



Научная статья

УДК 669.782:669.054.1

<https://elibrary.ru/dwcqxz><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-436-448>

## Повышение качества металлургического кремния путём кислотной очистки от примесей

Н.В. Немчинова<sup>1✉</sup>, А.А. Зайцева<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – провести исследования в области гидрометаллургического рафинирования металлургического кремния. Объектом исследований явился металлургический кремний после окислительного рафинирования с АО «Кремний» компании «РУСАЛ» (г. Шелехов Иркутской обл., Россия). Химический состав образцов был изучен рентгенофлуоресцентным методом анализа и рентгеноспектральным микроанализом. По данным элементного анализа в металлургическом кремнии содержатся, % масс.: Al – 0,53, Fe – 0,6094, Ti – 0,0491, Ca – 0,0628, V – 0,0066, Cr – 0,002, Mn – 0,014, Cu – 0,003, P – 0,010, Ba – 0,007, Ni – 0,007, Zn – 0,002. Показано, что в исследуемых образцах присутствуют интерметаллиды следующего состава: AlFeSi<sub>2</sub> (с примесью Ca), FeSi<sub>2</sub> (с примесью Al), FeSi<sub>2</sub>Ti (с примесью Zr). Нами в качестве растворителей для очистки кремния от примесей были выбраны 10%-ые H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HNO<sub>3</sub>, а также 4% HF в различных соотношениях. Для изучения возможности протекания реакций взаимодействия интерметаллических соединений с отобранными растворителями были рассчитаны значения изменения энергии Гиббса, которые имели отрицательные величины. Экспериментальные работы по выщелачиванию примесей проводились на пробах кремния с частицами крупностью -200 мкм при постоянном перемешивании с помощью магнитной мешалки (температура процесса составляла 60°C, соотношение жидкого к твердому было 5:1, продолжительность очистки – 60 мин). Установлено, что при использовании в качестве растворителя смеси серной и плавиковой кислот в соотношении 1:1 достигается наибольшая степень (86,85%) очистки кремния от суммы примесей. Показано, что при использовании смеси серной и соляной кислот при соотношении 1:3 степень очистки металлургического кремния составляет 41,48%. Таким образом, были определены растворители, с использованием которых можно достичь максимальной очистки кремния от примесных элементов.

**Ключевые слова:** металлургический кремний, производство кремния, гидрометаллургическое рафинирование, энергия Гиббса, примеси

**Для цитирования:** Немчинова Н.В., Зайцева А.А. Повышение качества металлургического кремния путём кислотной очистки от примесей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 436–448. EDN: DWCQXZ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-436-448>.

### METALLURGY

Original article

## Improving the quality of metallurgical-grade silicon by acid leaching

Nina V. Nemchinova<sup>1✉</sup>, Anna A. Zaitseva<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This work deals with the problem of hydrometallurgical refining of metallurgical-grade silicon. Samples of metallurgical-grade silicon after oxidative refining from JSC Silicon, RUSAL (Shelekhov, Irkutsk Oblast, Russia) were subjected to X-ray fluorescence and electron microprobe analysis. The conducted elemental analysis determined their following composition, wt%: Al – 0.53, Fe – 0.6094, Ti – 0.0491, Ca – 0.0628, V – 0.0066, Cr – 0.002, Mn – 0.014, Cu – 0.003, P – 0.010, Ba – 0.007, Ni – 0.007, and Zn – 0.002. The examined samples were found to comprise the following intermetallic compounds: AlFeSi<sub>2</sub> (with an admixture of Ca), FeSi<sub>2</sub> (with an admixture of Al), and FeSi<sub>2</sub>Ti (with an admixture of Zr). In order to purify silicon from impurities, 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HNO<sub>3</sub>, as well as 4% HF in different ratios were

used as solvents. The feasibility of interactions between the intermetallic compounds and the selected solvents was assessed by calculating changes in the Gibbs energy, which had negative values. Experiments on impurity leaching were carried out using silicon samples with a particle size of  $-200\ \mu\text{m}$  under constant stirring with a magnetic stirrer under the temperature of  $60^\circ\text{C}$ , the liquid-to-solid ratio of 5:1, and the leaching duration of 60 min. The highest degree of silicon purification (86.85%) was achieved under leaching with a mixture of sulfuric and hydrofluoric acids in a ratio of 1:1. The use of a mixture of sulfuric and hydrochloric acids at a ratio of 1:3 resulted in the silicon purification of 41.48%. Thus, optimal solvents allowing the maximum purification of silicon from impurities were determined.

**Keywords:** metallurgical silicon, silicon production, hydrometallurgical refining, Gibbs energy, impurities

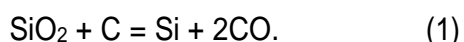
**For citation:** Nemchinova N.V., Zaitseva A.A. Improving the quality of metallurgical-grade silicon by acid leaching. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):436-448. (In Russ.). EDN: DWCQXZ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-436-448>.

## ВВЕДЕНИЕ

Металлургический кремний в современном мире находит широкое применение. Кремний используется в качестве легирующей добавки при производстве различных сплавов, в химической промышленности для производства силиконов, в электронной промышленности для изготовления полупроводниковых приборов и элементов, а также в секторе производства фотоэлектрических преобразователей для солнечной энергетики<sup>3</sup> [1–3]. Широко известно применение кремния в виде различных его соединений – карбида, диоксида – в различных областях (производство абразивов, медицинских изделий и др. [4, 5]).

По данным <https://www.indexbox.ru/news/Mirovoj-rynok-kremniya-sostavil-10-mlrd.-doll./> в 2021 г. мировой объем производства кремния составил 3,4 млн т. Лидерами среди стран-производителей являются Китай, Норвегия, Россия и США.

Получение металлургического кремния можно описать одной общей химической реакцией (1), по которой происходит восстановление углеродистыми восстановителями (УВ) кремнеземсодержащего сырья в рудно-термических печах (РТП) [3, 5]:



На территории Российской Федерации крупнейшим предприятием, производящим металлургический кремний, является АО «Кремний» объединенной компании «РУСАЛ» (Иркутская область, г. Шелехов) с объемом производства в 2022 году 27,42 тыс. т. Данное предприятие функционирует с 1981 г., производит высокочистые марки кремния. На дан-

ном предприятии при использовании трехэлектродных вращающихся РТП получают кремний чистотой 98–99,5%. Сырьем для производства кремния служит кварцит Черемшанского месторождения, расположенного в Республике Бурятия и входящего в состав предприятия. Также на предприятии в качестве рудной составляющей шихты стали опробовать кварцит Урда-Гарган (кварцит Гарганской площади), добываемый в Окинском районе Бурятии и относящийся к химически чистому виду кремнеземсодержащего сырья.

