

Научная статья

УДК 542.61+546.57

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-2-88-98>

## Исследование экстракции висмута (III) производным 1,2,4-триазола из солянокислых растворов

**Насима Гимадисламовна Афзалетдинова**

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

**Аннотация.** В работе исследована экстракция висмута (III) из солянокислых растворов производным 1,2,4-триазола: 1-[2-(2,4-дихлорфенил)-4-пропил-1,3-диоксолан-2-ил]-1H-1,2,4-триазол. Найдены оптимальные условия извлечения. Предположено, что висмут(III) при времени контакта фаз 5 мин экстрагируются по анионообменному механизму. Экстрагируемый хлорокомплекс висмута (III) выделен и охарактеризован методами электронной, ИК-спектроскопии и элементным анализом. Исследована реэкстракция висмута (III) из 1,0 моль/л раствора соляной кислоты.

**Ключевые слова:** производное 1,2,4-триазола; висмут (III); экстракция; соляная кислота; реэкстракция.

**Для цитирования:** Афзалетдинова Н.Г. Исследование экстракции висмута (III) производными 1,2,4-триазола из солянокислых растворов // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2022. Т. 12, № 2. С. 88–98. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-2-88-98>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-2-88-98>

## Research extraction of bismuth (III) by the derivative of 1,2,4-triazole from hydrochloric acid solutions

**Nasima G. Afzaletdinova**

Ufa Federal Research Center RAS, Russia, Ufa

**Abstract.** Studied the extraction of bismuth (III from 1.0 mol/l) hydrochloric acid with 1,2,4 triazole derivatives: (1-[2-(2,4-dichlorophenyl)-4-propyl-1,3-dioxolan-2-yl]-1H-1,2,4 triazole. Optimum extraction conditions have been found. It has been found that bismuth (III) is extracted by the anion exchange mechanism at a contact time of 5 min. Chlorocomplex of bismuth (III) is isolated and characterized by electron and IR spectroscopy and elemental analysis. Re-extraction of bismuth (III) from 1,0 mol/l solution of hydrochloric acid were studied.

**Key words:** derivative of 1,2,4-triazole, bismuth (III), extraction, hydrochloric acid, stripping

**For citation:** 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.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-2-88-98>.

Возрастающее потребление соединений висмута, определяемое многофункциональностью их свойств, вызывает необходимость более рационального использования как сырья, так и содержащих их концентратов и технологических растворов [1–4]. Некоторые соединения висмута вошли также и в медицинскую практику [5]. В работах [6, 7] авторы рассмотрели синтез, исследовали особенности строения, физико-химические и биологические свойства, а также направления практического применения координационных соединений переходных металлов и лантанидов с 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновой и 1-аминоэтан-1,1-дифосфоновой кислотами и спейсерированными 1,2,4-триазолами. В работах [7, 8] авторы рассмотрели возможности отделения висмута от других сопутствующих металлов различными методами.

Известно, что высокомолекулярные амины являются хорошими экстракционными реагентами многих ионов металлов из растворов кислот [10–11]. Для эффективного извлечения висмута (III) из солянокислых растворов многие исследователи используют азотсодержащие экстракционные реагенты [12–13], преимущественно извлекающие их из солянокислых растворов в виде анионов  $[\text{BiCl}_5]^{2-}$ .

В последнее время появляются работы по исследованию экстракции актинидов и лантанидов из кислых растворов экстракционными реагентами функционализированными триазолами [14]. Ранее нами было исследовано производное 1,2,4-триазола в качестве экстракционного реагента при извлечении Rh (III) из растворов соляной кислоты [15].

Однако в литературе отсутствуют данные по извлечению висмута (III) из солянокислых рас-

творов производными триазола. Поэтому представляло интерес изучение экстракции этих металлов одним из производных триазола – пропиканазолом: (1-[2-(2,4-дихлорфенил)-4-пропил-1,3-диоксолан-2-ил]-1H-1,2,4-триазол).

#### Объекты и методы исследования

Растворы висмута (III) готовили растворением высокочистого оксида висмута (марки ВМО) в растворе соляной кислоты (1:1) с последующим разбавлением дистиллированной водой до необходимых концентраций по HCl и по висмуту (III). Концентрацию висмута (III) в исходных растворах и в водной фазе после экстракции определяли комплексонометрическим титрованием, (индикатор – ксиленоловый оранжевый) и спектрофотометрически с тиомочевинной [16]. Коэффициент распределения висмута (III) между органической и водной фазами рассчитывали по формуле

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

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

Согласно электронным спектрам поглощения раствора висмута (III) в 1,0 моль/л растворе HCl, приготовленного разбавлением исходного раствора висмута (III), преобладающей формой является  $[\text{BiCl}_5(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$  ( $\lambda = 30400 \text{ см}^{-1}$ ) [17]. Концентрацию соляной кислоты в исходных растворах определяли титрованием 1,0 моль/л раствором KOH в воде (индикатор – метилоранжевый). В качестве экстракционного реагента при изучении экстракции висмута (III) в работе применяли растворы 1-[2-(2,4-дихлорфенил)-4-пропил-1,3-диоксолан-2-илметил]-1H-1,2,4-триазола (далее L, производитель Ciba-Geigy) в

толуоле. Растворы экстракционного реагента готовили по его точным навескам.

