

Н. В. Фокина, Е. С. Янишевская, И. Н. Вишнякова,
А. Ш. Гершенкоп, Г. А. Евдокимова

Развитие и функционирование микроорганизмов в циклах обогащения сульфидных медно-никелевых и несульфидных апатит-нефелиновых руд

Определены численность и трофическое разнообразие бактерий в образцах процесса флотации апатит-нефелиновых и сульфидных медно-никелевых руд на обогатительных фабриках ОАО "Апатит" и Кольской ГМК. Изучение численности и разнообразия микробиоты проводилось методом посева на селективные питательные среды. Общая численность и биомасса бактерий учитывались методом флуоресцентной микроскопии с использованием поликарбонатных мембранных фильтров Syclo-pore. Бактерии идентифицировались молекулярно-генетическим методом. Наименьшая численность как сапротрофных, так и других трофических групп бактерий наблюдалась в образцах руды и оборотной воды как на фабрике АНОФ-2, так и на комбинате "Печенганикель". Установлено, что бактерии, поступающие с рудой и оборотной водой, идущей с хвостохранилищ, увеличивают свою численность по ходу флотации за счет поступления питательных веществ с флотореагентами, аэрации и более высокой температуры. Из оборотной воды и основных продуктов флотации выделены штаммы, частота встречаемости которых составила более 60 %, они относятся к роду *Pseudomonas*. На ОАО "Апатит" обнаружены еще два штамма с частотой встречаемости более 60 %, относящиеся к родам *Stenotrophomonas* и *Acinetobacter*. Численность грибов в цикле обогащения апатит-нефелиновой руды на фабриках очень низкая (от 1 до 24 КОЕ/1 мл или 1 г руды). Доминировали грибы рода *Penicillium*, встречались грибы родов *Acremonium*, *Aureobasidium*, *Alternaria*, *Chaetomium*. На комбинате "Печенганикель" выделены виды *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium aurantiogriseum* и *P. glabrum*. Обнаружено, что бактерии ухудшают флотиримость апатита за счет взаимодействия с активными центрами кальцийсодержащих минералов и интенсивной флокуляции, приводящей к снижению селективности процесса флотации. Также выявлена тенденция к изменению извлечения меди и никеля в процессе флотации сульфидных руд при высокой численности бактерий.

Ключевые слова: медно-никелевая руда, апатит-нефелиновая руда, флотация, флотореагенты, оборотная вода, бактерии.

Введение

Мурманская область занимает одно из ведущих мест в стране по запасам полезных ископаемых. Особенно значительное развитие в регионе получил горнопромышленный комплекс.

Минерально-сырьевые ресурсы представлены крупными запасами апатит-нефелинового и медно-никелевого сырья, фосфатное сырье – уникальными по составу и качеству апатит-нефелиновыми рудами Хибинского массива, перерабатываемыми на предприятии ОАО "Апатит" [1].

Медно-никелевое сырье области представлено комплексными сульфидными медно-никелевыми рудами. Запасы этих руд являются второй по значению сырьевой базой производства никеля в России. На территории области выделены четыре рудных района – Печенгский, Аллареченский, Мончегорский и Кольский. Основной из них – Печенгский, с комбинатом ОАО «ГМК "Печенганикель"», где производится переработка руды до товарной продукции. В настоящее время накоплено много материала по значимости микробиологического фактора в трансформации сульфидных руд с использованием бактерий в процессе обогащения [2; 3].

Общей особенностью этих горнопромышленных комплексов является использование оборотной воды в процессе обогащения сырья. Внедрение оборотного водоснабжения на обогатительных фабриках Мурманской области явилось значительным шагом в охране окружающей среды и, в первую очередь, поверхностных вод [4].

Оборотные воды, благодаря сложному их составу, наличию в них органических соединений и тонкодисперсной минеральной фазы являются хорошей питательной средой для бактерий. Их присутствие в оборотной воде, которая проходит технологический процесс, должно сказаться на состоянии поверхности минералов, входящих в состав исследуемых руд [5]. Поэтому проследить влияние бактериальной составляющей оборотных вод на флотационное поведение несульфидных апатит-нефелиновых и сульфидных медно-никелевых руд является важной задачей для понимания процессов, происходящих на поверхности минералов, и улучшения их флотиремости при переработке рассматриваемых руд.