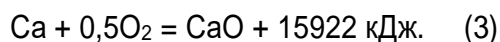
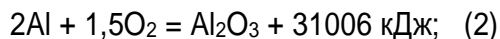
В качестве УВ используют смесь из древесного угля, нефтяного кокса, каменного угля различных производителей (Россия, Казахстан). В последнее время ввиду импортозамещения на предприятии опробывают новые виды углеродных материалов: уголь марки ССС Бачатского угольного разреза АО «УК «Кузбассразрезуголь», углеродосодержащий материал производства ЗАО «Технографит» (г. Вязьма).

Для снижения содержания примесных элементов в полученном в РТП металлургическом кремнии необходимо проводить его рафинирование.

В настоящее время ученые и производственники из разных стран уделяют много внимания методам очистки кремния от примесей, которые основаны на применении как пиро-, так и гидрометаллургических способов [6–13].

Единственным промышленным способом рафинирования металлургического кремния является окислительное рафинирование. По данному способу через расплав кремния в ковше пропускают воздух, тем самым происходит очистка от алюминия и кальция (в основном) по реакциям (2), (3)<sup>3</sup> [14–17]:

<sup>3</sup>Немчинова Н.В. Физикохимия и карботермия кремния: учебн. пособ. Иркутск: ИРНТУ, 2017. 287 с.



Технологическая схема окислительного рафинирования расплава кремния представлена на рис. 1.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав образцов металлургического кремния АО «Кремний» (после окислительного рафинирования) был изучен различными методами анализа: рентгенофлуоресцентным (РФА) [19] и рентгеноспектральным микроанализом (РСМА) [20].

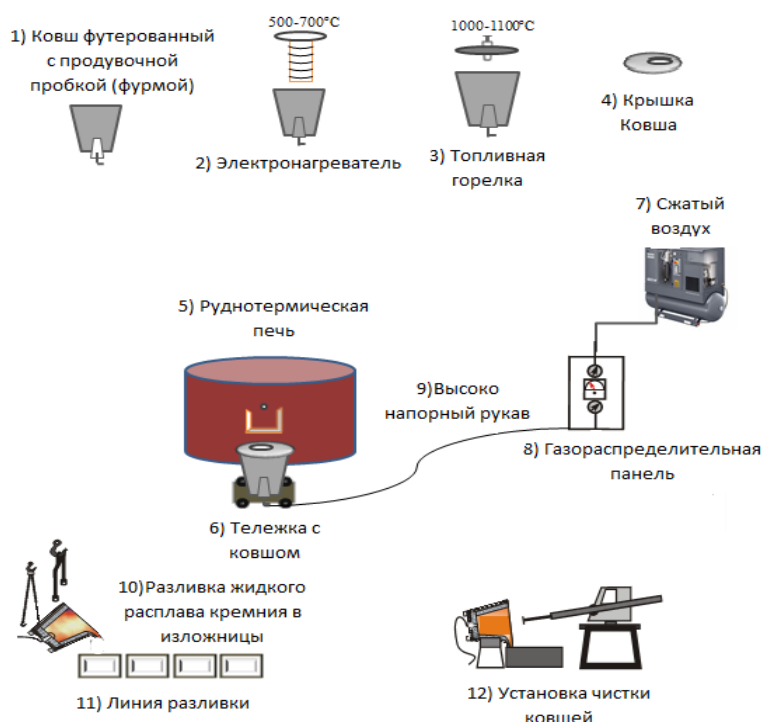
Для определения элементного химического состава полученного материала был проведен РФА, основанный на сборе и последующем анализе спектра, возникающего при облучении исследуемого материала рентгеновским излучением [19]. РФА проводили на

рентгеновском спектрометре S4 Pioneer (Bruker, Германия). Для проведения анализа в навеску кремния массой 0,7 г добавляли 0,3 г синтетического воска, далее провели смешивание в ступке (материал ступки – яшма) до визуально однородной массы. Прессование излучателя в виде таблетки производили на подложке из борной кислоты при усилии 10 т.

В результате РФА в исследуемом образце кремния были обнаружены следующие примеси, % масс., соответственно: Al – 0,53, Fe – 0,6094, Ti – 0,0491, Ca – 0,0628, V – 0,0066, Cr – 0,002, Mn – 0,014, Cu – 0,003, P – 0,010, Ba – 0,007, Ni – 0,007, Zn – 0,002. Содержание кремния по разнице содержания 12 примесных элементов составило 98,6939%.

По данным РФА Al, Fe, Ti, Ca содержатся в образце металлургического кремния после окислительного рафинирования в наибольшем количестве.

Сущность РСМА заключается в том, что при воздействии пучка электронов высокой энергии происходит возбуждение атомов и переход электронов на внешних орбиталях, сопровождающийся изменением энергии [20].



**Рис. 1. Технологическая схема окислительного рафинирования на АО «Кремний» [18]**

**Fig. 1. Process flow diagram of oxidation refining at JSC "Silicon" [18]**

Анализ образцов металлургического кремния после окислительного рафинирования проводили с помощью металлографического микроскопа «Olympus GX-51» (Olympus, Япония), оснащенного цифровой камерой «Altera 20» и предназначенного для получения в отраженном свете светопольных и темнопольных изображений, изображений дифференциального интерференциального контраста, изображений в поляризованном свете [21]. Максимальное увеличение микроскопа составляло  $\times 1000$ .

Результаты представлены на рис. 2 и в табл. 1.

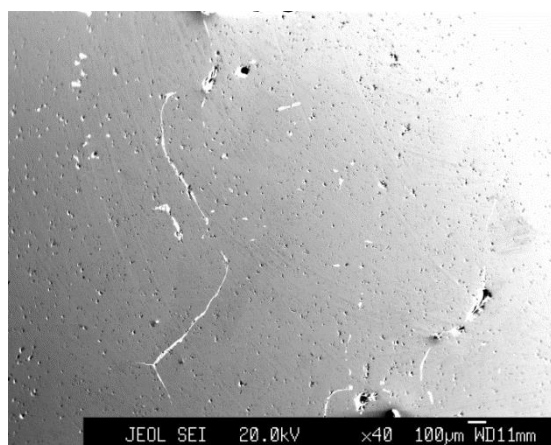
Как видно из представленных на рис. 2 и табл. 1 данных, включение в исследуемом образце представлено интерметаллидами следующего состава:  $\text{AlFeSi}_2$  (с примесью Ca),  $\text{FeSi}_2$  (с примесью Al),  $\text{FeSi}_2\text{Ti}$  (с примесью Zr). Наличие циркония в составе примесного включения можно объяснить его переходом в кремниевый расплав (в незначи-

тельном количестве) из кирпичной футеровки РТП.