Экстракцию проводили из свежеприготовленных растворов висмута (III) при температуре  $(20 \pm 0,5^\circ\text{C})$  при соотношении водной и органической фаз 1:1. Перемешивание фаз осуществляли на магнитной мешалке R-3. Раздел фаз после перемешивания был четким и происходил в течение 1 мин после завершения контакта фаз. Концентрацию хлорид-ионов в органической фазе определяли аргентометрическим методом. Индикатор – хромат калия  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  [18]. Электропроводность экстрактов и комплексов измеряли в ацетоне на кондуктометре типа ОК 102/1 фирмы "Radelkis". ЯМР  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{Si}$  электронные спектры поглощения экстрактов и комплексов регистрировали на спектрометре Bruker AM 500 (500.13 МГц) (растворитель – дейтерохлороформ) и Specord M 40. ИК-спектры экстрагируемого комплекса были записаны на спектрофотометре IR Prestige-21 (Fourier Spectrophotometer Shimadzu) в области  $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$  в вазелиновом масле.

### Результаты и их обсуждение

Предварительными опытами было изучено влияние времени контакта фаз на установление экстракционного равновесия при извлечении висмута (III) из 1,0 моль/л растворов  $\text{HCl}$  реагентом L в толуоле. Экстракционное равновесие достигается в пределах 5 мин (рис. 1).

Следует отметить, что авторы работы [19], применявшие метод спектроскопии комбинационного рассеяния света пришли к выводу, что при молярных соотношениях  $[\text{Cl}^-]: [\text{Bi(III)}]$  от 4 до 20 в водном растворе существует единственный комплекс  $[\text{BiCl}_4]^-$ , где  $[\text{Cl}^-] = 1,0$  моль/л. Согласно проведенным исследованиям авторов, ион  $[\text{BiCl}_4]^-$  будет находиться в

растворе при концентрациях висмута (III) от 0,25 до 0,05 моль/л. Данный однозарядный ион будет извлекаться лучше, чем ион  $[\text{BiCl}_5]^{2-}$  по реакции (рис. 1, кривая 2):

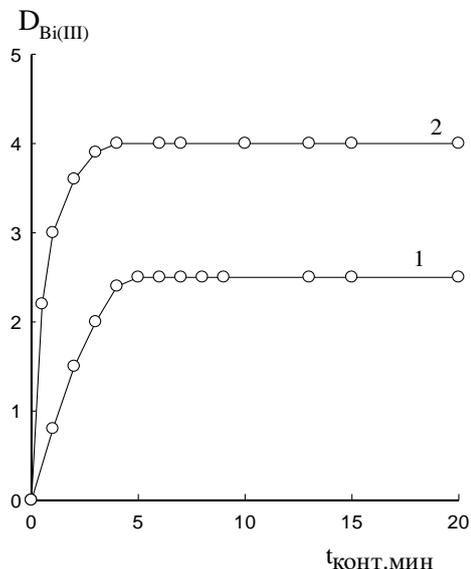
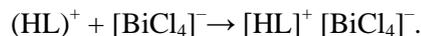


Рис. 1. Влияние времени контакта фаз на коэффициент распределения висмута(III):

$$C_{\text{HCl}} = 1,0 \text{ моль/л}; C_L = 0,3 \text{ моль/л};$$

$$C_{\text{Bi(III)}} = 0,006 \text{ моль/л (1) и } 0,06 \text{ моль/л (2)}$$

Однако в водных растворах висмут (III) в форме  $[\text{BiCl}_5]^{2-}$  существует в более разбавленных растворах [3]. Поэтому в работе применяли наиболее разбавленные растворы висмута (III).

На рис. 2 представлено влияние концентрации соляной кислоты на коэффициент распределения висмута (III) при  $C_{\text{Bi(III)}} = 0,006$  моль/л, при извлечении его раствором L в толуоле. Как видно из рис. 2, с увеличением концентрации хлороводородной кислоты в растворе извлечение висмута (III) возрастает, что вероятно, связано с увеличением протонирования атома азота в положении 4 экстракционного реагента [20]. Все последующие опыты по экстракции  $\text{Bi(III)}$  проводили при времени контакта фаз 5 мин и  $C_{\text{HCl}} = 1,0$  моль/л.

