



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-419>

УДК 622.765:661.185.223.5

**Применение полистиролсульфонатов для депрессии магнийсодержащих силикатов при флотации медно-никелевых руд**

А. А. Лавриненко¹  , Г. Ю. Гольберг¹  , И. Н. Кузнецова¹  ,
О. Г. Лусинян¹  , В. А. Тверской²  

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
г. Москва, Российская Федерация

² МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий
имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

 lavrin_a@mail.ru

Аннотация

Весьма актуальной является задача повышения эффективности депрессии магнийсодержащих силикатов (МС) при флотации медно-никелевых руд для снижения содержания в концентрате магния, вызывающего существенное увеличение энергозатрат на пирометаллургическую переработку концентрата. Перспективным направлением представляется применение полимерных реагентов, содержащих сульфогруппы. Однако до настоящего времени изучено действие только лигносульфонатов. Остаётся неясным вопрос об эффективности депрессирующего действия других полимерных сульфонов, включая полистиролсульфонаты (ПСС), и их сравнении с полисахаридами, применяемыми в промышленных условиях. Цель настоящей работы: изучение депрессирующего действия ПСС на эффективность коллективной флотации медно-никелевой руды. Задачи исследований: экспериментальное сравнение эффективности депрессирующего действия ПСС и реагента из класса полисахаридов на МС; определение режимов применения ПСС, обеспечивающих снижение содержания магния в пенном продукте без существенного снижения извлечения меди и никеля в коллективный концентрат; установление влияния молекулярной массы и способа получения образцов ПСС на эффективность их депрессирующего действия. Выполнены лабораторные экспериментальные исследования по коллективной флотации медно-никелевой руды Кольского полуострова, содержащей 15,7 % магния, 0,44 % никеля и 0,25 % меди. Изучено влияние на флотацию полимерных анионоактивных реагентов: ПСС со значениями молекулярной массы от 89 000 до 208 000 г/моль; для сравнения применяли полианионную целлюлозу (ПАЦ-Н). Для повышения эффективности действия этих реагентов предварительно добавляли хлорид магния. Установлено, что наименьшее содержание магния в концентрате достигается применением композиции хлорида магния и ПСС и составляет 14,7 % против 16,7 % без депрессоров. Показано, что ПСС обеспечивает более высокое извлечение меди (на 7 %) и никеля (на 8 %) в концентрат, чем в случае применения ПАЦ-Н, так как ПСС, в отличие от полисахаридов, не образует хелатные комплексы с указанными металлами. Также показано, что для образцов ПСС значение молекулярной массы в указанных пределах практически не влияет на показатели флотации исследованной руды. Получены новые научные знания о влиянии расхода и свойств ПСС на показатели флотации и показано, что практическое применение этого класса реагентов целесообразно при флотации медно-никелевых руд с высоким содержанием магния в тех случаях, когда требуется достигнуть максимально возможного снижения содержания этого элемента в концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля.

Ключевые слова

флотация, медно-никелевая руда, депрессия магнийсодержащих силикатов, полистиролсульфонаты, катионы магния, полианионная целлюлоза

Для цитирования

Lavrinenko A. A., Golberg G. Yu., Kuznetsova I. N., Lusinyan O. G., Tverskoy V. A. Application of Polystyrene sulfonates for the depression of magnesium-containing silicates in copper-nickel ore flotation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(3):280–288. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-419>



BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Application of polystyrene sulfonates for the depression of magnesium-containing silicates in copper-nickel ore flotation

A. A. Lavrinenko¹  , G. Yu. Golberg¹  , I. N. Kuznetsova¹  ,
O. G. Lusinyan¹  , V. A. Tverskoy²  

¹ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² MIREA – Russian Technological University, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies,
Moscow, Russian Federation

 lavrin_a@mail.ru

Abstract

It is very urgent to increase the efficiency of depressing magnesium-containing silicates (MS) in the course of the flotation of copper-nickel ores to reduce the content of magnesium in the concentrate, which causes a significant increase in energy consumption in pyrometallurgical processing of the concentrate. The use of polymer reagents containing sulfo groups seems to be a promising area of research. However, only lignosulfonates have been studied so far in this field. The question of the effectiveness of the depressing effect of other polymer sulfonates including polystyrene sulfonates (PSS), and their comparison with polysaccharides used in industrial conditions remains unclear. The purpose of this work is to study the depressing effect of PSS on the performance of bulk flotation of copper-nickel ores. Research objectives: to experimentally compare the effectiveness of the depressing effect of PSS and a reagent from the polysaccharide class on MS; to determine the modes of PSS use to reduce the magnesium content in the concentrate without significantly reducing the recovery of copper and nickel into the bulk concentrate; to establish the effect of molecular weight and the method of obtaining PSS samples on the effectiveness of their depressing effect. Laboratory experimental studies were carried out on the bulk flotation of copper-nickel ores from the Kola Peninsula, containing 15.7% of magnesium, 0.44% of nickel and 0.25% of copper. The effect of the following polymer anionic reagents on the flotation was studied: PSSs with molecular weight ranging from 89,000 to 208,000 g/mol; polyanionic cellulose (PAC-N) was used for comparison. To increase the effectiveness of these reagents, magnesium chloride was previously added. It was found that the lowest magnesium content in the concentrate of 14.7% was achieved using a composition of magnesium chloride and PSS against 16.7% without the depressants. It was shown that PSS provides a higher recovery of copper (by 7%) and nickel (by 8%) into the concentrate than when using PAC-N, since PSS, unlike polysaccharides, does not form chelate complexes with these metals. It was also shown that for PSS samples, the molecular weight within these limits has virtually no effect on the studied ore flotation performance. New scientific knowledge has been obtained about the effect of the consumption and properties of PSS on the flotation performance. It has been shown that the practical use of this class of reagents is advisable for the flotation of copper-nickel ores with a high magnesium content in cases where it is necessary to achieve the maximum possible decreasing the content of this element in the concentrate without significantly reducing the recovery of copper and nickel.

