворяется и переходит в анион $[Sb(OH)_4]^-$, а

висмут (III) практически количественно осаждается избытком аммиака в виде основной соли $\text{BiO}(\text{OH})$ и отличается своей нерастворимостью в аммиаке. Поэтому на стадии реэкстракции 0,5 моль/л раствором аммиака возможно практически полное отделение висмута от сурьмы.

Представляло интерес также исследование совместной экстракции сурьмы (III) и висмута (III) из растворов хлороводородной кислоты с концентрацией от 1,0 до 3,0 моль/л. Извлечение висмута (III) из растворов хлороводородной кислоты растворами L изучено ранее [11]. Экстракцию осуществляли при содержании сурьмы (III) и висмута (III) 0,006 моль/л 0,3 моль/л раствором L при соотношении водной и органической фаз 1:1 (табл. 4).

Таблица 4

Отделение висмута (III) от сурьмы (III)

$C_{\text{НСь}}$ моль/л	$D_{\text{Bi(III)}}$	$D_{\text{Sb(III)}}$	$K_{\text{разд}}$
1,0	2,0	1,6	1,25
2,0	14,0	3,2	4,40
3,0	26,2	1,0	26,0

Максимальное отделение висмута (III) от сурьмы (III) наблюдается при экстракции металлов из 3,0 моль/л раствора HCl . Незначительное извлечение сурьмы (III) при этом мож-

но объяснить преимущественным существованием в растворе трудно извлекаемого высокозарядного хлорокомплекса состава SbCl_5^{2-} .

Заключение

Изучена экстракция сурьмы (III) из раствора хлороводородной кислоты производным 1,2,4-триазола. Установлено, что сурьма (III) экстрагируется по анионообменному механизму. Извлекаемый ионный ассоциат выделен и охарактеризован методами ИК-спектроскопии и элементным анализом. Реэкстракция сурьмы (III) осуществляется 0,5 моль/л раствором аммиака при времени контакта фаз 5 мин за одну ступень. Показано, что максимальное отделение висмута (III) от сурьмы (III) происходит при экстракции металлов из 3,0 моль/л.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания «Комплексообразование моно- и полидентатных сера-азоторганических соединений с ионами металлов и фармаконами» (тема № 1021062311400-7-1.4.2;1.4.3.)

Благодарности

Автор выражает благодарность ЦКП «Химия» УФИХ РАН и РЦКП «Агидель» УФИЦ РАН за анализы исследованных соединений.

Список источников

1. *Antimony Statistics and Information* // USGS [сайт]. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/antimony-statistics-and-information> (дата обращения: 23.09.2022).
2. *Ökvist L.S., Eriksson J., Hu X. Production technologies of CRM from secondary resources* // SCREEN [сайт]. URL: <https://screen.eu/wp-content/uploads/2018/03/SCREEN-D4.2-Production-technologies-of-CRM-from-secondary-resources.pdf> (дата обращения: 23.09.2022).
3. *Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю., Болсуновская Л.М., и др. Обзор состояния сурьмяной отрасли России* // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 2. С. 153–163. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/2/3568>.

4. Dupont D., Arnout S., Jones P.T., et al. Antimony recovery from end-of-life products and industrial process residues: a critical review // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. Vol. 2, № 1. P. 79–103. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0043-y>.
5. Multani R.S., Feldmann T., Demopoulos G.P. Antimony in the metallurgy industry: A review of its chemistry and environmental stabilization options // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 164. P. 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.06.014>.
6. Sargar B.M., Rajmane M.M., Anuse M.A. Selective liquid-liquid extraction of antimony(III) from hydrochloric acid media by N-n-octylaniline in xylene // *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2004. Vol. 69, № 4. P.283–298. <https://doi.org/10.2298/JSC0404283S>.
7. Faiku F., Haziri A., Faiku H., et al. Extraction of Sb (III) and Co (II) from hydrochloric acid solutions by N,N-dioctyl-1-octanamine in methyl isobutyl ketone // *Advances in Applied Science Research*. 2013. Vol. 4. № 1. P. 182–187.
8. Chen W.-Sh., Mesaki Sh., Lee Ch.-H. Separation of Sn, Sb, Bi, and Cu from tin anodeslime by solvent extraction and chemical precipitation // *Metals*. 2021. Vol. 11, № 3, P. 1–11. <https://doi.org/10.3390/met11030515>.
9. Su Z., Zhang Y., Liu B., et al. Extraction and Separation of Tin from Tin-Bearing Secondary Resources: A Review // *JOM*. 2017. Vol. 69, №. 11. P. 2364–2372. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2509-1>.
10. Alian A., Sanad W. Extraction of antimony with tertiary amines // *Talanta*. 1967. Vol. 14. P. 659–669. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(67\)80033-X](https://doi.org/10.1016/0039-9140(67)80033-X).
11. Афзалетдинова Н.Г. Исследование экстракции висмута (III) производным 1,2,4-триазола из солянокислых растворов // *Вестник Пермского университета. Серия «Химия»*. 2022. № 2. С. 88–98.
12. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Количественный анализ. М.: Химия, 1976. 324 с.
13. John. M. Spectrophotometric studies on Sb (III) in hydrochloric acid solutions // *Canadian Journal of Chemistry*. 1975. Vol. 53. P. 888–894.
14. Jeffery G.H., Bassett J., Mendham J., et al. *Textbook of Quantitative Chemical Analysis*. London, 1989. 906 p.
15. *Wilson & Wilson's Comprehensive Analytical Chemistry*. Vol. VI. Analytical infrared spectroscopy: edited by Svehla G.. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier, 1976. 555 p.
16. Baykalova L.V., Zyryanova I.A., Tarasova O.A., et al. 1-allenylpyrazole and 1-allenyl-1.2.4-triazole and reaction with HCl and metal chlorides // *Russian Journal of General Chemistry*. 2003. Vol. 73, №.2. P. 727–733.
17. Кукушкин Ю.Н. *Химия координационных соединений*. М.: Высшая школа, 1985. 455с.
18. Borowiak-Resterna A., Kyuchhoukov G., Szymanowski S. // *ISEC Cape Town, South Africa*. 2002. P. 988–994.

