
МИР ГОРНОЙ КНИГИ

ИЗДАНИЕ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ
ПРИ СОДЕЙСТВИИ:



Издательства «Горная книга»



*Инвестиционного фонда
поддержки горного книгоиздания,
проект ГИАБ - 3164-17*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Горного информационно– аналитического бюллетеня

Главный редактор

В.Н. ЗАХАРОВ – ИПКОН РАН

Члены редколлегии

А.А. АБРАМОВ – МГИ НИТУ МИСиС

В.Н. АМИНОВ – Петрозаводский ГУ

В.А. АТРУШКЕВИЧ – МГИ НИТУ МИСиС

А.А. БАРЯХ – Ги УрО РАН

А.П. ВЕРЖАНСКИЙ – НП «Горнопромышленники России»

Н.А. ГОЛУБЦОВ – Издательство «ГОРНАЯ КНИГА»

А.Б. ЖАБИН – Тульский ГУ

Д.Р. КАПЛУНОВ – ИПКОН РАН

В.А. КОВАЛЁВ – КузГТУ

М.В. КУРЛЕНЯ – ИГД Сибирского отд. РАНКузГТУ

А.Б. МАКАРОВ – РГГРУ

В.Н. ОПАРИН – ИГД СО РАН

И.Ю. РАССКАЗОВ – ИГД ДВО РАН

В.Л. ШКУРАТНИК – МГИ НИТУ МИСиС

С.А. ЭПШТЕЙН – МГИ НИТУ МИСиС

Журнал основан в 1992 г.

ISSN 0236-1493

ГОРНЫЙ

ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
БЮЛЛЕТЕНЬ

(НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ)

MINING INFORMATIONAL
AND ANALYTICAL
BULLETIN

(SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)

КАМЧАТКА-5



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»

СПЕЦИАЛЬНЫЙ
ВЫПУСК 32

2017

УДК 622
ББК 33
К 18

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253-03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124-94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д.014367.12.16

Камчатка-5: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2017. – № 12 (специальный выпуск 32). – 376 с. – М.: Издательство «Горная книга».

ISSN 0236-1493 (в пер.)

Представлены новые результаты исследований в области металлогении никеленосных провинций Дальнего Востока, геобиотехнологии переработки сульфидных медно-никелевых руд, приведен анализ энергетического потенциала отдельных геотермальных систем Камчатки. Рассмотрены черты сходства и различий кортландитов дукукского комплекса никеленосной норит-кортландитовой формации Камчатки с плутоническими комплексами дунит-клинопироксенит-габбровой формации. Дана сравнительная характеристика платино-кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч и рудопроявлений Дукукского рудного узла, отражены геолого-структурные позиции оруденений, минералого-петрографические, геохимические особенности пород и руд. Представлена плотностная модель с объемным изображением блоков земной коры, содержащих интрузии базитов никеленосного комплекса. Оценены перспективы обнаружения новых медно-никелевых объектов. Представлены результаты исследований интенсификации бактериально-химического выщелачивания (БХВ) медно-никелевых руд, представлены экспериментальные данные о токсичном воздействии цветных металлов на рост ацидофильного хемолитотрофного сообщества микроорганизмов. Даны рекомендации по переработке продуктивных растворов БХВ сложного состава.

Для научных и инженерно-технических работников горнодобывающей отрасли, аспирантов и студентов горных и геологических специальностей вузов, а также специалистов в области освоения геотермальных систем, разработки геотермальных месторождений и геотермальной энергетики.

УДК 622
ББК 33

ISSN 0236-1493

© Коллектив авторов, 2017
© Издательство «Горная книга», 2017
© Дизайн книги. Издательство
«Горная книга», 2017

Р. М. Новаков, В. М. Чубаров, В. Е. Кунгурова

РОГОВООБМАНКОВЫЕ И ФЛОГОПИТОВЫЕ ПЕРИДОТИТЫ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ ФОРМАЦИЙ КАМЧАТКИ

Рассмотрены геохимические, минералогические и петрографические особенности роговообманковых и флогопитовых перидотитов из плутонических комплексов Камчатки различной формационной принадлежности. Рассмотрены черты сходства и различий кортландитов дукукского комплекса никеленосной норит-кортландитовой формации Камчатки с роговообманковыми и флогопитовыми перидотитами, связанными с левоандриановским рядом плутонических комплексов дунит-клинопироксенит-габбровой формации.