Для несульфидных апатит-нефелиновых руд выполнена работа по определению роли бактериальной составляющей в непрерывном цикле переработки минерального сырья. Показано, что бактерии ухудшают флотиримость апатита. Результаты выполненной работы показывают пути снижения производственных затрат, в частности расхода собирательной смеси [6].

Выявить влияние микроорганизмов на процесс флотации сульфидных медно-никелевых руд более сложно из-за низкого содержания меди и никеля в исходной руде и наличия большого числа факторов, влияющих на процесс обогащения.

Цель данной работы – сравнить развитие микроорганизмов в процессах флотации сульфидных медно-никелевых руд на обогатительной фабрике Кольской ГМК и апатит-нефелиновых руд на предприятии ОАО "Апатит".

Материалы и методы

Изучение процессов влияния микроорганизмов на обогащение апатит-нефелиновой руды проводили непосредственно на обогатительных фабриках АНОФ-2 и АНОФ-3 ОАО "Апатит" в непрерывном цикле переработки минерального сырья. Проанализированы образцы измельченной руды, мельничного слива, пенного продукта, хвостов флотации, слива после сгущения, фильтрата, концентрата после сушки, оборотной воды, собирательной смеси и флотореагентов, образцы пенного и камерного продуктов основной, контрольной флотации и 3-х перечисток. Для выявления сезонной динамики численности микроорганизмов в оборотных водах образцы брали в весенний, летний, осенний и зимний периоды.

Изучение численности и трофического разнообразия микроорганизмов в цикле обогащения сульфидных руд проводили на обогатительной фабрике в г. Заполярный. Были исследованы образцы руды, межциклового флотации, пенных продуктов основной и I контрольной флотации, пенных продуктов I и II перечисток, хвостов, оборотной воды на входе, концентрата до спекания в зимний, летний и осенний периоды. Также были рассмотрены применяемые в процессе обогащения флотореагенты – аэрофлот, ксантогенат, сульфат меди, КМЦ, сода – с целью выяснения их токсичности для микроорганизмов или, наоборот, возможности использования некоторых из них как дополнительного источника питания.

Изучение численности и разнообразия микробиоты проводили методом посева на селективные питательные среды, такие как МПА, КАА (в состав которой входит сернокислый аммоний, наиболее часто используемый бактериями) и среда Аристовской. Общую численность и биомассу бактерий учитывали методом флуоресцентной микроскопии с использованием поликарбонатных мембранных фильтров Cуслорге. В коллекцию выделены доминирующие штаммы бактерий. Идентификация бактерий проведена современным молекулярно-генетическим методом с помощью ПЦР-амплификации генов 16s рРНК с последующим секвенированием ампликонов и анализом данных.

Опыты по изучению влияния микроорганизмов на параметры процесса флотации проводили на лабораторной установке 237-ФЛ-А (рис. 1). Для исследования влияния бактерий на процесс обогащения чистых разностей апатита и кальцита и апатита из руды были использованы четыре доминирующие культуры. В первую очередь проведена серия холостых опытов на водопроводной воде без добавления бактерий. Затем опыты проводились в замкнутом цикле на водопроводной воде, содержащей бактерии с численностью от 10^2 до 10^7 кл/мл.

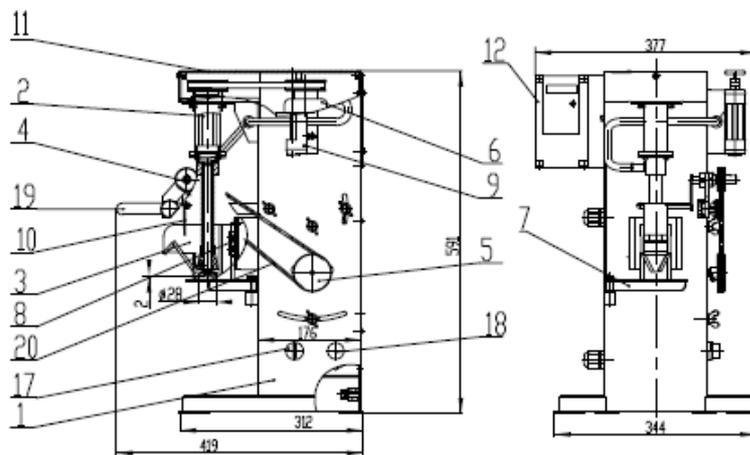


Рис. 1. Устройство флотационной машины: 1 – корпус; 2 – блок импеллера; 3 – камера; 4 – пеногон; 5 – привод пеногона; 6 – двигатель привода импеллера; 7 – столик; 8 – направляющее устройство; 9 – ротаметр; 10 – лопатка; 12 – блок управления (ВПЧ); 17 – переключатель; 18 – лампа; 19 – штанга; 20 – пассик