Keywords

flotation, copper-nickel ore, depression of magnesium-containing silicates, polystyrene sulfonates, magnesium cations, polyanionic cellulose

For citation

Lavrinenko A. A., Golberg G. Yu., Kuznetsova I. N., Lusinyan O. G., Tverskoy V. A. Application of Polystyrene sulfonates for the depression of magnesium-containing silicates in copper-nickel ore flotation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(3):280–288. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-419>

Введение

Современный этап развития горнорудной промышленности характеризуется вовлечением в переработку сравнительно бедных медно-никелевых руд [1–4]. Существенной проблемой при флотации таких руд является наличие в их составе магнийсодержащих силикатных минералов (МС), в том числе талька, серпентина и ряда других [5, 6]. В результате извлечения указанных силикатов в концентрат повышается содержание в нём вредных примесей, осо-

бенно магния, что, в свою очередь, оказывает неблагоприятное воздействие на последующие процессы пирометаллургической переработки концентрата. Так, согласно [7] влияние МС на переработку сульфидного никелевого концентрата заключается в увеличении энергозатрат, повышении износа оборудования и возрастании количества диоксида серы, выбрасываемого в атмосферу. Это обуславливает актуальность проблемы депрессии МС в процессах флотации медно-никелевых руд.



Снижение извлечения МС в концентрат флотации достигается применением реагентов-депрессоров, изменяющих поверхностные свойства этих минералов за счёт уменьшения краевого угла смачивания и (или) увеличения отрицательного заряда поверхности. В результате между частицей МС и пузырьком воздуха создается потенциальный барьер, препятствующий образованию флотационного комплекса и извлечению его в пенный продукт.

В настоящее время разработаны различные способы депрессии МС, главным образом талька и серпентина. Первый характеризуется природной гидрофобностью, обусловленной особенностями кристаллической структуры: на базальной поверхности, составляющей порядка 90 % от общей поверхности этого минерала, преобладают слабополярные связи Si–O [8]. Поэтому краевой угол смачивания сравнительно высокий – от 60 до 90° [9, 10]. Серпентин, в отличие от талька, более гидрофильный, но при этом заряд его поверхности в кислой, нейтральной и щелочной средах (вплоть до значений pH 11–12) – положительный [11]. В результате взаимного притяжения отрицательно заряженных частиц сульфидов и положительно заряженных частиц серпентина последние извлекаются в концентрат флотации. В связи с этим для депрессии талька и серпентина применяют различные методы.

В качестве депрессоров талька получили распространение полисахариды, в том числе карбоксиметилированные крахмалы и целлюлозы (соответственно КМК и КМЦ) [12, 13]. Они характеризуются сильным депрессирующим действием по отношению не только к силикатам, но и к сульфидным минералам [14], то есть низкой селективностью. Исследования, выполненные в ИПКОН РАН, показали, что образец КМЦ отечественного производства, выпускаемый под маркой ПАЦ-Н (полианионная целлюлоза низкомолекулярная), обладает более высокой депрессирующей способностью по отношению к МС по сравнению с зарубежными образцами реагентов того же класса [15]. Известно, что эффективность КМЦ повышается при совместном действии с жидким стеклом как в подкисленной [16], так и в нейтральной форме [17]. В работах [18, 19] показана возможность эффективной депрессии талька лигносульфонатами с предварительным добавлением катионов кальция. Механизм депрессии в этом случае заключается в снижении гидрофобности талька под действием сильных анионоактивных сульфонатных групп. При этом катионы кальция способствуют увеличению адсорбционной способности талька по отношению к лигносульфонатам. Отмечается, что величина адсорбции лигносульфоната на халькопирите меньше по сравнению с тальком; это дает основание для предположения о селективности депрессирующего действия на тальк полимерных реагентов, содержащих сульфогруппы. В отечественной и зарубежной литературе до настоящего времени не изучено влияние на флотацию медно-никелевых руд других полимерных сульфонов.

Результаты мономинеральной флотации талька показали депрессирующее действие полистиролсуль-

фонатов (ПСС) натрия, несколько более слабое по сравнению с КМЦ и возрастающее в случае предварительного добавления катионов магния или алюминия [20].

Для депрессии серпентина при флотации медно-никелевых руд применяют, в частности, жидкое стекло [21]. Его действие заключается главным образом в нейтрализации положительного поверхностного заряда этого минерала силикат-анионами. Известно также о применении оксида графена, способного селективно агрегировать серпентин [7, 22], органических фосфатов, в частности, фитата натрия [6], об обработке кислотами [23].

Анализ литературы позволил установить следующее:

- современные методы депрессии МС с применением полисахаридов, жидкого стекла и других реагентов позволяют в ряде случаев эффективно снижать содержание магния в пенном продукте, но при этом уменьшается, и в ряде случаев существенно, извлечение меди и никеля в коллективный концентрат флотации за счёт депрессии сульфидов этих металлов;
- до настоящего времени не проведено сравнение эффективности депрессирующего действия полимерных сульфонов и полисахаридов;
- влияние ПСС на мономинеральную флотацию талька изучено, но не ясно, какое влияние оказывает ПСС на показатели флотации содержащей МС медно-никелевой руды, в том числе на выход концентрата, содержание в нем магния, на извлечение меди и никеля.