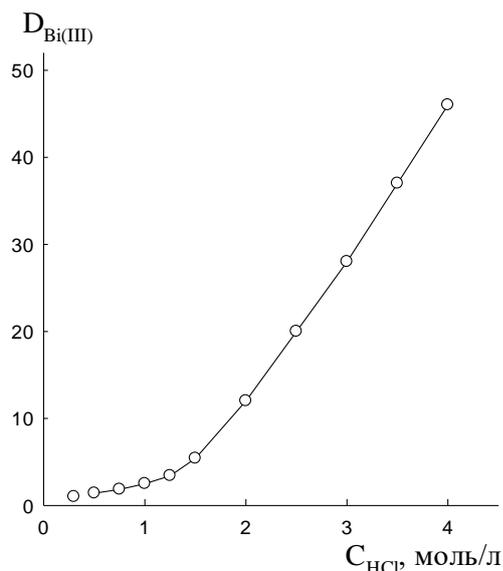


Рис. 2. Влияние концентрации соляной кислоты на коэффициент распределения висмута (III):

$$C_L = 0,3 \text{ моль/л}, C_{Bi(III)} = 0,006 \text{ моль/л}$$

Для установления механизма экстракции висмута (III) с L изучена зависимость коэффициента распределения висмута (III) от концентрации ионов водорода при постоянной ионной силе раствора, равной 1,5. Концентрацию хлороводородной кислоты варьировали от 0,5 до 1,5 моль/л. Ионную силу раствора поддерживали добавлением расчетных количеств NaCl (от 0,25 до 1,0 моль/л).

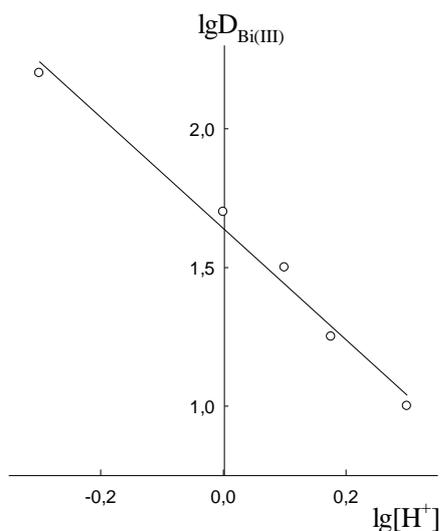


Рис. 3. Влияние концентрации ионов водорода на коэффициент распределения висмута (III):

$$C_{Bi(III)} = 0,014 \text{ моль/л}, C_L = 0,3 \text{ моль/л}, I = 1,5$$

Из логарифмической зависимости  $lg D_{Bi(III)} = f(pH)$  (рис. 3) следует, что концентрация ионов водорода влияет на коэффициент распределения висмута (III). Тангенс угла наклона прямой равен 2, что позволяет предположить, что извлечение висмута (III) в органическую фазу осуществляется в форме аниона  $[BiCl_5]^{2-}$ .

Были построены изотермы экстракции висмута (III) из 1,0 моль/л соляной кислоты растворами L (рис.4). Насыщение экстрагента висмутом (III) происходит при соотношении  $Bi(III):L = 1:2$  ( $C_L = 0,1$  моль/л,  $Y_{Bi(III)} = 0,05$  моль/л).

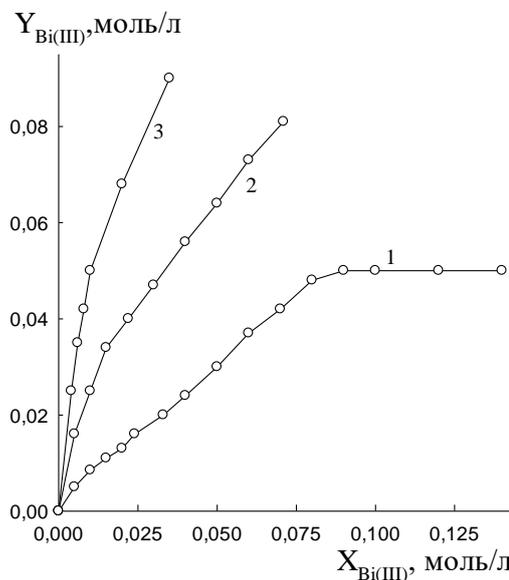


Рис. 4. Изотермы экстракции висмута(III):

$$C_L = 0,10 \text{ (1)}, 0,20 \text{ (2)}, 0,30 \text{ (3)} \text{ моль/л}$$

Также методом сдвига равновесия было оценено количество молекул экстрагента, входящих в состав извлекаемого соединения, которое оказалось равным 2 (рис.5), то есть на один ион висмута (III) приходится две молекулы экстрагента. Таким образом, извлечение висмута (III) в органическую фазу происходит в форме  $(HL)^{2+}[BiCl_5]^{2-}$ .

На рис. 6 представлена изотерма экстракции висмута (III) в логарифмических координатах.

$C_{\text{HCl}} = 1,0$  моль/л,  $C_L = 0,2$  моль/л. Из зависимости следует, что извлекаемое соединение переходит из водной фазы в органическую в виде мономерного комплекса ( $n=0,96$ ), то есть в форме  $[\text{BiCl}_5]^{2-}$ .