Fig. 1. Flotation machine: 1 – body; 2 – impeller unit; 3 – chamber; 4 – froth ejector; 5 – froth ejector gear; 6 – motor of impeller gear; 7 – table; 8 – guiding device; 9 – rotameter; 10 – blade; 12 – control unit; 17 – switch; 18 – lamp; 19 – pole; 20 – take-up belt

Для флотации готовили 7 л раствора с 700 мл бактериальной суспензии и водопроводной воды. Во время цикла во флотационную камеру помимо 700 мл раствора бактериальной суспензии помещали

300 г измельченной руды и реагенты: собирательную смесь и вспениватель. Флотационная камера присоединялась к аэрационной установке.

Исследования влияния микроорганизмов на процесс флотации сульфидных медно-никелевых руд проводились по схеме, предусматривающей измельчение исходной руды до крупности 60 % с размером частиц мельче 74 мкм, межцикловую флотацию, контрольную флотацию и I перерешивку пенного продукта. В работе использовались реагенты, применяемые на фабрике. Ксантогенат и сода подавались в измельчение. В межцикловую флотацию вводились аэрофлот и КМЦ, в I перерешивку – аэрофлот, в контрольную флотацию – ксантогенат, аэрофлот и КМЦ.

Результаты и обсуждение

Изучение образцов, взятых в цикле обогащения несурьфидных апатит-нефелиновых и сульфидных медно-никелевых руд, показывает, что численность микроорганизмов при флотации на фабриках АНОФ-2 и АНОФ-3 выше, чем на комбинате "Печенганикель" на два порядка и составляет $n \cdot 10^5 - 10^6$ кл/мл, что связано с особенностями руды и используемыми реагентами. Апатитовый концентрат используют для производства фосфорных удобрений, являющихся важным источником минеральных элементов для всего живого. Несурьфидные апатит-нефелиновые руды содержат в себе высокое количество биогенных элементов, которые служат отличным источником питания для микробиоты. Наряду с этим было выявлено несколько общих закономерностей развития микроорганизмов в процессах флотации руд.

Результаты исследования показывают, что бактерии, поступающие в процесс обогащения с рудой и оборотной водой, идущей с хвостохранилищ, увеличивают свою численность по ходу флотации (рис. 2–3).

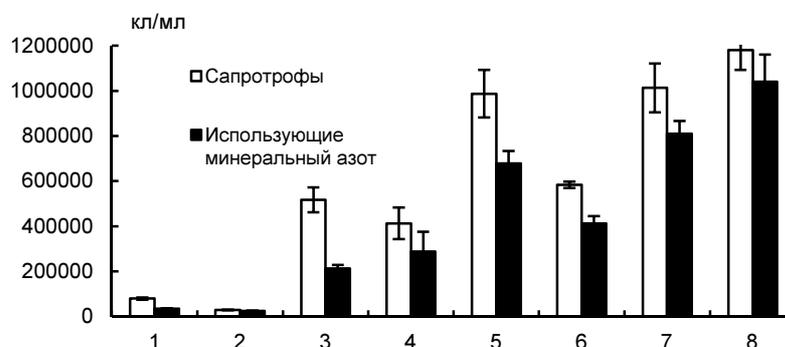


Рис. 2. Численность бактерий в образцах флотации апатит-нефелиновой руды на фабрике АНОФ-2, сентябрь 2005 г.: 1 – руда; 2 – оборотная вода; пенные продукты: 3 – основной флотации; 4 – контрольной флотации; 5 – I перерешивки; 6 – II перерешивки; 7 – III перерешивки; 8 – хвосты
Fig. 2. The number of bacteria in samples of flotation of apatite-nepheline ore at the ANOF-2 factory, September, 2005: 1 – ground ore; 2 – circulating water; froth products: 3 – basic flotation; 4 – control flotation; 5 – I cleaning; 6 – II cleaning; 7 – III cleaning; 8 – tails