Цель настоящей работы: изучение депрессирующего действия полистиролсульфонатов на эффективность коллективной флотации медно-никелевой руды.

Задачи исследований:

- экспериментальное сравнение эффективности депрессирующего действия ПСС и реагента из класса полисахаридов на МС;
- определение режимов применения ПСС, обеспечивающих снижение содержания магния в пенном продукте без существенного снижения извлечения меди и никеля в коллективный концентрат;
- установление влияния молекулярной массы и способа получения образцов ПСС на эффективность их депрессирующего действия.

Для выполнения поставленной цели предусматривалось проведение экспериментальных исследований по флотации медно-никелевой руды с композициями реагентов, обеспечивающих наименьшее содержание магния в концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля.

Методика проведения экспериментов

Исследования проводили с пробой медно-никелевой руды Кольского полуострова. Элементный состав руды по данным рентгенофлуоресцентного анализа: Si – 17,2, Mg – 15,8, Fe – 12,9, Al – 2,5, Ca – 2,0, S – 1,13, Ni – 0,44, Cu – 0,25, Cr – 0,20 %. Рентгенофазовый анализ выявил в составе руды следующие минералы: антитигрит, хлорит, амфибол, оливин, минералы группы шпинели, пентландит, виоларит, пирротин, халькопирит, халькофиллит и др.



Опыты были выполнены на лабораторной флотационной машине с объёмом камеры 150 см³ по схеме, предусматривающей последовательное проведение основной и контрольной флотации исходной пробы руды с раздельной подачей реагентов и соответствующей агитацией. Готовили пробу водной суспензии исходной руды: масса навески – 45 г, значение pH = 9. После перемешивания в течение 60 с осуществляли последовательную подачу реагентов в следующем порядке: депрессор, собиратели и пенообразователь. Кондиционирование пульпы с каждым реагентом выполняли в течение 60 с. Отбор пенного продукта осуществляли каждые 15 с. По истечении 300 с основной флотации осуществляли контрольную флотацию камерного продукта, добавляя последовательно вышеуказанные реагенты в количестве 40 % от расхода для основной флотации. Время контрольной флотации составляло 180 с. Определяли массу объединённого концентрата и хвостов. Содержание в них меди, никеля, магния и кремния определяли рентгенофлуоресцентным методом. Исследования проводили с параллельными опытами. Статистический анализ показал, что расхождение результатов составило примерно ± 0,8 % (отн.).

Эффективность депрессирующего действия исследованных реагентов определяли по выходу концентрата γ , извлечению меди ε_{Cu} и никеля ε_{Ni} в концентрат; содержанию в концентрате этих металлов (соответственно β_{Cu} и β_{Ni}), а также магния β_{Mg} ; критерию Ханкока–Луйкена (ХЛ), учитывающего значения ε , γ , а также содержание меди и никеля в исходной руде α :

$$\text{ХЛ} = \frac{\varepsilon - \gamma}{100 - \alpha}. \quad (1)$$

В качестве полимерных депрессоров МС применяли лабораторные образцы ПСС натрия линейного строения, ранее не применявшиеся при флотации руд. Свойства исследованных образцов ПСС представлены

в табл. 1. Для сравнения с ними в качестве полимерного депрессора применяли карбоксиметилированную целлюлозу производства ЗАО «Полицелл» ПАЦ-Н со средневязкостной молекулярной массой порядка 116 000 г/моль и степенью замещения 90 %.

В качестве собирателей применяли бутиловый ксантогенат калия (БКК) и дибутилдитиофосфат (БТФ). Для повышения эффективности депрессирующего действия полимерных реагентов применяли MgCl_2 , так как катион Mg^{2+} согласно [20] способствует депрессии талька с применением ПСС.

Результаты и их обсуждение

При флотации руды без депрессоров, с применением БКК и БТФ наибольшие значения извлечения меди и никеля были достигнуты при расходах БКК – 112 г/т, БТФ – 84 г/т и составили соответственно 89,6 и 85,5 %. Эту композицию реагентов применяли в дальнейших опытах.

Депрессирующее действие полистиролсульфонатов на МС изучали на примере действия Л-50 в сравнении с ПАЦ-Н (рис. 1).

Таблица 1

Свойства исследованных полистиролсульфонатов

Условное обозначение реагента	Средневязкостная молекулярная масса (ММ), г/моль	Регулятор роста цепи; концентрация, моль/л
Л-50	97 000	Изопропанол; 0,3
Л-51	89 000	Изопропанол; 0,9
Л-54	89 000	Глицин, 0,9
Л-55	96 000	Глицин, 0,9
Л-5	93 000	Триметиламин; 0,008
Л-6	208 000	Триметиламин; 0,041
Л-7	176 000	Триметиламин; 0,082