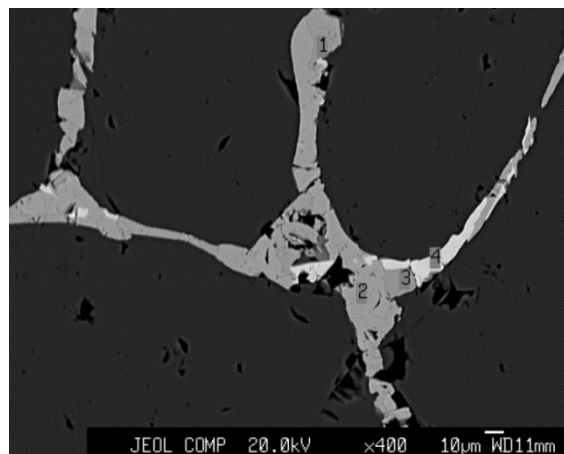
### ТЕРМОДИНАМИКА РЕАКЦИЙ КИСЛОТНОГО РАФИНИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ

Для повышения качества, полученного после окислительного рафинирования, кремния возможно применение кислотной обработки с целью уменьшения содержания примесных элементов [11, 13, 22]. Нами в качестве растворителей были выбраны следующие кислоты:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HF}$ .

Для изучения возможности протекания реакций взаимодействия с кислотами интерметаллических соединений, зафиксированных нами в образцах металлургического кремния, а также соединений, отмеченных ранее другими исследователями ( $\text{AlFeSi}_2$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{FeSi}_2\text{Ti}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{AlFeSi}$ ,  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ ,  $\text{FeAlTiSi}$ ,  $\text{TiSi}_2$ ,  $\text{Ca}_2\text{Si}$  [23, 24]), были рассчитаны изменения энергии Гиббса ( $\Delta G^\circ_{298}$ ).



a



b

Рис. 2. Результаты рентгеноспектрального микроанализа образца кремния после окислительного рафинирования: а – общий вид поверхности (увеличение  $\times 40$ ); б – включение (увеличение  $\times 400$ )

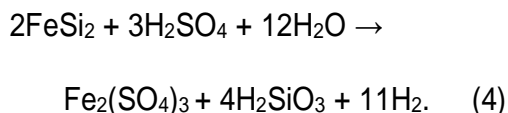
Fig. 2. Results of X-ray spectral microanalysis of a silicon sample after oxidative refining: a – general view of the surface ( $40\times$  magnification); b – inclusion ( $400\times$  magnification)

Таблица 1. Результаты рентгеноспектрального микроанализа образца кремния после окислительного рафинирования

Table 1. Results of X-ray spectral microanalysis of a silicon sample after oxidative refining

Области (см. рис. 2)	Содержание элемента, % масс.						Итого
	Si	Fe	Ti	Ca	Al	Zr	
1	34,263	34,495	–	6,974	24,268	–	100,00
2	52,010	45,088	–	0,000	2,902	–	100,00
3	35,209	34,381	–	7,002	23,407	–	100,00
4	34,408	32,459	25,964	–	1,147	6,022	100,00

Для экспресс-расчета  $\Delta G^{\circ}_{298}$  химических реакций нами была разработана компьютерная программа в редакторе Microsoft Excel<sup>3</sup>. Данные для расчета были приняты из справочных изданий<sup>4,5,6</sup> [25]. Так, например, взаимодействие  $\text{FeSi}_2$  с раствором серной кислоты происходит по реакции (4):



Расчет  $\Delta G^{\circ}_{298}$  по реакции производится следующим образом [26]:

$$\begin{aligned} \Delta G^{\circ}_{298} &= [(-2257,56) + 4 \cdot (-1022,01) + 11 \cdot 0,10] - [2 \cdot (-78,31) + 3 \cdot (-690,14) + 12 \cdot (-228,59)] = -6344,5 + 4970,26 = \\ &= -1374,24 \text{ кДж/моль.} \end{aligned}$$

Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 2.

Рассчитанные значения  $\Delta G^{\circ}_{298}$  реакций взаимодействия примесей с растворами кислот имеют отрицательные значения, что свидетельствует о самопроизвольности протекания данных процессов.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЧИСТКЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Перед гидрометаллургическим рафинированием кремний подвергался дроблению с помощью щековой дробилки ЩД-10 (Россия) и далее измельчался в шаровой мельнице ШМ-1408 (Россия) до крупности частиц -200 мкм. Был проведен анализ гранулометрического состава полученного мелкофракционного кремния на лазерном анализаторе раз-

мера частиц Analyzette 22 NanoTecPlus (FRITSCH, Германия) (рис. 3).

По данным проведенного гранулометрического анализа установлено следующее распределение (выход, в %) частиц по классам крупности (в мкм): 0,72 – +150-200; 4,64 – +100-150; 27,14 – +45-100; 29,80 – +25-45; 23,51 – +12-25; 6,87 – +6-12; 3,48 – +3-6; 2,18 – +1,5-3; 1,66 – -1,5. Как видно из представленных данных, частицы пробы металлургического кремния представлены классом крупности -200 мкм, причем ~80% объема всех частиц составляет классами крупности +12-100 мкм. В качестве реагентов использовались 10%-ые  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ГОСТ 2184-2013. Кислота серная техническая<sup>8</sup>),  $\text{HCl}$  (ГОСТ 3118-77. Реактивы. Кислота соляная<sup>9</sup>),  $\text{HNO}_3$  (ГОСТ 4461-77. Реактивы. Кислота азотная<sup>10</sup>), а также 4%  $\text{HF}$  (ГОСТ 10484-78. Реактивы. Кислота фтористоводородная<sup>11</sup>); приготавливались смеси данных кислот в различных соотношениях.

Для экспериментов по кислотной очистке металлургического кремния отбиралась проба массой 40 г. Далее проводили выщелачивание примесных элементов в термостойком стакане объемом 400 мл с использованием магнитной мешалки марки ПЭ6110 (с частотой вращения 100 об/мин) с автоматическим нагревом пульпы до 60°C. Выщелачивание проводили в течение 60 мин. Параметры выщелачивания были выбраны согласно ранее проведенным исследованиям авторов [14, 27].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения содержания основных примесей в полученном кеке выщелачивания был проведен рентгенофлуоресцентный ана-

<sup>3</sup>Свидетельство № 2022612200, Российская Федерация, Расчет термодинамической вероятности химических реакций при кислотном рафинировании металлургического кремния / Н.В. Немчинова, А.А. Зайцева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». Заявка № 2022611199, заявл. 03.02.2022; опубл. 08.02.2022.

<sup>4</sup>Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчеты в металлургии: справочник. М.: Металлургия, 1993. 304 с.

<sup>5</sup>Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин. СПб.: Иван Федоров, 2003. 240 с.

<sup>6</sup>Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 269 с.

<sup>8</sup>ГОСТ 2184-2013. Кислота серная техническая. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2019.

<sup>9</sup>ГОСТ 3118-77. Реактивы. Кислота соляная. Введ. 22.12.1977. М.: Изд-во стандартов, 1977.