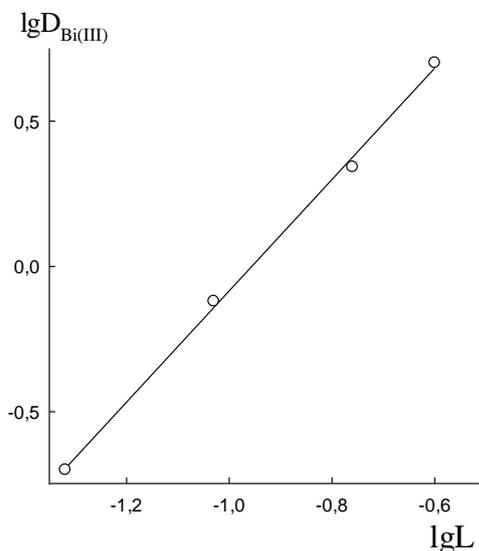


Рис.5. Зависимость логарифма концентрации свободного L от логарифма коэффициента распределения висмута(III):

$$C_{\text{HCl}} = 1,0 \text{ моль/л, } X_{\text{Bi(III)}} = 0,005 \text{ моль/л}$$

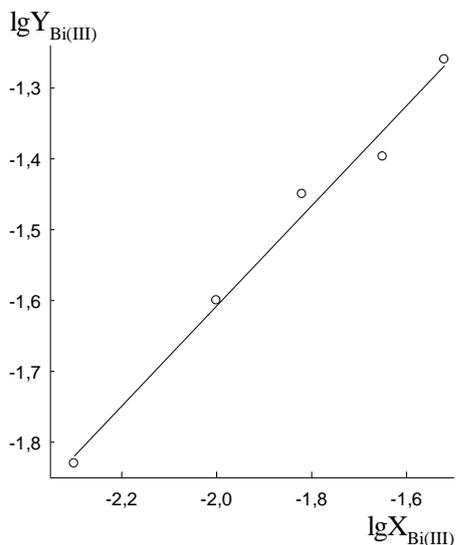


Рис. 6. Изотерма экстракции висмута(III) в логарифмических координатах:  $C_L = 0,2$  моль/л

На рис. 7 приведены электронные спектры поглощения исходного раствора висмута (III) в 1,0 моль/л HCl и комплекса висмута (III) с L

после экстракции. На электронных спектрах поглощения проявляется полоса поглощения при  $30400 \text{ см}^{-1}$ , которая характерна для формы  $[\text{BiCl}_5]^{2-}$ . Незначительное уширение этой полосы поглощения в экстракте связано, вероятно, с изменением природы катиона в извлекаемом соединении [21].

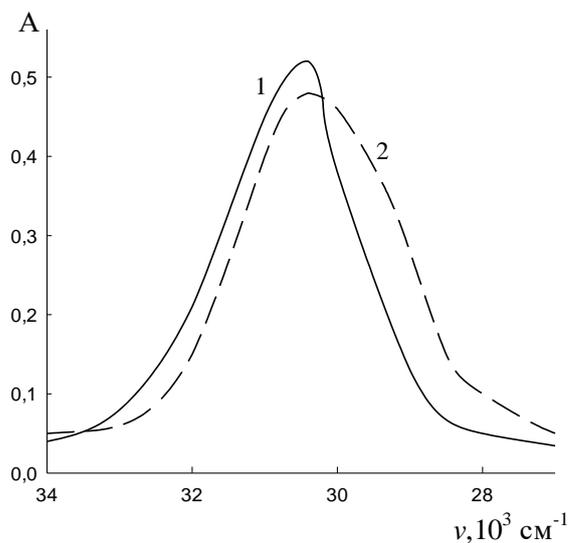


Рис. 7. Электронный спектр поглощения исходного раствора висмута (III) в 1,0 моль/л HCl (1) и экстракта висмута (III) с L (2)

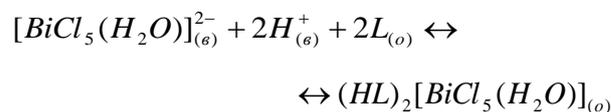
Зарегистрирован ИК-спектр Li экстрагируемого комплекса висмута (III). В ИК-спектре L наблюдаются полосы поглощения, характерные для скелетных колебаний триазолового кольца при  $1587$  (с.),  $1558$  (ср.) и  $1506 \text{ см}^{-1}$  (с.) [22]. При комплексообразовании L как с HCl, так и с висмутом (III), образуются ионные ассоциаты. Интенсивность полосы поглощения при  $1558 \text{ см}^{-1}$  увеличивается и сравнивается с интенсивностью полосы при  $1587 \text{ см}^{-1}$ . Полоса поглощения при  $1506 \text{ см}^{-1}$  (с), характеризующая скелетные колебания связи  $\nu(\text{CN})$  в триазоловом кольце, в комплексе не испытывает смещения. Протонирование триазолового кольца по атому азота осуществляется в положении  $\text{N}_4$ , что подтверждает наше предположение об из-