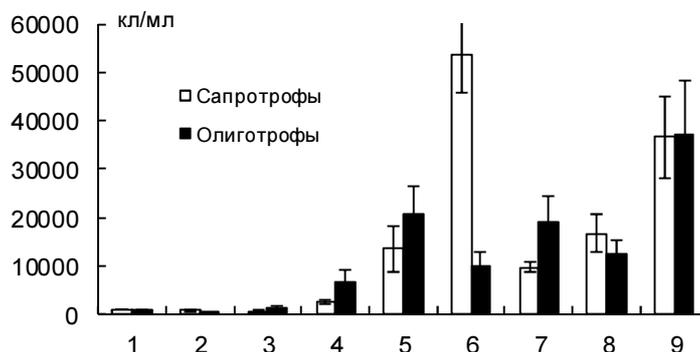


Рис. 3. Численность бактерий в образцах процесса флотации сульфидных руд комбината "Печенганикель", сентябрь 2015 г.: 1 – руда; 2 – оборотная вода; 3 – межцикловая флотация; пенные продукты: 4 – основной флотации; 5 – контрольной флотации; 6 – I перерешивки; 7 – II перерешивки; 8 – II основной перерешивки; 9 – хвосты
Fig. 3. The number of bacteria in samples of sulphide ore flotation process of the "Pechenganikel" plant, September, 2015: 1 – ground ore; 2 – circulating water; 3 – intercycle flotation; froth products: 4 – main flotation; 5 – control flotation; 6 – I cleaning; 7 – II cleaning; 8 – II basic cleaning; 9 – tails

Наименьшая численность как сапротрофных, так и других трофических групп бактерий наблюдается в образцах руды и оборотной воды на фабрике АНОФ-2 и составляет $n \cdot 10^4 - 10^5$ кл/г или мл, на комбинате "Печенганикель" – $n \cdot 10^2 - 10^3$ кл/г или мл. По ходу флотации их численность возросла на два порядка. Это связано как с повышением температуры при флотации, так и с поступлением в процесс органических веществ с флотореагентами. Немалую роль играет аэрация. Максимальная численность бактерий наблюдалась в пенных продуктах и хвостах, достигая значений $n \cdot 10^6$ кл/мл в апатит-нефелиновых рудах и $n \cdot 10^4$ кл/мл – в медно-никелевых.

На апатит-нефелиновых фабриках численность бактерий, использующих минеральные формы азота, и бактерий с олиготрофным типом питания ниже, чем с сапротрофным.

В процессе обогащения медно-никелевых руд на разных этапах преобладают разные трофические группы бактерий. Значения рН образцов с обеих фабрик отличаются высокой щелочностью и изменяются в диапазоне от 8 до 12.

В процессе работы из оборотной воды и основных продуктов флотации на ОАО "Апатит" и комбинате "Печенганикель" были выделены штаммы, частота встречаемости которых составила более 60 %, они относятся к роду *Pseudomonas*. На ОАО "Апатит" обнаружены еще два штамма с частотой встречаемости более 60 %, относящиеся к роду *Stenotrophomonas* и *Acinetobacter*.

Численность грибов в цикле обогащения апатит-нефелиновой руды на фабриках очень низкая (от 1 до 24 КОЕ/1 мл или 1 г руды), и, по всей вероятности, они не оказывают ощутимого влияния на процесс флотации. Доминировали грибы рода *Penicillium*, встречались грибы родов *Acremonium*, *Aureobasidium*, *Alternaria*, *Chaetomium*.

Микроскопические грибы встречались в единичных случаях и на комбинате "Печенганикель". Были обнаружены виды *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium aurantiogriseum* и *P. glabrum*.

С помощью опытов по флотации апатит-нефелиновых руд на лабораторной установке обнаружено, что доминирующие виды бактерий оказывают негативное влияние на процесс флотации апатита из апатит-нефелиновой руды (табл. 1).

Таблица 1. Результаты флотации апатита из руды в присутствии бактерий (*Pseudomonas alcaliphila*, *Pseudomonas plecoglossicida*, *Stenotrophomonas rhizophila*) в замкнутом цикле (%)

Table 1. Results of flotation of apatite from ore in the presence of bacteria (*Pseudomonas alcaliphila*, *Pseudomonas plecoglossicida*, *Stenotrophomonas rhizophila*) in the closed cycle (%)

Наименование продукта	Выход	Содержание P ₂ O ₅	Извлечение P ₂ O ₅	Численность бактерий, кл/мл
Концентрат	36.3	40.42	94.6	0
То же	36.3	39.50	95.3	10 ²
- " -	38.3	38.12	95.1	10 ³
- " -	39.0	37.45	95.0	10 ⁶

В замкнутом цикле в виду циркуляции промпродуктов при флотации нарушается селективность процесса, о чем свидетельствует увеличение выхода продукта при одинаковом извлечении, ухудшается качество концентрата. Доминирующие штаммы снижают содержание P₂O₅ в концентрате практически на 3 % по сравнению с опытами, проведенными на водопроводной воде без бактерий.