<sup>10</sup>ГОСТ 4461-77. Реактивы. Кислота азотная. Введ. 01.01.1979. М.: Стандартинформ, 2006.

<sup>11</sup>ГОСТ 10484-78. Реактивы. Кислота фтористоводородная. Введ. 01.01.1980. М.: Изд-во стандартов, 1999.



лиз. На рис. 4 приведены спектры РФА некоторых проб кремния после выщелачивания примесей в результате кислотной обработки. Спектры других образцов (при использовании различных комбинаций кислот в качестве рас-

творителя) имеют аналогичный характер.

На рис. 5 приведены результаты РФА в кремнии до и после кислотной обработки смесями различных кислот по содержанию основных примесей (Al, Ca, Ti, Fe).

**Таблица 2.** Результаты расчета  $\Delta G^{\circ}_{298}$  реакций взаимодействия примесей с растворами кислот  
**Table 2.** Calculation results of  $\Delta G^{\circ}_{298}$  interaction reactions of impurities and acid solutions

№	Реакция взаимодействия примесей с растворителем	$\Delta G^{\circ}_{298}$ , кДж/моль
1	$\text{FeSi}_2 + 3\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5,5\text{H}_2$	-712,12
2	$\text{Fe}_2\text{Si} + 6\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = 2\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-491,50
3	$\text{FeSi} + 3\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 3,5\text{H}_2$	-380,69
4	$\text{AlFeSi} + 6\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{AlCl}_3 + \text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-595,03
5	$\text{AlFeSi}_2 + 6\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{AlCl}_3 + \text{FeCl}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1105,49
6	$\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{AlCl}_3 + \text{FeCl}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-1777,10
7	$\text{FeSiTi} + 7\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{TiCl}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5,5\text{H}_2$	-787,48
8	$\text{FeSi}_2\text{Ti} + 7\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{TiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7,5\text{H}_2$	-1117,95
9	$\text{FeAlTiSi} + 10\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{AlCl}_3 + \text{TiCl}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 14\text{H}_2$	-1123,89
10	$\text{TiSi}_2 + 4\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{TiCl}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 4\text{H}_2$	-560,55
11	$\text{CaSi}_2 + 2\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1207,11
12	$\text{Fe}_2\text{Si} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-441,64
13	$2\text{FeSi} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-711,50
14	$2\text{AlFeSi} + 6\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-1844,85
15	$2\text{AlFeSi}_2 + 6\text{H}_2\text{SO}_4 + 12\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 14\text{H}_2$	-2505,77
16	$2\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{H}_2\text{SO}_4 + 12\text{H}_2\text{O} = 3\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 20\text{H}_2$	-4532,29
17	$2\text{FeSiTi} + 7\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-2412,34
18	$2\text{FeSi}_2\text{Ti} + 7\text{H}_2\text{SO}_4 + 12\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 15\text{H}_2$	-3073,26
19	$2\text{FeAlTiSi} + 10\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 14\text{H}_2$	-3425,61
20	$\text{TiSi}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 6\text{H}_2$	-1339,41
21	$\text{CaSi}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-3843,66
22	$2\text{FeSi}_2 + 6\text{HNO}_3 + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1418,06
23	$2\text{FeSi} + 6\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-755,18
24	$\text{AlFeSi} + 6\text{HNO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1023,92
25	$\text{AlFeSi}_2 + 6\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1354,37
26	$\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-2526,95
27	$2\text{FeSiTi} + 14\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1074,94
28	$2\text{FeSi}_2\text{Ti} + 14\text{HNO}_3 + 12\text{H}_2\text{O} = 3\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 15\text{H}_2$	-2072,61
29	$\text{FeAlTiSi} + 10\text{HNO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1123,76
30	$\text{TiSi}_2 + 4\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 6\text{H}_2$	-648,87
31	$\text{Fe}_2\text{Si} + 6\text{HNO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-485,32
32	$\text{CaSi}_2 + 2\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1244,30
33	$2\text{FeSi}_2 + 6\text{HF} + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeF}_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1155,50
34	$\text{Fe}_2\text{Si} + 6\text{HF} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeF}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-222,76
35	$2\text{FeSi} + 6\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeF}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-493,02
36	$\text{AlFeSi}_2 + 6\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{AlF}_3 + \text{FeF}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1233,14
37	$\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{AlF}_3 + \text{FeF}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-2425,79
38	$2\text{FeSiTi} + 14\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{FeF}_3 + 2\text{TiF}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1509,10
39	$2\text{FeSi}_2\text{Ti} + 14\text{HF} + 12\text{H}_2\text{O} = 2\text{FeF}_3 + 2\text{TiF}_4 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 15\text{H}_2$	-2170,02
40	$\text{FeAlTiSi} + 10\text{HF} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeF}_3 + \text{AlF}_3 + \text{TiF}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1350,88
41	$\text{TiSi}_2 + 4\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{TiF}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 6\text{H}_2$	-997,23
42	$\text{AlFeSi} + 6\text{HF} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AlF}_3 + \text{FeF}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-902,68
43	$\text{CaSi}_2 + 2\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{CaF}_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1266,01