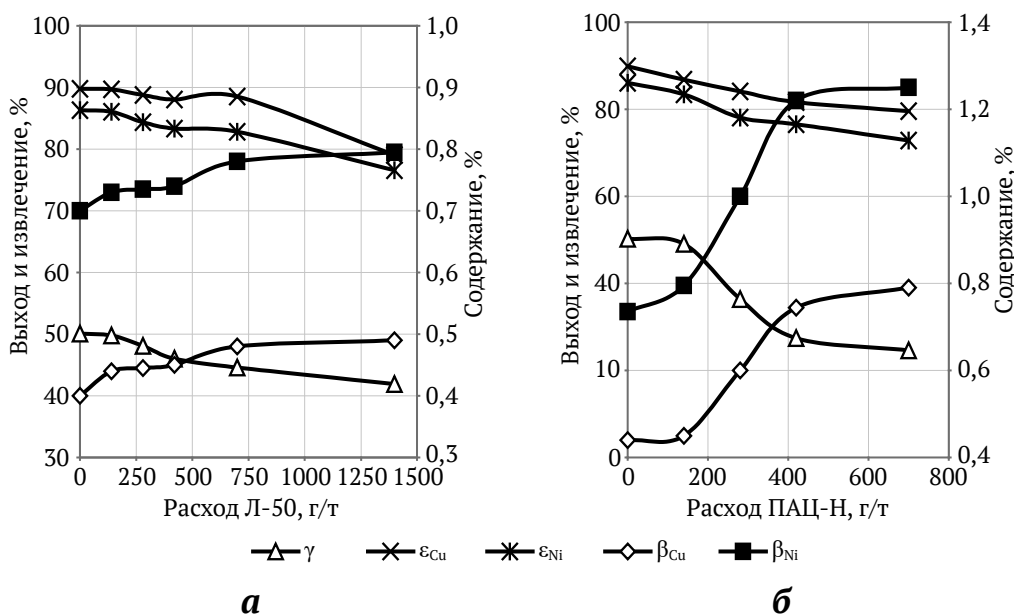


Рис. 1. Влияние расхода депрессоров на флотацию руд: а – Л-50; б – ПАЦ-Н



На рис. 1, а можно видеть, что оптимальный расход депрессора Л-50 – 700 г/т. При этом расходе выход концентрата снижается с 49,8 до 44,6 %. При этом извлечение меди падает с 89,7 до 88,5 %, никеля – с 86,1 до 82,8 %. Дальнейшее повышение расхода депрессора приводит к значительному снижению извлечения металлов в концентрат. Так, при расходе Л-50 1400 г/т извлечение меди в концентрат составило 79 %, никеля – 76,6 %.

Из данных, представленных на рис. 1, б, следует, что эффективные результаты получены при расходе ПАЦ-Н 420 г/т. При таком режиме флотации извлечение меди составило 81,7 %, никеля 76,6 % при повышении содержания в концентрате: меди с 0,4 до 0,74 %, никеля – с 0,7 до 1,22 %.

Анализ эффективности обогащения при использовании различных депрессоров в соответствии с критерием Ханкока–Луйкена показал (рис. 2), что максимальное значение ХЛ как по меди, так и по никелю достигается при расходах Л-50 и ПАЦ-Н соответственно 700 и 420 г/т.

Таким образом, оптимальными расходами депрессоров приняты значения для Л-50 – 700 г/т и для ПАЦ-Н – 420 г/т, соответствующие относительно невысоким потерям металлов при флотации. Эти значения и были приняты для дальнейших исследований по определению наиболее эффективных режимов применения названных реагентов.

По данным ряда работ, например [20], эффективность депрессирующего действия полимерных

реагентов на МС увеличивается в случае предварительного добавления многозарядных катионов, в частности Mg^{2+} . Поэтому в настоящей работе исследовали влияние добавления этого катиона на действие ПСС и ПАЦ-Н.

Результаты опытов с применением Л-50 и предварительным добавлением $MgCl_2$ с расходом от 0 до 70 г/т показали, что наименьшее значение выхода коллективного концентрата достигается при расходе $MgCl_2$ 7 г/т за счет снижения флотиремости породных минералов вследствие гидрофилизации их поверхности. Это обеспечивает снижение содержания магния в концентрате примерно на 2,0 % по сравнению с режимом без применения депрессоров.

На рис. 3, 4 представлены данные, характеризующие флотацию руды с композициями исследованных депрессоров: 1 – без депрессоров; 2 – Л-50, 700 г/т; 3 – ПАЦ-Н, 420 г/т; 4 – $MgCl_2$, 7 г/т + Л-50, 700 г/т; 5 – $MgCl_2$, 7 г/т + ПАЦ-Н, 420 г/т.

Данные рис. 3, а показывают, что наименьшие значения γ , составляющие примерно 27 и 25 %, достигаются применением соответственно ПАЦ-Н и $MgCl_2$ в сочетании с ПАЦ-Н, что указывает на высокую депрессирующую способность последнего. В то же время Л-50 в случае его индивидуального применения даже несколько увеличивает значение γ , что может быть связано с проявлением некоторой флокулирующей способности этого реагента.

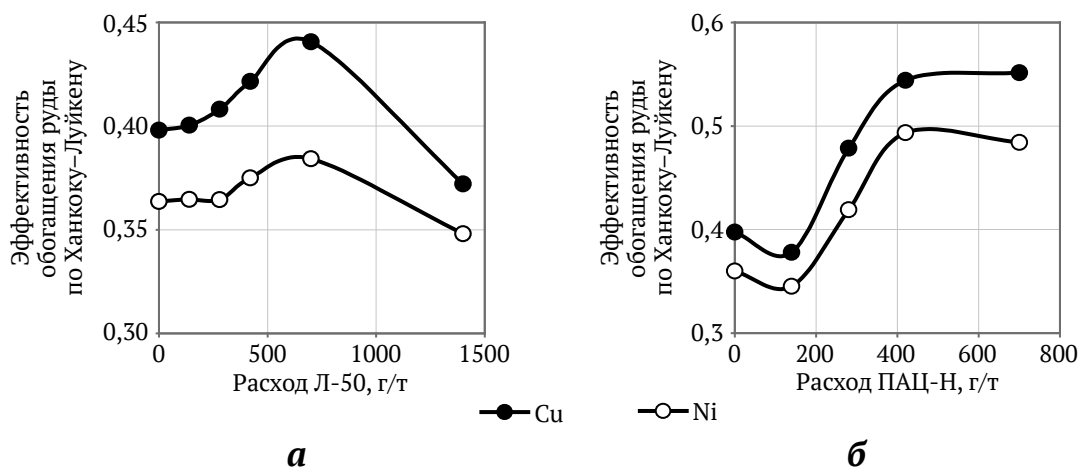


Рис. 2. Влияние расхода депрессоров на эффективность обогащения руды по Ханкоку–Луйкено: а – Л-50; б – ПАЦ-Н