Ключевые слова: Камчатка, роговообманковые перидотиты, кортландиты, медь, никель, сульфиды.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-5-17

Введение

Типоморфными породами никеленосных норит-кортландитовых интрузий на Камчатке являются кортландиты. Внешне сходные с ними другие разновидности роговообманковых и флогопитовых перидотитов отмечаются в ассоциации с образованиями дунит-клинопироксенит-габбровой формации, с которой связаны проявления платиноидов и медных руд. Выявление отличительных особенностей макроскопически сходных пород различной формационной принадлежности востребовано как в практике геологосъемочных и поисковых работ, так и для металлогенического анализа территорий. С этой целью проведен сравнительный анализ петрографических, минералогических и геохимических особенностей близких по составу и характеру залегания роговообманковых и флогопитовых перидотитов различной формационной принадлежности.

Мафит-ультрамафитовые формации Камчатки, с которыми связаны роговообманковые и флогопитовые перидотиты

Никеленосная норит-кортландитовая формация представлена интрузиями дукукского комплекса [20], которые развиты в пределах Камчатского срединного массива метаморфических пород [17, 23].

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 5–17.

© Р. М. Новаков, В. М. Чубаров, В. Е. Кунгурова, 2017.

Они сложены гранатсодержащими диоритами, диоритами, норитами, габброноритами, ортопироксенитами, горнблендитами и кортландитами [20]. Известны как крупные массивы (до 30 км²) [17, 22], так и многочисленные мелкие пластообразные и штокообразные тела мощностью в десятки-сотни метров [17, 21, 22]. Проявлена дифференциация, в результате которой нижняя часть интрузий образована породами преимущественно ультраосновного и основного, верхняя – основного и среднего составов. Отмечается ритмичная расслоенность. Роговообманковые перидотиты – кортландиты встречаются как в составе крупных интрузий, так и образуют самостоятельные тела небольшой мощности (первые метры – десятки метров).

Дунит-клинопироксенит-габбровая формация представлена дифференцированными массивами дунитов, перидотитов, клинопироксенитов и габбро, умеренно-щелочных пироксенитов и габбро, монцогаббро, шонкинитов, монцонитов и сиенитов левоандриановского комплекса [20]. Массивы распространены в Центральной и Восточной Камчатке. Контакты с вмещающими породами интрузивные и тектонические. Приконтактные изменения связаны с фосфоркалийевым метасоматозом [8, 18, 20, 25, 24]. Несмотря на то, что породы умеренно-щелочного и щелочного подотрядов нередко образуют самостоятельные массивы, комплекс данных свидетельствует об их формировании в единой магматической системе с породами нормальной щелочности [10]. При этом, умеренно-щелочные разности рассматриваются как более поздние образования [1, 8, 12], с которыми ассоциируют вулканы основного и ультраосновного состава нормального, умеренно-щелочного и щелочного подотрядов [1, 8, 11, 9, 20, 24], а также дайки шрисгеймитов (роговообманковых перидотитов [11, 25, 26]) и сциелитов (флогопитовых перидотитов [1, 8, 18, 12, 20]), которые, как и кортландиты, относят к производным ультраосновных магм повышенной щелочности с высоким содержанием воды [19, 26].

Особенности роговообманковых и флогопитовых перидотитов Камчатки

Кортландиты. Сульфидная медно-никелевая минерализация в образованиях норит-кортландитовой формации часто непосредственно связана с кортландитами и оливиновыми ортопироксенитами, которые образуют самостоятельные пластообразные тела небольшой мощности (до первых метров) или присутствуют в составе кортландит-пироксенит-горнблендитовых серий в расслоенных интрузиях [7, 19]. Так как породы серии формировались в результате кристаллизационной дифференциации, между ними существуют переходные разности

по количественным соотношениям породообразующих минералов. Возможно, отчасти с этим связаны различные толкования термина «кортландит», которые можно найти в справочной и методической литературе: пироксен-оливиновый горнблендит [3, 4]; роговообманковая разновидность перидотита [2, 14]; роговообманковая разновидность перидотита, в котором ортопироксен превагирует над клинопироксеном [13]; дупироксеновый перидотит с пойкилитовыми порфиробластами роговой обманки [15]. Кортландиты никеленосных интрузий норит-кортландитовой формации Камчатки представляют собой пироксен-роговообманковые перидотиты обычно с пойкилитовой структурой, где крупные выделения роговой обманки включают зерна оливина, ортопироксена (бронзита) и диопсида (рис. 1, б). Породы нередко содержат значительное количество флогопита [19, 28]. В ряде случаев, к куртландитам отнесены разновидности с гипидиоморфнозернистой структурой с интерстициальными роговой обманкой, флогопитом и плагиоклазом, содержание которого в породе варьирует от 0 до 15 % [7]. Геохимически куртландиты относятся к ультраосновным разновидностям нормальной щелочности калиево-натриевого типа (табл. 1).