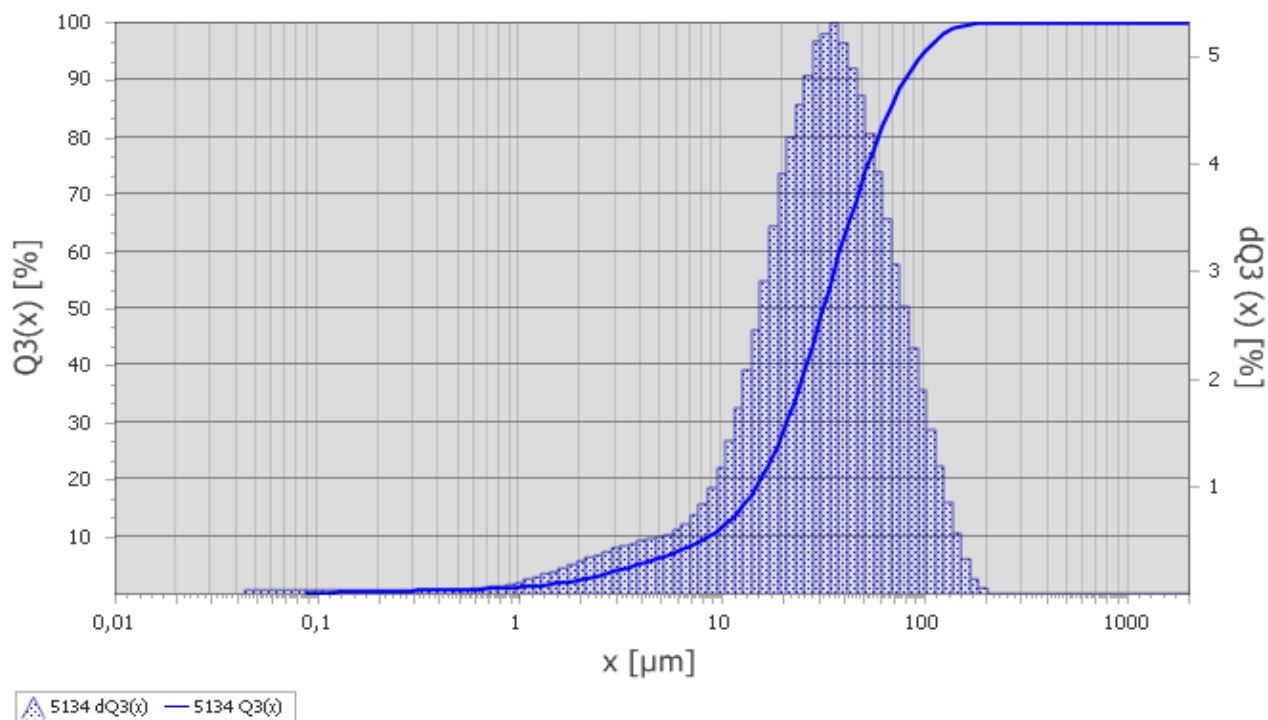
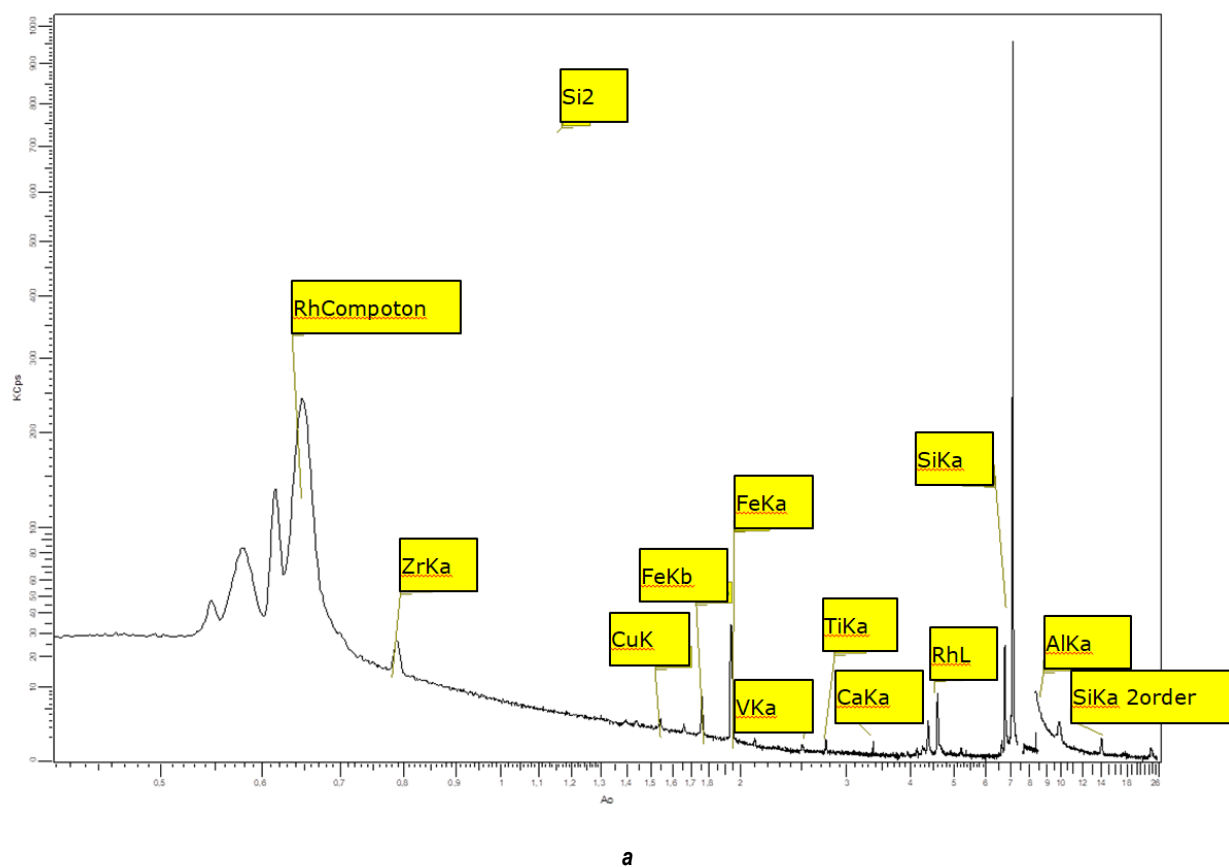


Рис. 3. Распределение частиц пробы металлургического кремния (после окислительного рафинирования) по классам крупности  
 Fig. 3. Distribution of metallurgical silicon sample particles (after oxidative refining) by size classes