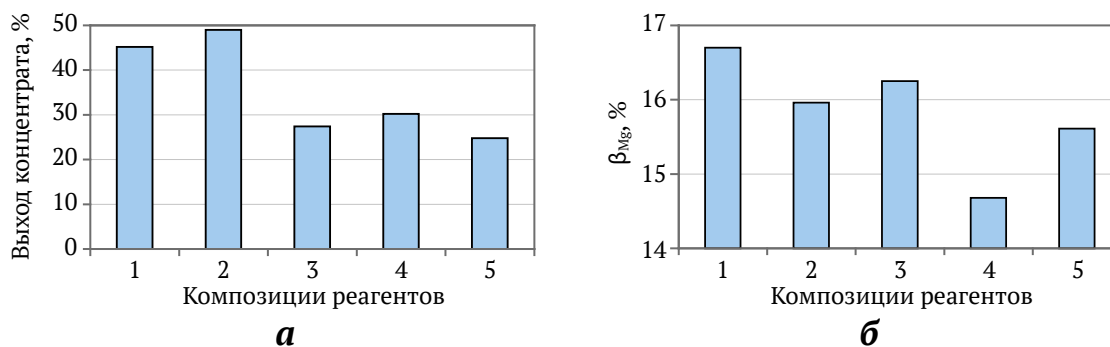


Рис. 3. Влияние композиций депрессоров: а – на выход концентрата; б – на содержание магния в концентрате

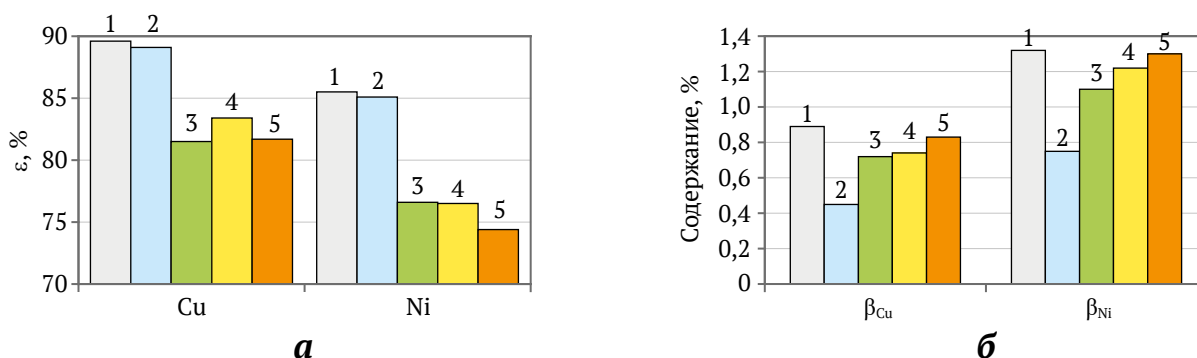


Рис. 4. Влияние композиций депрессоров:

а – на извлечение меди и никеля в концентрат; б – на содержание меди и никеля в концентрате

В случае предварительного добавления $MgCl_2$ для Л-50 значение γ уменьшается с 49 до 30 %, а для ПАЦ-Н – с 27 до 25 %. Очевидно, что разница в значениях γ с применением $MgCl_2$ и полимерного реагента по сравнению с индивидуальным применением последнего для Л-50 составляет 19 % против 2 % для ПАЦ-Н. Это, по-видимому, обусловлено тем, что сульфогруппы Л-50 притягиваются к поверхности минералов, модифицированных ионами Mg^{2+} , сильнее, чем карбоксильные группы ПАЦ-Н.

На рис. 3, б видно, что композиция № 4 ($MgCl_2$ и Л-50) обеспечивает наименьшее содержание магния в концентрате: 14,7 против 16,7 % для № 1 (без депрессоров) и 15,6 % для № 5 ($MgCl_2$ и ПАЦ-Н). В целом содержание магния в концентрате снижается примерно на 2 %.

На рис. 4, а заметна тенденция к снижению значений извлечения ϵ с применением депрессоров. При этом Л-50 снижает извлечение в меньшей степени по сравнению с ПАЦ-Н, что видно из сравнения композиций №№ 2, 3 и №№ 4, 5: в случае индивидуального применения депрессоров Л-50 снижает извлечение меди и никеля по сравнению с опытом без депрессоров соответственно на 0,5 и 0,4 % против соответственно 8,1 и 8,9 % для ПАЦ-Н при его эффективном расходе. При предварительном добавлении $MgCl_2$ для Л-50 извлечение меди и никеля по сравнению с опытом без депрессоров снижается соответственно на 6,2 и 9,0 %; для ПАЦ-Н – соответственно на 7,9 и 11,1 %. Данные на рис. 4, б показывают, что меньше всего снижается β в случае применения $MgCl_2$ и ПАЦ-Н.