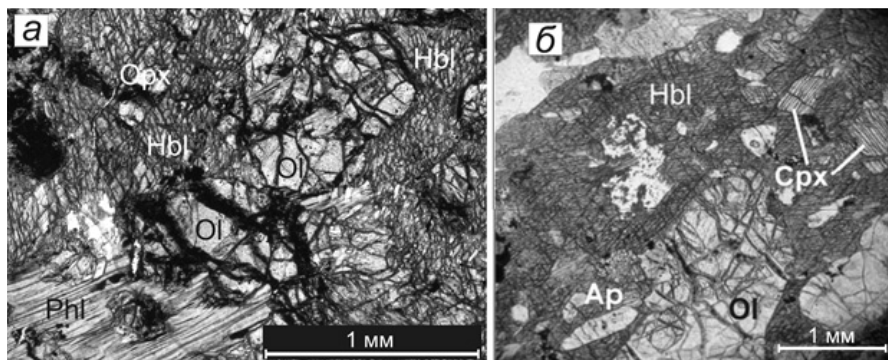


Рис. 1. а – куртландиты (район рудопроявления Аннабергитовая щель, фото в проходящем свете): видна пойкилитовая структура – округлые выделения оливина и вытянутые – ортопироксена в крупных ксеноморфных кристаллах роговой обманки и флогопита, по трещинам в кристаллах оливина развивается серпентин с пылевидными выделениями магнетита; б – шрисгеймиты (фото в проходящем свете, заимствовано из [26]). Подписи на рисунках: Hbl – роговая обманка, Ol – оливин, Cpx – клинопироксен, Phl – флогопит, Ap – апатит

Особенностями куртландитов являются присутствие ильменита, графита, отсутствие первичного магнетита, а также повышенное содержание титана в паргасите [27]. Ортопироксен представлен бронзитом. В оливинах куртландитов (Fo 72–84) с магматогенной сульфидной

Особенности роговообманковых и флогопитовых перидотитов Камчатки различной формационной принадлежности

Геол. подразд.	Кортландит-норитовая		Дунит-клинопироксенит-габбровая		
	Дуковский плутонический комплекс	Кортландит (слой 15 интрузива Восточное Геофизического, Шанучское рудное поле, по [19])	Левондариновский ряд плутонических комплексов	Шригеймит (по [26])	
Минеральный состав пород и особенности породобразующих минералов	рог. обм.	обыкновен. рог. обм., паргасит	паргасит	парагсит – ферро-гастингоит	эденит
	оливин	Fo 72-77	Fo 82-84	Fo 83-94	Fo 84-85
	флогопит	Fe# 32	Fe# 19	Fe# 17-24	Fe# 20
	ортопироксен	Fe# 21-26	Fe# 12-18		
	клинопироксен	диопсид, Cr ₂ O ₃ -0,48 масс. %		диопсид, Cr ₂ O ₃ -0,5 масс. %	диопсид, Cr ₂ O ₃ -0,46 масс. %
	апатит	+	+	+	+
	сульфиды	+	+		
	шпинелиды	хромистая шпинель (содер. Zn)	хромистая шпинель (содер. Zn)	хромит	магнетит, хроммагнетит
	гранат			андрадит-гроссуляр	
	ильменит	+			
Минеральный состав пород, ее особенности	плагиоклаз	анортит			
	Кумулусные оливин, ортопироксен и клинопироксен, интерстициальные – роговая обманка, флогопит и плагиоклаз [7].	Пойкилитовая. Рог. обм. включает зерна оливина и ортопироксена.	Пойкилитовая. Рог. обм. включает зерна оливина, пироксена, флогопита, шпинели, в единичных случаях граната и фторапатита.	Пойкилитовая. Крупные выделения рог. обм. и флогопита содержат округлые вросстки оливина. Рог. обм. содержит пойкилитовые вросстки флогопита.	