Лабораторные опыты по флотации исходной медно-никелевой руды на водопроводной воде в фабричном режиме показали, что в присутствии доминирующих бактерий и с увеличением их численности время флотации увеличивается (табл. 2).

Таблица 2. Изменение времени флотации в зависимости от концентрации бактерий в жидкой фазе флотации сульфидных медно-никелевых руд

Table 2. Flotation time change depending upon the concentration of bacteria in the liquid phase of the flotation of sulfide copper-nickel ores

Численность бактерий, кл/мл	Время флотации по операциям, мин		
	Межцикловая флотация	I перечистка	Контрольная флотация
0	27.42	6.32	8.34
10 ³	27.15	6.50	7.07
10 ⁵	27.15	7.45	7.45
10 ⁶	26.45	7.30	8.00
10 ⁷	28.40	9.00	10.30

Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы. Флотационный процесс на предприятии ОАО "Апатит" и комбинате "Печенганикель" способствует развитию бактерий. Максимальной численности бактерии достигают в пенном продукте за счет благоприятного температурного режима, аэрации и наличия питательных веществ, поступающих в процесс с флотореагентами. Численность микроорганизмов при флотации на фабриках АНОФ-2 и АНОФ-3 выше, чем на комбинате "Печенганикель" на два порядка, что связано с особенностями руды и используемыми реагентами. Лабораторные опыты по флотации несulfидных апатит-нефелиновых руд показали, что доминирующие штаммы бактерий ухудшают флотиремость апатита. Результаты опытов с sulfидными медно-никелевыми рудами на водопроводной воде в фабричном режиме свидетельствуют о возрастании времени флотации в оборотной воде в присутствии бактерий.

Библиографический список

1. Черненко Ю. Д., Ангелов А. И., Левин Б. В. Направления оптимизации качества кольского апатитового концентрата // Химическая промышленность. 1999. № 11. С. 56–60.
2. Каравайко Г. И., Кузнецов С. И., Голомзик А. И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. М. : Наука, 1972. 248 с.
3. Фомченко Н. В., Муравьев М. И., Кондратьева Т. Ф. Комплексная переработка некондиционных sulfидных концентратов с применением двухстадийного выщелачивания // Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения – 2015) : мат. междунар. совещ. Иркутск, 21–25 сентября. Иркутск, 2015. С. 353–357.
4. Голованов В. Г., Петровский А. А., Брыляков Ю. Е. Внедрение оборотного водоснабжения на АНОФ-2 // Горный журнал. 1999. № 9. С. 48–50.
5. Евдокимова Г. А., Гершенкоп А. Ш., Воронина Н. В. Микробиологические процессы в системе добычи и переработки апатит-нефелиновых руд с использованием оборотного водоснабжения. СПб. : Наука, 2008. 102 с.
6. Воронина Н. В., Евдокимова Г. А., Гершенкоп А. Ш. Развитие и функционирование микроорганизмов в цикле обогащения апатит-нефелиновых руд с использованием оборотного водоснабжения // Горный журнал. 2007. № 12. С. 61–65.