Таким образом, Л-50 оказывает действие на МС только в присутствии $MgCl_2$ и при этом по сравнению с ПАЦ-Н характеризуется меньшей эффективностью депрессии. Сравнительный анализ механизмов взаимодействия ПСС и ПАЦ-Н с поверхностью МС с учётом литературных данных показал, что для макромолекул ПСС линейного строения, характеризующихся меньшим значением длины сегмента Куна (4 нм против примерно 20 нм), и, следовательно, более высокой гибкостью по сравнению с ПАЦ-Н, некоторые из анионоактивных групп отдалены от поверхности, или экранированы, и поэтому не участвуют в формировании заряда поверхности. В отличие от ПСС, ма-

кромолекула ПАЦ-Н имеет волнообразную, близкую к плоской, форму и расположена вдоль поверхности минерала [24], в результате большая часть анионоактивных групп участвует в формировании заряда поверхности. Также в макромолекуле ПАЦ-Н, в отличие от ПСС, есть атомы водорода, способные к образованию водородных связей с электроотрицательными атомами на поверхности МС. Это, предположительно, обуславливает более слабое влияние ПСС на эти минералы по сравнению с КМЦ.

В то же время полисахариды, в отличие от ПСС, образуют хелатные комплексные соединения с медью и никелем [25, 26], и это обуславливает более низкое извлечение в концентрат указанных металлов для ПАЦ-Н по сравнению с Л-50.

Также было установлено, что между значениями содержания кремния и магния как в концентрате, так и в хвостах существует корреляция с весьма высокими значениями коэффициента детерминации δ , как это видно на рис. 5; это подтверждает, что магний сосредоточен преимущественно в силикатных минералах.

Попытки использования для депрессии МС других образцов ПСС, отличающихся от Л-50 значениями ММ, а также реагентами для регулирования роста цепи, показали весьма близкие значения извлечения и содержания в коллективном концентрате:

- по Cu – соответственно 85,7–87,0 и 0,48–0,59 %;
- по Ni – соответственно 75,2–80,4 и 0,74–0,90 %.

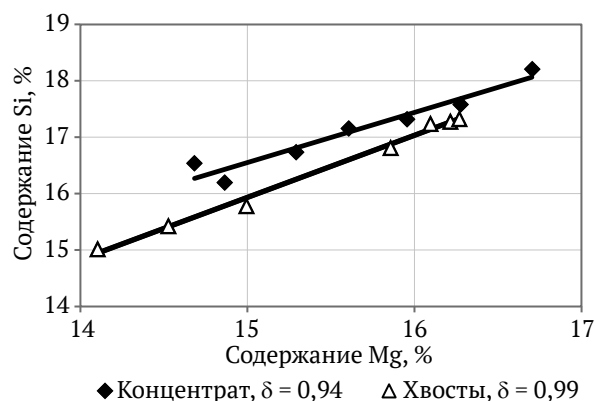


Рис. 5. Корреляционная зависимость между содержанием кремния и магния в продуктах флотации



Анализ зависимостей значений γ , а также ε и β для меди и никеля от ММ указанных образцов ПСС показал, что значение коэффициента детерминации δ не превышает 0,21; это свидетельствует о том, что значение ММ в интервале от 89 000 до 208 000 г/моль практически не влияет на результаты флотации руды с перечисленными образцами ПСС. Также не оказывали влияния и реагенты, применявшиеся для регулирования роста цепи в процессе полимеризации ПСС (изопропанол, глицин, триметиламин, см. табл. 1).

Практическое применение

На основании полученных экспериментальных данных применение ПСС рекомендуется при флотации медно-никелевых руд с высоким содержанием магния в тех случаях, когда требуется достигнуть максимально возможного снижения содержания этого элемента в коллективном концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля, особенно тогда, когда применение полисахаридных депрессоров не позволяет существенно снизить содержание магния в концентрате и (или) имеет место значительное снижение извлечения металлов. Расход ПСС – несколько сотен грамм на тонну; определяется экспериментально для конкретной руды. Целесообразно перед подачей ПСС предусматривать добавление водных растворов соединений магния так, чтобы расход ионов Mg^{2+} составлял бы порядка 5–10 г/т. При этом ожидаемые значения снижения извлечения меди и никеля в коллективный концентрат будут меньше по сравнению с КМЦ. Это позволит получить экономический эффект за счёт снижения энергозатрат на последующую пирометаллургическую переработку концентрата.

Также представляется целесообразным проведение отдельных исследований с образцами ПСС линейного строения, имеющими ММ свыше 1 млн г/моль.

Выводы

На основании экспериментальных исследований по коллективной флотации медно-никелевой руды с применением полистиролсульфоната натрия и карбоксиметилцеллюлозы марки ПАЦ-Н получены новые научные знания о влиянии расхода и свойств полистиролсульфонатов на показатели флотации.

1. Установлено, что с точки зрения снижения выхода концентрата полистиролсульфонат оказывает в целом более слабое депрессирующее действие на магнийсодержащие силикаты, чем ПАЦ-Н. Однако при использовании полистиролсульфоната содержание магния в концентрате примерно на 1 % ниже по сравнению с ПАЦ-Н, что снижает энергозатраты при последующей пирометаллургической переработке концентрата. Также полистиролсульфонат обеспечивает более высокое извлечение меди (до 7 %) и никеля (до 8 %) в концентрат, чем в случае применения ПАЦ-Н, так как не образует хелатные комплексы с указанными металлами, в отличие от полисахаридов.

2. Установлено, что наиболее эффективная депрессия МС достигается последовательным применением хлорида магния с расходом 7 г/т и полистиролсульфоната с расходом 700 г/т. При этом содержание магния в концентрате снижается на 2 % по сравнению с флотацией без депрессоров, что обосновывает целесообразность применения указанной композиции.