влечении висмута (III) в ионной форме. Также в ИК-спектре, как экстрагируемых ионных ассоциатов висмута (III) с L, так и комплекса с хлороводородной кислотой наблюдаются уширенные полосы поглощения средней интенсивности в области 2200–2800 см<sup>-1</sup>. Полученные данные по ИК-спектроскопическим характеристикам протонированной формы экстрагента с HCl не противоречат исследованиям, проведенным в работе [21], в которой показано, что производное триазола с хлороводородной кислотой образует комплекс состава L·HCl, который в ИК-спектре проявляется в виде широкой полосы поглощения в области 2400–2900 см<sup>-1</sup>, отвечающей колебаниям катиона =NH<sup>+</sup>.

Экстрагируемый комплекс висмута (III) с L состава (HL)<sub>2</sub><sup>+</sup>[BiCl<sub>5</sub>]<sup>2-</sup> был получен в условиях насыщения при экстракции висмута (III) из раствора с содержанием соляной кислоты 1,0 моль/л, многократно промыт гексаном и водой от возможного избытка экстрагента и соли висмута (III). Комплекс представлял собой мазеобразное соединение, растворимое в обычных органических растворителях.

Органическая фаза была проанализирована на содержание хлорид-ионов в экстрактах аргентометрическим методом. Соотношение [Bi(III)]:[Cl<sup>-</sup>] было равно 1:5. Результаты элементного анализа экстрагируемого комплекса также подтвердили его состав, полученный экстракционным методом [Bi(III)]:[Cl<sup>-</sup>]:[L] = 1:5:2. Среднее значение молярной электропроводности ионного ассоциата висмута (III) с L в ацетоне в интервале концентрацией 0,0001–0,0020 моль/л составляло 159 ом<sup>-1</sup> см<sup>2</sup> моль<sup>-1</sup>, что согласовалось с литературными данными для интервала значений молярной электропроводности для электролитов типа 1:2 [23].

Из литературных данных известно, что слабоосновные экстрагенты могут протонироваться при взаимодействии с раствором хлороводородной кислоты [24]. Нами предположено, что хлорокомплекс висмута (III) может извлекаться L по анионообменному механизму:



Концентрационная константа реакции экстракции была вычислена по уравнению:

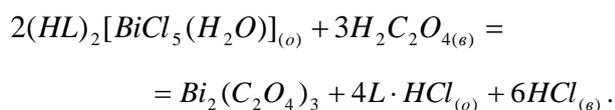
$$K_{\text{конц}} = \frac{[(HL)_2(BiCl_5H_2O)]}{[BiCl_5(H_2O)]^{2-} [H^+]^2 L^2} = = \frac{Y_{Bi(III)}}{X_{Bi(III)} \cdot (1 - 2Y_{Bi(III)}) \cdot [H^+]^2 \cdot (L - 2Y_{Bi(III)})},$$

где Y<sub>Bi(III)</sub> и X<sub>Bi(III)</sub> – равновесные концентрации висмута (III) в органической и водной фазах соответственно, [H<sup>+</sup>] = 1,0 моль/л, L<sub>o</sub> и L – исходная и равновесная концентрации экстрагента, моль/л.

Среднее значение концентрационной константы равно 118,0 ± 3,0 (n = 5; P = 0,95).

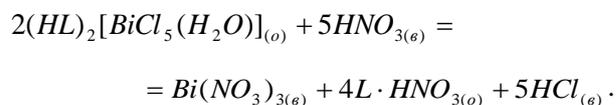
Изучена реэкстракция висмута (III) из органической фазы различными реагентами (растворами щавелевой, азотной и серной кислот, ацетатным буфером и раствором хлорида аммония) при однократном контакте фаз продолжительностью 5 мин и соотношением водной и органической фазы 1:1 (см. таблицу). Содержание висмута (III) после реэкстракции осуществляли по водной фазе спектрофотометрическим методом. Установлено, что висмут (III) реэкстрагируется из органической фазы практически нацело при применении в качестве реэкстрагентов растворов азотной и щавелевой кислот с выпадением в осадок в виде оксалата (порошок белого цвета). Реакцию реэкстракции висмута

(III) щавелевой кислотой можно представить следующим уравнением:



В дальнейшем оксалат висмута может найти применение при получении порошка оксида

висмута  $Bi_2O_3$ . Экстрагент может быть возвращен в процесс извлечения висмута (III). Реэкстракция висмута (III) на 98,8% осуществляется 3,0 моль/л раствором азотной кислотой:



### Реэкстракция висмута (III) из органической фазы ( $C_L = 0,1$ моль/л)

$Y_{Bi(III)}$ , моль/л	Реэкстрагент	Концентрация реэкстрагента, моль/л	Степень реэкстракции, %	Примечание
0,100	Щавелевая кислота	1,1	99,0	$Bi_2(C_2O_4)_3$
0,032	—" —</td <td>—"<!--—</td--> <td>99,0</td> <td><math>Bi_2(C_2O_4)_3</math></td> </td>	—" —</td <td>99,0</td> <td><math>Bi_2(C_2O_4)_3</math></td>	99,0	$Bi_2(C_2O_4)_3$
0,004	—" —</td <td>—"<!--—</td--> <td>98,9</td> <td><math>Bi_2(C_2O_4)_3</math></td> </td>	—" —</td <td>98,9</td> <td><math>Bi_2(C_2O_4)_3</math></td>	98,9	$Bi_2(C_2O_4)_3$
0,012	Азотная кислота	3,0	98,8	$(HL)^+NO_3^-$
0,012	Серная кислота	1,0	13,0	$(HL)_2^+SO_4^-$
0,012	Хлорид аммония	1,7	43,3	Прозрачный раствор
0,012	Ацетатный буфер	-	1,0	Прозрачный раствор

Следует отметить, что при выбранной концентрации серной кислоты реэкстракция висмута (III) практически не осуществляется, что вероятно, связано с особенностями поведения данных реагентов при извлечении висмута(III).

### Заключение

Изучена экстракция хлорокомплекса висмута (III) из растворов HCl производным 1,2,4-триазола. Найдены оптимальные условия извлечения ( $C_{HCl}=1,0$  моль/л, время контакта 5 мин). Установлено, что висмут (III) экстрагируется по анионообменному механизму с образованием ионного ассоциата состава  $(HL)_2[BiCl_5(H_2O)]$ . Экстрагируемый ионный ассоциат выделен и охарактеризован методами электронной, ИК-спектроскопии и элементным анализом. Реэкстракция висмута (III) из орга-

нической фазы практически полностью осуществляется 3,0 моль/л раствором азотной и 1,1 моль/л раствором щавелевой кислот при времени контакта фаз 5 мин за одну ступень. Следует отметить, что такие реэкстрагенты, как серная кислота, хлористый аммоний и ацетатный буфер непригодны для реэкстракции висмута (III).

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания «Комплексы моно- и полидентатных сераазоторганических соединений с ионами металлов и фармаконами» (№ 122031400246-1).

### Благодарности

Анализы исследованных соединений выполнены на оборудовании ЦКП «Химия» УФИХ РАН и РЦКП «Агидель» УФИЦ РАН.

### Список источников

1. *Ojebuoboh F.K.* Bismuth – Production, properties, and applications // Review of Extraction Metallurgy. 1992. Vol. 44. P. 46–49. <https://doi.org/10.1007/BF03222821>.
2. *Liu X., Xiao M., Xu L., Miao Y., Ouyang R.* Characteristics, applications and determination of bismuth // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2016. Vol. 16, № 7. P. 6679–6689. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.11371>.

3. Юхин Ю.М., Михайлов Ю.И. Химия висмутовых соединений и материалов. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2001. 360 с.
4. Ахмедов М.М., Теймурова Э.А. Переработка высокожелезистых сульфидных и свинцовых концентратов. Баку: XXI-YNE, 2008. 252 с.
5. Оковитый С.В., Ивкин Д.Ю. Препараты висмута – фармакологические основы клинического эффекта // Лечащий врач. 2015. № 10. С. 1–8.
6. Gusev A., Nemes I., Herchel R., et al. Structural and magnetic characterization of Ni (II), Co (II), and Fe (II) binuclear complexes on a bis(pyridyltriazolyl)alkane basis // Dalton transactions. 2019. Vol. 48, № 28. P. 10526–10536. <https://doi.org/10.1039/c9dt01391a>.
7. Gusev A., Nemes I., Herchel R., et al. Copper (II) self-assembled clusters of bis ((pyridin-2-yl)-1,2,4-triazol-3-yl) alkanes. Unusual rearrangement of ligands under reaction conditions // Dalton Transactions. 2019. Vol. 48, № 9. P. 3052–3060. <https://doi.org/10.1039/C8DT04816A>.
8. Hespanhol M.C., Patrício P.R., da Silva L.H.M., et al. A sustainable methodology to extract bismuth from secondary sources // Journal of the Brazilian Chemical Society. 2019. Vol. 30, № 11. P. 2376–2385. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190147>.
9. Chen W.-S., Mesaki Sh., Lee Ch.-H. Separation of Sn, Sb, Bi, and Cu from tin anode slime by solvent extraction and chemical precipitation // Metals. 2021. Vol. 11, № 3. P. 1–11. <https://doi.org/10.3390/met11030515>.
10. Johansson M., Alstad J., Omtvedt J.P., Skarnemark G. A comparison of the extraction of carrier-free  $^{176,177}\text{W}$  and  $^{99}\text{Mo}$  with that of U, Th, Am, Cm, La, Ce, Tm, Yb, Lu, and Hf into tri-n-octyl amine in toluene from nitric, phosphoric, and sulphuric acid media // Radiochimica Acta. 2001. Vol. 89, № 10. P. 619–624. <https://doi.org/10.1524/ract.91.6.351.20021>.
11. Chida H., Kawahara K., Katsuta Sh. Highly Effective Extraction of Ruthenium from Hydrochloric Acid Solutions with a Protic Ionic Liquid Trioctylammonium Chloride // Solvent Extraction Research Development – Japan. 2020. Vol. 27, № 2. P. 135–142. <https://doi.org/10.15261/serdj.27.135>.
12. Kokate S.J., Shelar Y.S., Aher H.R., Kuchekar S.R. Liquid-liquid extraction and recovery of bismuth (III) from hydrochloric acid media using n-octylaniline in chloroform // Bulgarian Chemical Communications. 2010. Vol. 42, № 2. P. 107–112.
13. Kuchekar S.R., Aher H.R., Chavan M.B. Solvent extraction of zinc (II), cadmium (II), mercury (II) and bismuth (III) using n-octylaniline and their separations // Indian Journal Chemistry. 2003. Vol. 42A. P. 1674–1676.
14. Zsabka P., Opsomer T., VanHecke K., et al. Solvent extraction studies for the separation of trivalent actinides from lanthanides with a triazole-functionalized 1,10-phenanthroline extractant // Solvent Extraction and Ion Exchange. 2020. Vol. 38, № 7. P. 719–734. <https://doi.org/10.1080/07366299.2020.1790105>.
15. Афзалетдинова Н.Г., Муринов Ю.И. Жидкостная экстракция родия (III) из солянокислых растворов производным 1,2,4-триазола // Журнал неорганической химии. 2014. Т. 59, №1. С. 99. <https://doi.org/10.7868/S0044457X14010024>.
16. Бусев А.И. Аналитическая химия висмута. М.: Из-во АН СССР, 1953. 382 с.