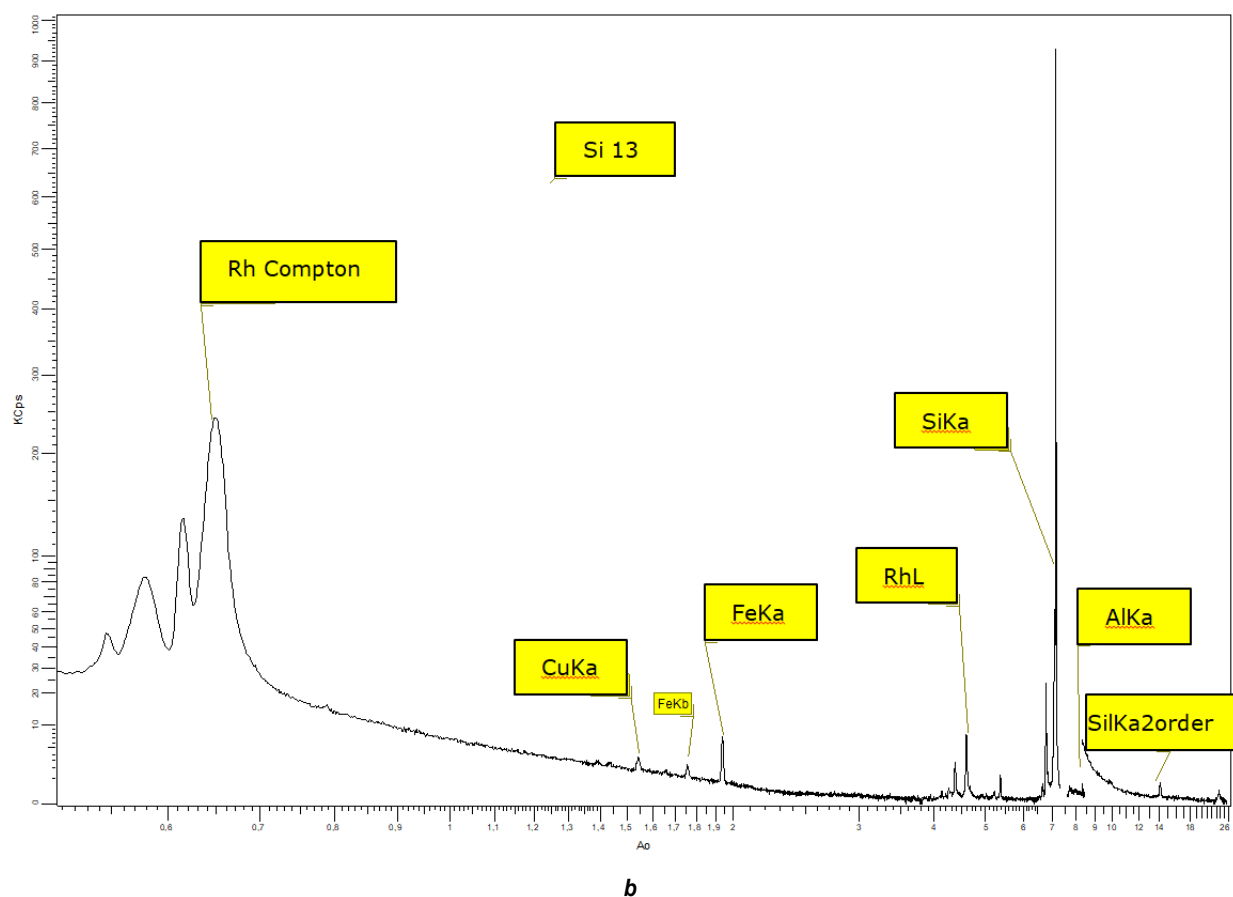


Рис. 4. Спектры рентгенофлуоресцентного анализа проб кремния (кека) после кислотной очистки с использованием в качестве растворителя: а – смеси  $H_2SO_4$  и  $HCl$  в соотношении 1:3, б – смеси  $H_2SO_4$  и  $HF$  в соотношении 1:1

Fig. 4. Spectra of X-ray fluorescence analysis of silicon samples (cake) after acid treatment using the following solvents: а – 1:3 mixture of  $H_2SO_4$  and  $HCl$ , б – 1:1 mixture of  $H_2SO_4$  and  $HF$

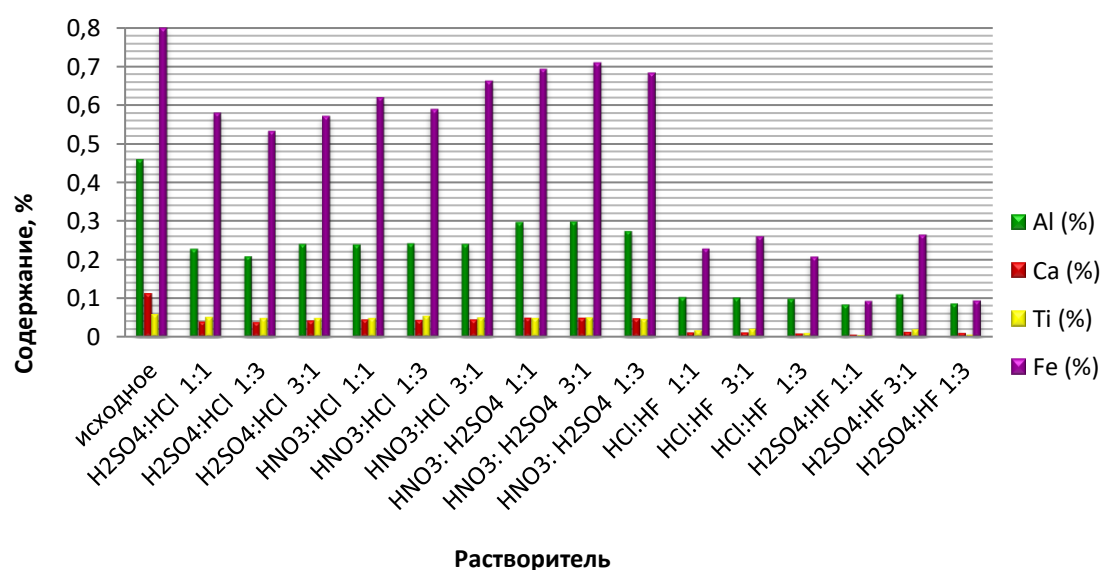


Рис. 5. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа по содержанию основных примесных элементов в металлургическом кремнии до и после гидрометаллургического рафинирования смесями кислот

Fig. 5. Results of the X-ray fluorescence analysis of the content of main impurity elements in metallurgical silicon before and after hydrometallurgical refining with acid mixtures



**Таблица 3.** Результаты рентгенофлуоресцентного анализа кека выщелачивания после кислотной обработки  
**Table 3.** Results of X-ray fluorescence analysis of leaching cake after acid treatment

Смесь растворителей	Суммарное содержание примесей, % масс.	Содержание Si (по разнице), % масс.	Степень очистки, %
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HCl = 1:1	0,957	99,043	36,60
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HCl = 1:3	0,884	99,116	41,48
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HCl = 3:1	0,959	99,041	36,50
HNO <sub>3</sub> :HCl = 1:1	1,009	98,991	33,20
HNO <sub>3</sub> :HCl = 1:3	0,987	99,013	34,63
HNO <sub>3</sub> :HCl = 3:1	1,054	98,946	30,20
HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 1:1	1,142	98,858	24,39
HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 3:1	1,166	98,834	22,77
HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 1:3	1,109	98,891	26,58
HCl:HF = 1:1	0,383	99,617	74,65
HCl:HF = 3:1	0,422	99,578	72,06
HCl:HF = 1:3	0,342	99,658	77,34
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF = 1:1	0,199	99,801	86,85
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF = 3:1	0,438	99,562	70,99
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF = 1:3	0,207	99,793	86,28

По результатам РФА в образцах кека выщелачивания с использованием в качестве растворителя смеси плавиковой и серной кислот в соотношении 1:1 зафиксировано наименьшее содержание примесных элементов, % масс., соответственно: Al – 0,083, Ca – 0,006, Ti – 0,00459, Fe – 0,093. Однако ввиду высокого класса опасности плавиковой кислоты использование ее в промышленном масштабе сильно усложняется. Достаточно хороший результат по очистке кремния от четырех основных примесей был достигнут при использовании в качестве растворителя смеси серной и соляной кислот в соотношении 1:3. При использовании такой комбинации растворителей содержание примесных элементов в исследуемой пробе кремния составило, % масс., соответственно: Al – 0,208, Ca – 0,038, Ti – 0,049, Fe – 0,533.

Для более полной оценки эффективности предлагаемой методики был произведен расчет степени очистки металлургического кремния от примесей. Результаты представлены в табл. 3.