3. Установлено, что для образцов полистиролсульфонатов значение молекулярной массы в диапазоне от 89 000 до 208 000 г/моль, а также реагенты, применявшиеся в процессе синтеза для регулирования роста цепи, практически не оказывают влияния на результаты флотации.

4. Показано, что практическое применение ПСС целесообразно при флотации медно-никелевых руд с высоким содержанием магния в тех случаях, когда требуется достигнуть максимально возможного снижения содержания этого элемента в концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля.

Список литературы / References

1. Боярко Г.Ю., Лаптева А.М., Болсуновская Л.М. Минерально-сырьевая база меди России: состояние, возможности развития. *Горные науки и технологии*. 2024;9(4):352–386. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248>
Boyarko G.Yu., Lapteva A.M., Bolsunovskaya L.M. Mineral resource base of Russia's copper: current state and development prospects. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(4):352–386. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248>
2. Светлов А.В., Красавцева Е.А., Горячев А.А., Поторочин Е.О. Проблема переработки бедных руд и техногенных отходов, снижение негативного влияния на окружающую среду от деятельности предприятий горнопромышленного комплекса. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2020;12(3):21–33. <https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.3.003>
Svetlov A.V., Krasavtseva E.A., Goryachev A.A., Potorochin E.O. The challenge in mineral processing for low-grade ores and man-made waste: how to reduce the negative environmental impact from the mining industry? *Bulletin of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2020;12(3):21–33. <https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.3.003>
3. Гань Ф., Гао Л., Дай Х. и др. Разработка технологии обогащения бедной медно-никелевой руды. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;(5):140–151. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230515> (Перев. вер.: Gan F., Gao L., Dai H., et al. Study on beneficiation technology for rational utilization of low-grade copper nickel symbiotic ore. *Journal of Mining Science*. 2023;59(5):828–839. <https://doi.org/10.1134/S1062739123050150>)
Gan F., Gao L., Dai H., et al. Study on beneficiation technology for rational utilization of low-grade copper nickel symbiotic ore. *Journal of Mining Science*. 2023;59(5):828–839. <https://doi.org/10.1134/S1062739123050150>



- S1062739123050150 (Orig. ver.: Gan F., Gao L., Dai H., et al. Study on beneficiation technology for rational utilization of low-grade copper nickel symbiotic ore. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2023;(5):140–151. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRI20230515>)
4. Степанова К.Д., Казанцева М.И. Влияние вещественного состава медно-никелевых руд на процессы их обогащения. *Горная промышленность*. 2021;(S5–2):17–23.
Stepanova K.D., Kazantseva M.I. Impact of material composition of copper-nickel ores on their processing. *Mining Industry Journal*. 2021;(S5–2):17–23. (In Russ.)
 5. Xie J., Sun W., Zhao K., et al. Upgrading of talc-bearing copper-nickel sulfide ore by froth flotation using sodium phytate as depressant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024;687:133561. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133561>
 6. Zhao K., Yan W., Wang X., et al. Effect of a novel phosphate on the flotation of serpentine-containing copper-nickel sulfide ore. *Minerals Engineering*. 2020;150:106276. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106276>
 7. Yin F., Zhang Ch., Yu Y., et al. Review on the challenges of magnesium removal in nickel sulfide ore flotation and advances in serpentinite depressor. *Minerals*. 2024;14(10):965. <https://doi.org/10.3390/min14100965>
 8. Dikmen S., Ersoy B., Dikmen Z. Adsorption behaviour of ionic and non-ionic surfactants onto talc a naturally hydrophobic mineral—a comparative study. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*. 2020;21:139–152. <https://doi.org/10.18038/estubtda.829712>
 9. Douillard J.M., Zajac J., Malandrini H., Clauss F. Contact angle and film pressure: study of a talc surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002;255(2):341–351. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8611>
 10. Galet L., Goaldard C., Dodds J.A. The importance of surface energy in the dispersion behaviour of talc particles in aqueous media. *Powder Technology*. 2009;190(1–2):242–246. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.086>
 11. Binbin Li, Guofan Zhang, Dezhi Liu, Jianhua Chen. Selective alteration mechanisms of sodium tripolyphosphate towards serpentine: Implications for flotation of pyrite from serpentine. *Journal of Molecular Liquids*. 2022;368(Part A):120687. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120687>
 12. Красавцева Е.А., Горячев А.А. Обзор способов депрессии талька при флотации медно-никелевых руд. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2019;10(6–1):149–154. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.020>
Krasavtseva E.A., Goryachev A.A. Review of methods of talc depression at the flotation of copper-nickel ores. *Proceedings of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019;10(6–1):149–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.020>
 13. Liao R., Deng J., Lai H., et al. An overview of technologies and selective depressing agents for separating chalcopyrite and talc. *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*. 2018;4:146. <https://doi.org/10.15344/2455-2372/2018/146>
 14. Huang R., Liu J., Yang D., et al. Depression effect of CMC on sulfide ore flotation and its influencing factors. *Chinese Journal of Engineering*. 2024;46(4):627–636. (In Chinese) <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.02.28.006>
 15. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Лусинян О.Г., Гольберг Г.Ю. Применение отечественных полимерных анионоактивных депрессоров при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(5):5–14. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14>
Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Lusinyan O.G., Golberg G.Yu. Utilizing Russian polymer anion active depressants in the flotation of out-of-balance talcose copper nickel ore. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(5):5–14. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14>
 16. Xue J., Tu H., Shi J., et al. Enhanced inhibition of talc flotation using acidified sodium silicate and sodium carboxymethyl cellulose as the combined inhibitor. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30(7):1310–1319. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2582-5>
 17. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Гольберг Г.Ю., Лусинян О.Г. Совместное применение жидкого стекла и полисахаридов при флотации оталькованных медно-никелевых руд. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(2):5–15. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-5-15>
Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Golberg G.Yu., Lusinyan O.G. Joint use of sodium silicate and polysaccharides in the flotation of talcose copper-nickel ores. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;(2):5–15. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-5-15>
 18. Fu Y., Zhu Zh., Yao J., et al. Improved depression of talc in chalcopyrite flotation using a novel depressant combination of calcium ions and sodium lignosulfonate. *Colloids and Surfaces A*. 2018;558:88–94. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.08.056>
 19. Mai Q., Zhou H., Ou L. Flotation separation of chalcopyrite and talc using calcium ions and calcium lignosulfonate as a combined depressant. *Metals*. 2021;11(4):651. <https://doi.org/10.3390/met11040651>
 20. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Гольберг Г.Ю. Депрессия флотоактивных силикатов с применением полимерных анионоактивных реагентов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(6):160–167. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240617> (Перев. вер.: Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Golberg G.Yu. Depression of flotation-sensitive silicates using polymeric anion active reagents. *Journal of Mining Science*. 2024;60(6):1022–1028. <https://doi.org/10.1134/S1062739124060176>)
Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Golberg G.Yu. Depression of flotation-sensitive silicates using polymeric anion active reagents. *Journal of Mining Science*. 2024;60(6):1022–1028. <https://doi.org/10.1134/>