References

1. Chernenko Yu. D., Angelov A. I., Levin B. V. Napravleniya optimizatsii kachestva kolskogo apatitovogo konsentrata [Directions of optimization of the Kola apatite concentrate quality] // Himicheskaya promyshlennost. 1999. N 11. P. 56–60.
2. Karavayko G. I., Kuznetsov S. I., Golomzik A. I. Rol mikroorganizmov v vychelachivanii metallov iz rud [The role of microorganisms in the leaching of metals from ores]. M. : Nauka, 1972. 248 p.
3. Fomchenko N. V., Murav'ev M. I., Kondrat'eva T. F. Kompleksnaya pererabotka nekonditsionnyh sulfidnyh konsentratov s primeneniem dvuhstadiynogo vychelachivaniya [Complex processing substandard sulphide concentrates using two-stage leaching] // Sovremennyye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki trudnoobogatimogo mineralnogo syrya (Plaksinskie chteniya – 2015) : mat. mezhdunar. sovesch. Irkutsk, 21–25 sentyabrya. Irkutsk, 2015. P. 353–357.
4. Golovanov V. G., Petrovskiy A. A., Brylyakov Yu. E. Vnedrenie oborotnogo vodosnabzheniya na ANOF-2 [Introduction of circulating water supply at ANOF-2] // Gornyi zhurnal. 1999. N 9. P. 48–50.
5. Evdokimova G. A., Gershenkop A. Sh., Voronina N. V. Mikrobiologicheskie protsessy v sisteme dobychi i pererabotki apatit-nefelinovyh rud s ispolzovaniem oborotnogo vodosnabzheniya [Microbiological processes in the system of mining and processing of apatite-nepheline ores based on water recycling]. SPb. : Nauka, 2008. 102 p.
6. Voronina N. V., Evdokimova G. A., Gershenkop A. Sh. Razvitie i funktsionirovanie mikroorganizmov v tsikle obogascheniya apatit-nefelinovyh rud s ispolzovaniem oborotnogo vodosnabzheniya [The development and functioning of microorganisms in the cycle of enriching apatite-nepheline ores using water recycling] // Gornyi zhurnal. 2007. N 12. P. 61–65.

Сведения об авторах

Фокина Надежда Викторовна – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: voronina@inep.ksc.ru

Fokina N. V. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher; e-mail: voronina@inep.ksc.ru

Янишевская Елена Сергеевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, магистрант; e-mail: drygina_es@mail.ru

Yanishevskaya E. S. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Undergraduate Student; e-mail: drygina_es@mail.ru

Вишнякова Ирина Николаевна – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, технолог; e-mail: potarova514@mail.ru

Vishnyakova I. N. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Technologist; e-mail: potarova514@mail.ru

Гершенкоп Александр Шлемович – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник

Gershenkop A. Sh. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Chief Researcher

Евдокимова Галина Андреевна – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р биол. наук, профессор, зам. директора по науке; e-mail: galina@inep.ksc.ru

Evdokimova G. A. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Biol. Sci., Professor, Deputy Director on Science; e-mail: galina@inep.ksc.ru

N. V. Fokina, E. S. Yanishevskaya, I. N. Vishnyakova,
A. Sh. Gershenkop, G. A. Evdokimova

Development and functioning of microorganisms in concentration cycles of sulfide copper-nickel and non-sulfide apatite-nepheline ores

The number and trophic diversity of bacteria in flotation samples of apatite-nepheline and sulfide copper-nickel ores at the concentration plants of JSC "Apatite" and Kola Mining and Metallurgical Company have been determined. The study of the size and diversity of the microbiota has been conducted by culture on selective nutrient media. The total number and biomass of bacteria have been considered by fluorescence microscopy using Cyclopore polycarbonate membrane filters. Bacteria have been identified by molecular genetic methods. The least amount of both saprotrophic and other trophic groups of bacteria has been observed in the samples of ore and recycled water as at the concentrating factory of Apatit JSC, and also at the plant "Pechenganikel". It has been found out that the bacteria contained in the ore and recycling water flowing from the tailings increased their number during the flotation process due to coming of the nutrients with the flotation reagents, aeration and increased temperature. Strains which occurrence is more than 60 % have been extracted from recycled water and basic flotation products and classified as *Pseudomonas*. Two strains with occurrence of more than 60 % have been discovered at Apatit JSC and classified as *Stenotrophomonas* and *Acinetobacter*. The number of fungi in the cycle of apatite-nepheline ore enrichment at the factories is very low (1 to 24 CFU / 1 ml or 1 g of ore). Fungi of the genus *Penicillium* have been dominated, fungi of the genera *Acremonium*, *Aureobasidium*, *Alternaria*, *Chaetomium* have also been detected. At the plant "Pechenganikel" species *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium aurantiogriseum* and *P. glabrum* have been extracted. It has been shown that the bacteria deteriorate the apatite flotation as a result of their interaction with active centers of calcium-containing minerals and intensive flocculation decreasing the flotation selectivity. Also some trend of copper and nickel recovery change has been detected with the presence of a high number of bacteria.

Key words: copper-nickel ore, apatite-nepheline ore, flotation, flotation reagents, recycling water, bacteria.