Содер. Ni в оливине, масс. %	Преимущественно ниже чувствительности метода анализа	Среднее: 0,4 (по данным 4 анализов)	Среднее: 0,15 (по данным 8 анализов)
Содерж. в породе, г/т	Ni	1210	953
	Co	140	56
	Cu	200	47
Содержания породообразующих оксидов			
Кол-во анализов	21	1	4
SiO ₂ , масс. %	43,78 (35,78-48,99)*	42,5	44,24 (41,00-47,80)
TiO ₂ , масс. %	0,68 (0,21-1,80)	0,32	0,39 (0,26-0,6)
Al ₂ O ₃ , масс. %	7,27 (4,00-11,83)	7,37	6,01 (4,72-7,9)
Fe _{об} , масс. %	11,8 (8,32-15,00)	8,84	6,93 (5,26-8,25)
MnO, масс. %	0,16 (0,06-0,23)	0,13	0,16 (0,12-0,17)
MgO, масс. %	24,13 (13,40-34,95)	29,9	29,3 (24,8-34)
CaO, масс. %	5,54 (1,48-10,79)	6,17	5,20 (4,00-6,3)
Na ₂ O, масс. %	0,81 (0,16-1,38)	0,26	1,11 (0,65-1,4)
K ₂ O, масс. %	0,37 (0,06-0,82)	0,22	1,85 (1,59-2,1)
P ₂ O ₅ , масс. %	0,1 (0,03-0,37)	0,1	0,2 (0,14-0,24)
Na ₂ O+ K ₂ O	1,16 (0,22-1,97)	0,48	2,96 (2,55-3,20)
Na ₂ O/K ₂ O	2,10 (0,10-4,33)	1,18	0,55 (0,34-0,78)
* Примечание. Первое число – среднее, в скобках – минимальное и максимальное значения.			

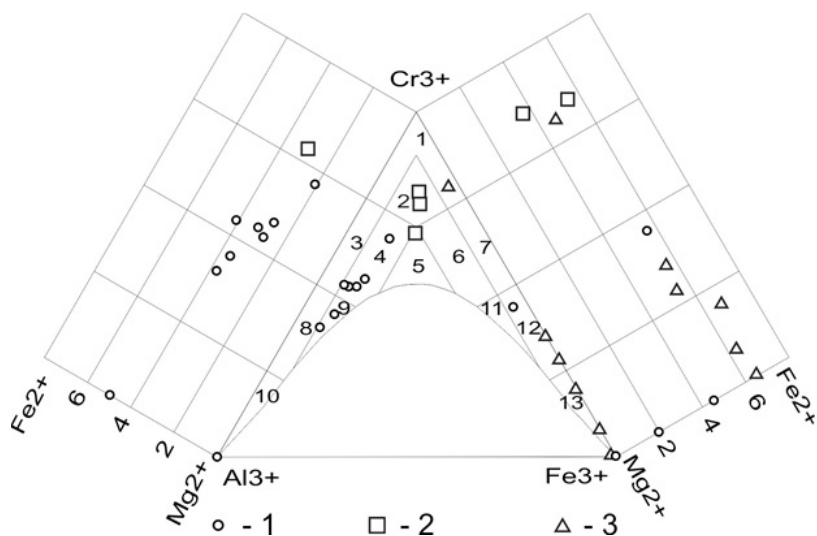


Рис. 2. Классификация рудных хромшпинелидов на основе диаграммы Н. В. Павлова: 1 – кортландиты; 2 – шрисгеймиты, 3 – сциелиты. Цифры в полях на треугольнике обозначают разновидности шпинелидов. Разновидности хромита: 1 – хромит, 2 – субферрихромит, 3 – алюмохромит, 4 – субферриалюмохромит, 5 – субферрисубалюмохромит, 6 – субалюмоферрихромит, 7 – феррохромит; разновидности пикотита (ряд шпинель-герцинит): 8 – хромпикотит, 9 – субферрихромпикотит, 10 – пикотит; разновидности магнетита: 11 – субалюмо-хроммагнетит, 12 – хроммагнетит, 13 – магнетит. Разновидности хромшпинелидов по формульным коэффициентам ионов Fe^{2+} : магно- (0–2), магнезиальные (2–4), железистые (4–6), ферро- (6–8)

минерализацией содержание изоморфного никеля преимущественно низкое, либо резко неравномерное, бимодальное, что объясняется высоким коэффициентом его разделения между сульфидами и силикатами в процессе рудообразования. По классификации Н. В. Павлова составы шпинелидов варьируют от магнезиальных субферриалюмохромитов до магнезиальных субферрихромпикотитов.