- S1062739124060176 (Orig. ver.: Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Gol'berg G.Yu. Depression of flotation-sensitive silicates using polymeric anion active reagents. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2024;(6):160–167. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240617>)
21. Molife A., Becker M., Geldenhuys S., McFadzean B. Investigating the reasons for the improvement in flotation grade and recovery of an altered PGE ore when using sodium silicate. *Minerals Engineering*. 2023;195:108024. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108024>
22. Cao J., Tian X., Luo Y., Hu X. The effect of graphene oxide on the slime coatings of serpentine in the flotation of pentlandite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017;522:621–627. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.03.043>
23. Feng B., Lu Y., Feng Q., et al. Mechanisms of surface charge development of serpentine mineral. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(4):1123–1128. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62574-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62574-1)
24. Wang J., Somasundaran P. Adsorption and conformation of carboxymethyl cellulose at solid-liquid interfaces using spectroscopic, AFM and allied techniques. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2005;291(1):75–83. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.04.095>
25. El-Saied H., Basta A.H., Hanna A.A., El-Sayed A.M. Semiconductor properties of carboxymethyl cellulose-copper complexes. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 1999;38(5):1095–1105. <https://doi.org/10.1080/03602559909351633>
26. Hosny W.M., Abdel Hadi A.K., El-Saied H., Basta A.H. Metal chelates with some cellulose derivatives. Part III. Synthesis and structural chemistry of nickel (II) and copper (II) complexes with carboxymethyl cellulose. *Polymer International*. 1995;37(2):93–96. <https://doi.org/10.1002/pi.1995.210370202>

Информация об авторах

Анатолий Афанасьевич Лавриненко – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7955-5273](https://orcid.org/0000-0002-7955-5273); e-mail lavrin_a@mail.ru

Григорий Юрьевич Гольберг – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7968-3144](https://orcid.org/0000-0002-7968-3144), Scopus ID [41761734500](https://scopus.id/41761734500); e-mail gr_yu_g@mail.ru

Ирина Николаевна Кузнецова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5980-8472](https://orcid.org/0000-0002-5980-8472), Scopus ID [57201564209](https://scopus.id/57201564209); e-mail iren-kuznetsova@mail.ru

Оганес Георгиевич Лусинян – кандидат технических наук, ведущий инженер, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5655-1747](https://orcid.org/0000-0002-5655-1747), Scopus ID [57201648662](https://scopus.id/57201648662); e-mail lusinyan.oganes@yandex.ru

Владимир Аркадьевич Тверской – доктор химических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4348-8854](https://orcid.org/0000-0003-4348-8854), Scopus ID [6604012434](https://scopus.id/6604012434), ResearcherID [H-8042-2017](https://orcid.org/H-8042-2017); e-mail tverskoj@mirea.ru

Information about the authors

Anatoly A. Lavrinenko – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7955-5273](https://orcid.org/0000-0002-7955-5273); e-mail lavrin_a@mail.ru

Grigory Yu. Golberg – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7968-3144](https://orcid.org/0000-0002-7968-3144), Scopus ID [41761734500](https://scopus.id/41761734500); e-mail gr_yu_g@mail.ru

Irina N. Kuznetsova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5980-8472](https://orcid.org/0000-0002-5980-8472), Scopus ID [57201564209](https://scopus.id/57201564209); e-mail iren-kuznetsova@mail.ru

Oganes G. Lusinyan – Cand. Sci. (Eng.), Lead Engineer, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5655-1747](https://orcid.org/0000-0002-5655-1747), Scopus ID [57201648662](https://scopus.id/57201648662); e-mail lusinyan.oganes@yandex.ru

Vladimir A. Tverskoy – Dr. Sci. (Chem.), Professor, MIREA – Russian Technological University, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4348-8854](https://orcid.org/0000-0003-4348-8854), Scopus ID [6604012434](https://scopus.id/6604012434), ResearcherID [H-8042-2017](https://orcid.org/H-8042-2017); e-mail tverskoj@mirea.ru

Поступила в редакцию 11.06.2025
Поступила после рецензирования 15.07.2025
Принята к публикации 17.07.2025

Received 11.06.2025
Revised 15.07.2025
Accepted 17.07.2025