17. *Tooth B.* The Hydrothermal Chemistry of bismuth and the liquid bismuth collector model. Athesis submitted for the degree of doctor of philosophy, University of Adelaide. 2013. 78 p.

18. *Jeffery G.H., Bassett J., Mendham J., et al.* Textbook of Quantitative Chemical Analysis. London: Longman Scientific and Technical, 1989. 887 p.

19. *Белый М.У., Охрименко Б.Я.* Исследование спектров комбинированного рассеяния комплексов висмута // Журнал прикладной спектроскопии. 1972. Т. 17. С. 473–476.

20. *Голубятникова Л.Г., Анпилогова Г.Р., Хисамутдинов Р.А., и др.* Экстракция соляной и азотной кислот 1-[2-{2,4-дихлорфенил}-4-пропил-1,3-диоксолан-2-ил]-метил}-1H-1,2,4-триазолом и (RS)-1-(4-хлорфенил)-4,4-диметил-3-(1H-1,2,4-триазол-1-ил-метил)-пентан-3-олом // Журнал общей химии. 2012. Т. 82, № 2. С. 315–321.

21. *Байкалова Л.В., Зырянова И.А., Тарасова О.А., и др.* 1-Алленилпиразол и 1-алленил-1,2,4-триазол и реакция с HCl и хлоридами металлов // Журнал общей химии. 2003. Т. 73, № 10. С. 727–733.

22. *Wilson & Wilson's Comprehensive Analytical Chemistry. Vol. VI. Analytical infrared spectroscopy:* edited by G. Svehla. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier, 1976. 555 p.

23. *Кукушкин Ю.Н.* Химия координационных соединений. М.: Высшая школа, 1985. 455с.

#### Информация об авторах

**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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

*Поступила 22 марта 2022 г; одобрена 3 апреля 2022 г; принята к публикации 27 мая 2022 г.*

#### References

1. Ojebuoboh, F.K. (1992) “Bismuth – Production, properties, and applications, *Review of Metallurgy*, vol. 44, pp. 46–49.

2. Liu, X., Xiao, M., Xu, L., Miao, Y. and Ouyang, R. (2016) “Characteristics, applications and determination of bismuth”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 16, no. 7, pp. 6679–6689.

3. Yukhin, Yu.M. and Mikhailov, Yu.I. (2001) *Chemistry of bismuth compounds and materials*, Publishing house SO RAN, Novosibirsk. (in Russ.).

4. Akhmedov, M.M. and Teymurova, E.A. (2008). *Processing of high iron sulfide and lead concentrates*, XXI–YNE, Baku. (in Russ.).

5. Okovity, S.V. and Ivkin, D.Yu. (2015) “Bismuth preparations – pharmacological basis of clinical effect”, *Lechaschiy vrach*, no. 15, pp. 1–8.

6. Gusev, A., Nemes, I., Herchel, R., Riush, I., Titiš, J., Voča, R., Kiskin, M. Eremenko, E. and Linert, W. (2019) “Structural and magnetic characterization of Ni (II), Co (II), and Fe (II) binuclear complexes on a bis(pyridyltriazolyl)alkane basis”, *Dalton transactions*, vol. 48, no. 28, pp. 10526–10536.