На рис. 3, а, б, в, г, д представлены соотношения катионов в шпинелидах. Фигуративные точки составов в координатах Mg–Al, Mg–Cr и Fe(II)–Al и Fe(II)–Cr (формульные единицы) образуют единые тренды. Прямую зависимость Mg–Al и обратную Fe(II)–Al можно рассматривать как результат наличия шпинелевого минала, прямую Fe(II)–Cr и обратную Mg–Cr – как присутствие хромитового минала. Область, занимаемая фигуративными точками в координатах (Cr+Al)–Zn образует конфигурацию, которую можно интерпретировать как результат совмещения двух полей (рис. 3, д). Первое, с обратной зависимостью,

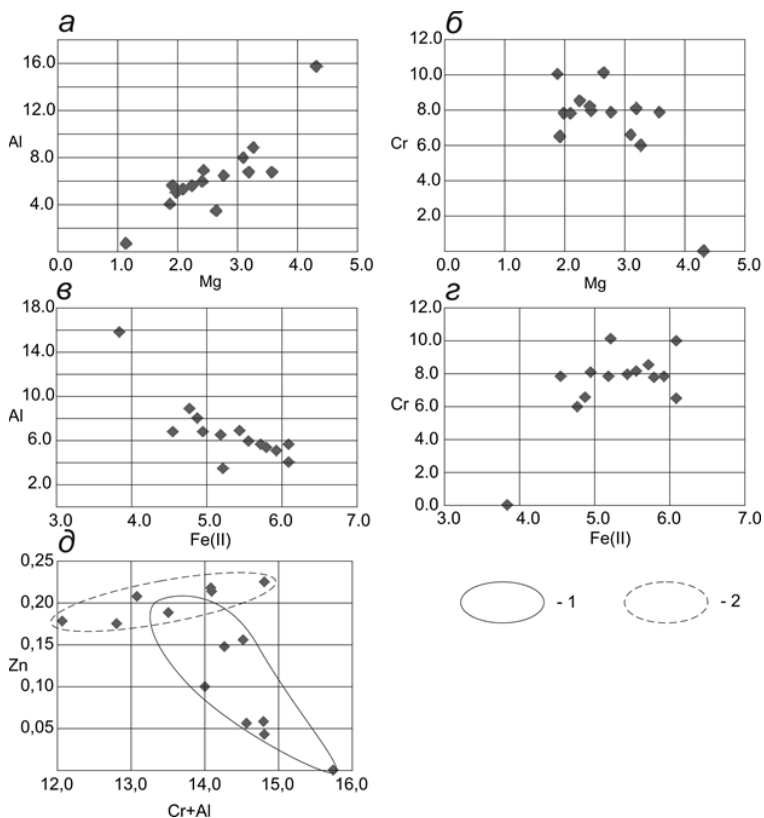


Рис. 3. Соотношения катионов в шпинелидах кортландитов (формульные коэффициенты): Mg–Al (а), Mg–Cr (б) Fe(II)–Al (в), Fe(II)–Cr (г); (Cr+Al)–Zn (д)

вероятно, указывает на наличие франклинитового минала, второе, с прямой – ганитового. Следовательно, шпинелиды кортландитов представляют собой минералы ряда шпинель – хромит, где некоторый избыток Fe(II) при недостатке Cr присутствует в виде ганитового минала. Характерное повышенное содержание цинка [27], возможно, обусловлено наличием как ганитового, так и франклиникового миналов.

Шрисгеймиты и флогопитовые перидотиты (сциелиты). Шрисгеймиты установлены в Валагинском хребте [26], флогопитовые перидотиты (сциелиты) – в бассейне р. Правая Лесная [1, 12]. Породы слагают дайки, мощность которых составляет первые метры. Шрисгеймиты представляют собой массивные породы темно-серого цвета, с крупно-среднезернистой, пойкилитовой структурой (рис. 1, а, таблица). Сложены крупными кристаллами роговой обманки паргасит-гастингситового ряда, которые включают зерна оливина (Fo 83–94),

диопсида и флогопита. Акцессорные минералы – шпинелиды (субферрихромит субферрисубальюмохромит, рис. 3), в единичных случаях отмечены гранат и фторапатит. Встречаются участки пироксенитового состава и сростки амфибола с пироксеном. Оливин в значительной степени замещается серпентином, клинопироксен практически не изменен [26]. Породы относятся к ультраосновным разностям нормальной щелочности калиево-натриевого типа (таблица).