Информация об авторе

Насима Гимадисламовна Афзалетдинова, кандидат химических наук, ведущий инженер, лаборатория физико-химических методов анализа, Уфимский Институт химии Уфимского федерального исследовательского центра РАН(450054, Россия, г. Уфа, проспект Октября, 69), hisam@anrb.ru.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 21 июля 2022 г; одобрена 26 июля 2022 г; принята к публикации 16 сентября 2022 г.

References

1. Antimony Statistics and Information. Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/antimony-statistics-and-information> (Accessed 23 September 2022).
2. Ökvist, L.S., Eriksson, J. and Hu, X. (2022) Production technologies of CRM from secondary resources. Available at: <https://screen.eu/wp-content/uploads/2018/03/SCREEN-D4.2-Production-technologies-of-CRM-from-secondary-resources.pdf> (Accessed 23 September 2022).
3. Khatkov, V.Yu., Boyarko, G.Yu., Bolsunovskaya, L.M., Dibrov, A.M. and Tkacheva, E.V. (2022) “Review of the state of the antimony industry in Russia”, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, vol. 333, no. 2, pp. 153–163.
4. Dupont, D., Arnout, S., Jones, P.T. and Binnemans, K. (2016) “Antimony recovery from end-of-life products and industrial process residues: a critical review”, *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 2, no. 1, pp. 79–103.
5. Multani, R.S., Feldmann, T. and Demopoulos, G.P. (2016) “Antimony in the metallurgical industry: A review of its chemistry and environmental stabilization options”, *Hydrometallurgy*, vol. 164, pp. 141–153.
6. Sargar, B.M., Rajmane, M.M. and Anuse, M.A. (2004) “Selective liquid-liquid extraction of antimony(III) from hydrochloric acid media by N-n-octylaniline in xylene”, *Journal of the Serbian Chemical Society*, vol. 69, no. 4, pp.283–298.
7. Faiku, F., Haziri, A., Faiku, H., Haziri, I., Gashi, F. and Troni, N. (2013) “Extraction of Sb (III) and Co (II) from hydrochloric acid solutions by N,N-dioctyl-1-octanamine in methyl isobutyl ketone”, *Advances in Applied Science Research*, vol. 4, no. 1, pp.182–187.
8. Chen, W.-Sh., Mesaki, Sh. and Lee, Ch.-H. (2021) “Separation of Sn, Sb, Bi, and Cu from tin anodeslime by solvent extraction and chemical precipitation”, *Metals*, vol. 11, no. 3, pp.1–11.
9. Su, Z., Zhang, Y., Liu, B., Lu, M., Li, G. and Jiang, T. (2017) “Extraction and Separation of Tin from Tin-Bearing Secondary Resources: A Review”, *JOM*, vol. 69, no. 11, pp. 2364–2372.
10. Alian, A. and Sanad, W. (1967) “Extraction of antimony with tertiary amines”, *Talanta*, vol. 14, pp. 659–669.
11. Afzaletdinova N.G. (2022) “Research extraction of bismuth (III) by the derivative of 1,2,4-triazole from hydrochloric acid solutions”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 12, no. 2, pp. 88–98. (In Russ.).
12. Kreshkov, A.P (1970). *Osnovy analiticheskoy khimii. Kolichestvennyy analiz* [Fundamentals of analytical chemistry. Quantitative Analysis], Moscow, Khimiya. (In Russ.).
13. John, M. (1975) “Spectrophotometric studies on Sb(III) in hydrochloric acid solutions”, *Canadian Journal of Chemistry*, vol. 53, pp. 888–894.
14. Jeffery, G.H., Bassett, J., Mendham, J. and Denney, R.C. (1989) “Textbook of Quantitative Chemical Analysis”. London, Longman Scientific & Technical.

15. Svehla, G. (ed.) (1978) *Wilson and Wilson's Comprehensive Analytical Chemistry, vol.6: Analytical Infrared Spectroscopy*, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York.
16. Baykalova, L.V., Zyryanova, I.A., Tarasova, O.A., Chipanina, N.V., Schmidt, E.Yu., Kashik, T.V., Afonin, A.V., Sinegovskaya, L.M., Vashchenko, A.V. and Trofimov, E.A. (2003) "1-Allenylpyrazole and 1-allenyl-1,2,4-triazole and reaction with HCl and metal chlorides", *Russian Journal of General Chemistry*, vol. 73, no. 10, pp. 727–733. (In Russ.).
17. Kukushkin, Yu.N. (1985) *Khimiya koordinatsionnykh soyedineniy* [Chemistry of coordination compounds], Vyshaya Shkola, Moscow. (In Russ.).
18. Borowiaak-Resterna, A., Kyuchhoukov, G. and Szymanowski, S. (2002), *ISEC Cape Town, South Africa*, pp. 988–994.

Information about the authors

Nasima G. Afzaletdinova, Candidate of Chemistry Sciences, Lead Engineer, Laboratories of physical and chemical methods of analysis, Ufa Federal Research Center RAS (69, prospect Oktyabrya, Ufa, Russia, 430005), hisam@anrb.ru.

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 21 July 2022; approved after reviewing 26 July 2022; accepted 16 September 2022.