Высокие показатели степени очистки металлургического кремния от алюминия, кальция, железа и титана (более 70%) при его гидрометаллургическом рафинировании были зафиксированы при использовании в качестве реагента смеси плавиковой и серной

кислот, а также смеси плавиковой и соляной кислот. Использование в качестве растворителя смеси серной и соляной кислот (при соотношении 1:3 и 1:1) позволило достигнуть степени очистки металлургического кремния от примесей (Al, Fe, Ti, Ca, V, Cr, Mn, Cu, P, Ba, Ni, Zn) 41,48% и 36,60%, соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлургический кремний, получаемый выплавкой в РТП, для получения высококачественных марок, востребованных в различных отраслях промышленности, подвергается на производстве окислительному рафинированию продувкой расплава воздухом.

Методами РФА и РСМА был изучен химический состав полученных образцов металлургического кремния (после окислительного рафинирования) АО «Кремний» компании «РУСАЛ». Методом РФА было определено содержание 12 примесных элементов; содержание кремния в исследуемых образцах (по разнице) составило 98,6939% масс. Методом РСМА нами были зафиксированы следующие интерметаллиды: AlFeSi<sub>2</sub> (с примесью Ca), FeSi<sub>2</sub> (с примесью Al), FeSi<sub>2</sub>Ti (с примесью Zr). С целью уменьшения содержания примесей в металлургическом кремнии проводилась кислотная обработка образцов измельченного кремния. В качестве

растворителей использовались смеси неорганических кислот ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HNO}_3$ ) в различных соотношениях. Для оценки возможности применения выбранных реагентов была изучена термодинамика взаимодействия примесных элементов с данными кислотами. Полученные значения  $\Delta G^\circ_{298}$  имели отрицательные значения, что свидетельствует о самопроизвольности протекания данных реакций.

Для определения химического состава полученного кека выщелачивания был проведен РФА. По результатам анализа в исследуемых образцах с использованием в ка-

честве растворителя смеси плавиковой и серной кислоты в соотношении 1:1 зафиксировано наименьшее содержание примесных элементов, % масс., соответственно: Al – 0,083, Ca – 0,006, Ti – 0,00459, Fe – 0,093. Степень очистки кремния при использовании данной смеси кислот составила 86,85%. Достаточно хороший результат по очистке кремния примесей (12 элементов) был достигнут при использовании в качестве растворителя смеси серной и соляной кислот в соотношении 1:3. При использовании такой комбинации кислот степень очистки металлургического кремния составила 41,48%.

### Список источников

1. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 с.
2. Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. Production of high silicon alloys. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.
3. Miguez J.M., Perez A., Souto A., Dieguez J., Ordas R. New and future applications of different silicon qualities: how could we produce them // Silicon for the Chemical and Solar Industry XIII (Kristiansand, 13–16 June 2016). Kristiansand, 2016. P. 15–22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21782.34883>.
4. Sun Kaidi, Wang Tongtong, Gong Weibo, Lu Wenyang, He Xin, Eddings E.G., et al. Synthesis and potential applications of silicon carbide nanomaterials / nanocomposites // Ceramics International. 2022. Vol. 48. Iss. 22. P. 32571–32587. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.204>.
5. Henstock J.R., Canham L.T., Anderson S.I. Silicon: the evolution of its use in biomaterials // Acta Biomaterialia. 2015. Vol. 11. P. 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.025>.
6. Колобов Г.А., Критская Т.В. Рафинирование кремния // Металургія (Наукові праці ЗДІА). 2009. № 20. С. 77–83.
7. Елисеев И.А., Непомнящих А.И. Разработка промышленной технологии удаления бора при рафинировании кремния // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. № 1. С. 95–101.
8. Jiang Dachuan, Tan Yi, Shi Shuang, Dong Wei, Gu Zheng, Zou Ruixun. Removal of phosphorus in molten silicon by electron beam candle melting // Materials Letters. 2012. Vol. 78. P. 4–7. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.031>.
9. Wei Kuixian, Zheng Damin, Ma Wenhui, Yang Bin, Dai Yongnian. Study on Al removal from MG-Si by vacuum refining // Silicon. 2015. Vol. 7. Iss. 3. P. 269–274. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9228-9>.
10. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Zelinskaya E.V. Acidic-ultrasonic refining of silicon by carbothermic technology // Metallurgist. 2015. Vol. 59. Iss. 3. P. 258–263. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0094-5>.
11. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 201. P. 105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
12. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Хоанг В.В., Будько Т.В. О способах рафинирования кремния // Молодежный вестник ИрГТУ. 2022. Т. 12. № 4. С. 924–934.
13. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 201. P. 105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
14. Попов С.И. Металлургия кремния в трехфазных руднотермических печах. Иркутск: ЗАО «Кремний», 2004. 237 с.
15. Bjørnstad E.L., Jung In-Ho, Van Ende M.A., Gabriella T. Oxidative refining of metallurgical grade silicon: lab-scale measurements on the overarching refining behavior of Ca and Al // Metallurgical and Materials Transactions B. 2022. Vol. 53. P. 1103–1111. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02425-5>.
16. Næss M.K., Tranell G., Olsen J.E., Nils E.K., Kai T. Mechanisms and kinetics of liquid silicon oxidation during industrial refining // Oxidation of Metals. 2012. Vol. 78. P. 239–251. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13947.52005>.
17. Johnston M.D., Barati M. Distribution of impurity elements in slag–silicon equilibria for oxidative refining of metallurgical silicon for solar cell applications // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2010. Vol. 94. Iss. 12. P. 2085–2090. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.06.025>.
18. Тютрин А.А., Фереферова Т.Т. Применение современных методов анализа для исследования шлаков кремниевоего производства // Вестник Иркутского технического университета. 2016. Т. 20. № 9. С. 139–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>.

19. Чупарина Е.В., Смагунова А.Н., Елисеева Л.А. Исследование процессов образования фона в длинноволновой области рентгеновского спектра // Журнал аналитической химии. 2015. Т. 70. № 8. С. 828–834.
20. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 350 p.
21. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 31–39. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>.
22. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бузикова Т.А. Исследование шлаков пирометаллургии кремния // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 4. С. 457–467.
23. Немчинова Н.В. Исследование химического состава металлургического кремния // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2012. № 1. С. 129–134.
24. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 969. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>.
25. Barin I. Thermochemical data of pure substances. 3d Edition. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995. 1683 p. <https://doi.org/10.1002/9783527619825>.
26. Зайцева А.А., Зырянов Н.В. Исследование возможности применения различных кислот при гидрометаллургическом рафинировании металлургического кремния // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 20–21 апреля 2022 г.). Иркутск, 2022. С. 88–91.
27. Тамендаров М.Ф., Чумиков Г.Н., Токмолдин С.Ж. Исследование фосфорных шлаков для получения кремния солнечного качества // Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья: матер. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию выдающегося ученого, академика АН КазССР, лауреата государственной премии СССР Букетова Евнея Арстановича (г. Караганда, 25–26 июня 2015 г.). Караганда, 2015. Караганда, 2015. С. 115–120.