7. Gusev, A, Nemeč, I., Herchel, R, Shul'gin, V., Ryush, I., Kiskin, M., Efimov, N., Ugolkova, E., Minin, V., Lyssenko, K., Eremenko, I. and Linert W. (2019) "Structural and magnetic characterization of Ni (II), Co (II), and Fe (II) binuclear complexes on a bis(pyridyltriazolyl) alkane basis", *Dalton transactions*, vol. 48., no. 9, pp. 3052–3060.
8. Hespanhol, M.C., Patrício, P.R., da Silva, L.H.M., Vargas, S.J.R., Rezende, T.C.S., Campos, R.A. (2019) "A sustainable methodology to extract bismuth from secondary sources", *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 30, no. 11, pp. 2376–2385.
9. Chen, W.-S., Mesaki, Sh. and Lee, Ch.-H. (2021) "Separation of Sn, Sb, Bi, and Cu from tin anode slime by solvent extraction and chemical precipitation", *Metals*, vol. 11, no. 3, pp. 1–11.
10. Johansson, M., Alstad, J., Omtvedt, J.P. and Skarnemark, G. (2001) "A comparison of the extraction of carrier-free  $^{176,177}\text{W}$  and  $^{99}\text{Mo}$  with that of U, Th, Am, Cm, La, Ce, Tm, Yb, Lu, and Hf into tri-n-octyl amine in toluene from nitric, phosphoric, and sulphuric acid media", *Radiochimica Acta*, vol. 89, no. 10, pp. 619–624.
11. Chida, H., Kawahara, K. and Katsuta, Sh. (2020) "Highly Effective Extraction of Ruthenium from Hydrochloric Acid Solutions with a Protic Ionic Liquid Trioctylammonium Chloride", *Solvent Extraction Research Development – Japan*, vol. 27, no. 2, pp. 135–142.
12. Kokate, S.J., Shelar, Y.S., Aher, H.R. and Kuchekar, S.R. (2010) "Liquid-liquid extraction and recovery of bismuth (III) from hydrochloric acid media using n-octylaniline in chloroform", *Bulgarian Chemical Communications*, vol. 42, no. 2, pp. 107–112.
13. Kuchekar, S.R., Aher, H.R. and Chavan, M.B. (2003) "Solvent extraction of zinc (II), cadmium (II), mercury (II) and bismuth (III) using n-octylaniline and their separations", *Indian Journal Chemistry*, vol. 42A, pp. 1674–1676.
14. Zsabka, P., Opsomer, T., VanHecke, K., Dehaen, W., Wilden, A., Modolo, G., Verwerft, M., Binne-mans, K. and Cardinaels, T. (2020) "Solvent extraction studies for the separation of trivalent actinides from lanthanides with a triazole-functionalized 1,10-phenanthroline extractant", *Solvent Extraction and Ion Exchange*, vol. 38, no. 7, pp. 719–734.
15. Afzaltdinova, N.G. and Murinov, Yu.I. (2014), "Liquid extraction of rhodium (III) from hydrochloric acid solutions of 1,2,4-triazole derivatives", *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 59, no 1, pp. 99. (In Russ).
16. Busev, A.I. (1953). *Analytical chemistry of bismuth*, Academy of Sciences of the USSR, Moscow. (In Russ.).
17. Tooth, B. (2013) The Hydrothermal Chemistry of bismuth and the liquid bismuth collector model. A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy, University of Adelaide.
18. Jeffery, G.H., Bassett, J., Mendham, J. and Denney, R.C. (1989) "Textbook of Quantitative Chemical Analysis", Longman Scientific and Technical, London.
19. Belyi, M.U. and Okhrimenko, B.Ya. (1972) "Investigation of combined scattering spectra of complexes bismuth", *Journal Prikladnoy Spectroscopii*, vol. 17, pp. 473–476. (In Russ.).

20. Golubyatnikova, L.G., Anpilogova, G.R., Khisamutdinov, R.A. and Murinov, Yu.I. (2012) “Hydrochloric and nitric acids extraction by triazole and (RS)-1-(4-chlorophenyl)-4,4-dimethyl-3-(1n-1,2,4-triazol-1-yl-methyl)-pentan-3-ol”, *Journal of General Chemistry*, vol. 82, no. 2, pp. 315–321. (In Russ.).

21. 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.).

22. Svehla, G. (ed.) (1978) *Wilson and Wilson's Comprehensive Analytical Chemistry, vol. 6: Analytical Infrared Spectroscopy*, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York.

23. Kukushkin, Yu.N. (1985) *Khimiya koordinatsionnykh soyedineniy* [Chemistry of coordination compounds], Vyshaya Shkola, Moscow. (In Russ.).

#### **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 22 March 2022; approved after reviewing 03 April 2022; accepted 27 May 2022.*