## References

1. Gasik M.I., Gasik M.M. *Electrothermics of silicon*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011. 487 p. (in Russ.).
2. Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. *Production of high silicon alloys*. Trondheim: Tapir; 1998. 363 p.
3. Miguez J.M., Perez A., Souto A., Dieguez J., Ordas R. New and future applications of different silicon qualities: how could we produce them. In: *Silicon for the Chemical and Solar Industry XIII*. 13–16 June 2016, Kristiansand; 2016, 15–22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21782.34883>.
4. Sun Kaidi, Wang Tongtong, Gong Weibo, Lu Wenyang, He Xin, Eddings E.G., et al. Synthesis and potential applications of silicon carbide nanomaterials / nanocomposites. *Ceramics International*. 2022;48(22):32571–32587. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.204>.
5. Henstock J.R., Canham L.T., Anderson S.I. Silicon: the evolution of its use in biomaterials. *Acta Biomaterialia*. 2015;11:17–26. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.025>.
6. Kolobov G.A., Kritskaya T.V. Silicon refining. *Metallurgy (Scientific Work ZDIA)*. 2009;20:77–83. (In Russ.).
7. Eliseev I.A., Nepomnyaschikh A.I. Development of industrial technology of boron removal during the refining of silicon. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2013;1:95–101. (In Russ.).
8. Jiang Dachuan, Tan Yi, Shi Shuang, Dong Wei, Gu Zheng, Zou Ruixun. Removal of phosphorus in molten silicon by electron beam candle melting. *Materials Letters*. 2012;78:4–7. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.031>.
9. Wei Kuixian, Zheng Damin, Ma Wenhui, Yang Bin, Dai Yongnian. Study on Al removal from MG-Si by vacuum refining. *Silicon*. 2015;7(3):269–274. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9228-9>.
10. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Zelinskaya E.V. Acidic-ultrasonic refining of silicon by carbothermic technology. *Metallurgist*. 2015;59(3):258–263. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0094-5>.
11. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon. *Hydrometallurgy*. 2021;201:105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
12. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A., Budko T.V. On the silicon refining methods. *Young Researchers' Journal of ISTU*. 2022;12(4):924–934.
13. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon. *Hydrometallurgy*. 2021;201:105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
14. Popov S.I. *Silicon metallurgy in three-phase ore-thermal furnaces*. Irkutsk: CJSC "Silicon"; 2004, 237 p. (In Russ.).
15. Bjørnstad E.L., Jung In-Ho, Van Ende M.A., Gabriella T. Oxidative refining of metallurgical grade silicon: lab-scale measurements on the overarching refining behavior of Ca and Al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022;53:1103–1111. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02425-5>.

16. Næss M.K., Tranell G., Olsen J.E., Nils E.K., Kai T. Mechanisms and kinetics of liquid silicon oxidation during industrial refining. *Oxidation of Metals*. 2012;78:239-251. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13947.52005>.
17. Johnston M.D., Barati M. Distribution of impurity elements in slag–silicon equilibria for oxidative refining of metallurgical silicon for solar cell applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010;94(12):2085-2090. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.06.025>.
18. Tyutrin A.A., Fereferova T.T. Using modern analysis methods to study silicon production slags. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):139-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>.
19. Chuparina E.V., Smagunova A.N., Eliseeva L.A. Study of the processes of background formation in the long-wavelength region of X-RAY spectrum. *Zhurnal analiticheskoy himii = Journal of Analytical Chemistry*. 2015;70(8):828-834. (In Russ.).
20. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis*. Cambridge: Cambridge University Press; 1997, 350 p.
21. Nemchinova N.V., Buzikova T.A. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):31-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>.
22. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Buzikova T.A. Investigation of pyrometallurgical silicon slags. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2015;8(4):457-467.
23. Nemchinova N.V. Investigation of metallurgical silicon chemical composition. *Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2012;1:129-134.
24. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;969:012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>.
25. Barin I. *Thermochemical data of pure substances. 3d Edition*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH; 1995, 1683 p. <https://doi.org/10.1002/9783527619825>.
26. Zaitseva A.A., Zyryanov N.V. Studying the possibility of using various acids in hydrometallurgical refining of metallurgical silicon. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnyh i mineral'nyh resursov»: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Development prospects of processing technology for hydrocarbon and mineral resources»: materials of the 12<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference*. 20–21 April 2022, Irkutsk. Irkutsk; 2022, p. 88-91.
27. Tamendarov M.F., Chumakov G.N., Tokmoldin S.Zh. Investigation of phosphoric slags for obtaining solar-quality silicon. In: *Himiya i metallurgiya kompleksnoj pererabotki mineral'nogo syr'ya: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu vydayushchegosya uchenogo, akademika AN KazSSR, laureata gosudarstvennoj premii SSSR Buketova Evneya Arstanovicha = Chemistry and metallurgy of complex processing of mineral raw materials: materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the outstanding scientist, academician of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, laureate of the USSR State Prize Buketov Evney Arstanovich*. 25–26 June 2015, Karaganda, Kazakhstan; 2015, p. 115-120. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Немчинова Нина Владимировна,**

д.т.н., профессор,  
заведующая кафедрой металлургии цветных  
металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
✉ [ninavn@yandex.ru](mailto:ninavn@yandex.ru)  
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

**Зайцева Анна Александровна,**

аспирант,  
ассистент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
✉ [vo1odkinaa@yandex.ru](mailto:vo1odkinaa@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0002-1107-7268>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nina V. Nemchinova,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ [ninavn@yandex.ru](mailto:ninavn@yandex.ru)  
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

**Anna A. Zaitseva,**

Postgraduate Student,  
Assistant Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ [vo1odkinaa@yandex.ru](mailto:vo1odkinaa@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0002-1107-7268>

#### **Вклад авторов**

Немчинова Н.В. осуществляла научное руководство исследованиями, выполнила подбор списка литературных источников по тематике исследования и провела общее редактирование текста рукописи.  
Зайцева А.А. провела эксперименты, термодинамические расчеты и обобщила полученные результаты.

#### **Конфликт интересов**

Немчинова Н.В. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 19.05.2023; принята к публикации 14.06.2023.

#### **Contribution of the authors**

Nemchinova N.V. supervised the research, selected the sources and compiled the list of references on the subject of the research, edited the text of the article.  
Zaitseva A.A. conducted experiments, performed thermodynamic calculations and summarized the results.

#### **Conflict of interests**

Nina V. Nemchinova has been a member of the editorial board of the iPolytech Journal since 2000, but she did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was reviewed following the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Information about the article**

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 19.05.2023; accepted for publication 14.06.2023.