Сциелиты представляют собой темно-зеленовато-серые, массивные породы, покрытые блестящими чешуйками слюды на сколах. Структура средне-крупнозернистая, пойкилитовая (таблица). Сложены крупными кристаллами роговой обманки эденитового ряда и флогопита, которые включают округлые пойкилитовые вростки оливина (Fo 84–85), иногда диопсида. Роговая обманка, кроме того, содержит пойкилитовые вростки флогопита. В качестве акцессорных минералов отмечены хлорапатит (содержит до 0,5 мас.% церия), а также зерна шпинелидов (ферро- и железистые хромит, хроммагнетит, рис. 3). Зерна оливина разбиты трещинами, замещаются серпентином, хлоритом и тонкими выделениями магнетита [1]. Породы относятся к ультраосновным разностям с калиевым типом щелочности (таблица).

Сходство и различия шрисгеймитов, сциелитов и никеленосных кортландитов. Перечисленные породы близки по макрокомпонентному химическому составу (таблица), при этом флогопитовые перидотиты (сциелиты) закономерно отличаются немного повышенным содержанием щелочей и калиевым типом щелочности от шрисгеймитов и кортландитов, которые относятся к ультраосновным разностям нормальной щелочности калиево-натриевого типа. Для кортландитов (безрудных разностей) характерно относительно повышенное содержание никеля, меди и кобальта. При внешнем подобии структур и породообразующих минералов, шрисгеймиты и сциелиты отличаются от никеленосных кортландитов отсутствием ортопироксенов, составами роговых обманок, несколько большей магнизиальностью оливинов, их шпинелиды представлены хромитом, хроммагнетитом и магнетитом и не содержат примеси цинка. Для шрисгеймитов характерно относительно высокое содержание никеля в оливинах. Состав шпинелидов из кортландитов изменяется от хромистого герцинита до хромистой шпинели, их характерной особенностью является повышенная концентрация цинка [27].

Заключение

Проведен сравнительный анализ петрографических, минералогических и геохимических особенностей роговообманковых и флогопитовых перидотитов различной формационной принадлежности,

встречающихся в Камчатском регионе. Рассмотрены сходство и отличия кортландитов никеленосной норит-кортландитовой формации от шрисгеймитов и сциелитов, отмеченных в составе левоандриановского ряда плутонических комплексов [20] дунит-клинопироксенит-габбровой формации, продуктивной на платиноиды и медь. В целом, для перечисленных пород характерно залегание в виде пластообразных тел небольшой мощности, сходные микроструктуры, близкий минеральный и макрокомпонентный химический состав. В наибольшей степени они различаются особенностями составов породообразующих минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмаков Ю. А., Новаков Р. М., Трунин И. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Западно-Камчатская. Лист О-57-V, VI. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. – 187 с.
2. Геологический словарь: в 2-х томах / Х. А. Арсланова, М. Н. Голубчина, А. Д. Искандерова и др.; под ред. К. Н. Паффенгольца. – 2-е изд., испр. – М.: Недра, 1978.
3. Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, перераб. и доп. / Гл. ред. О. В. Петров. Т. 2. К–П. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. – 480 с.
4. Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов. Рекомендации Подкомиссии по систематике изверженных пород международного союза геологических наук. Пер. с англ. С. В. Ефремовой. – М.: Недра, 1997. – 248 с.
5. Колосков В. А., Флеров Г. Б., Коваленко Д. В. Позднемеловые-палеоценовые магматические комплексы Центральной Камчатки: геологическое положение, особенности вещественного состава // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28. – № 4. – С. 16–34.
6. Конников Э. Г., Некрасов А. Н., Орсов Д. А., Янь Хонцуань, Слаогуо Чи Гранатсодержащие базиты Кувалорогского массива Камчатки // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 5. – С. 595–612.
7. Конников Э. Г., Чубаров В. М., Полетаев В. А., Бухтияров П. Г. Новые данные о структуре и геохимии Дукукского габбро-норит-кортландитового массива Камчатки // Тихоокеанская геология. – 2010. – т. 29. – № 6. – С. 13–25
8. Корякско-Камчатский регион – новая платиноносная провинция России. Коллектив авторов. – СПб.: Изд-во картфабрики ВСЕГЕИ, 2002. – 383 с.
9. Марковский Б. А. Крайне-океанический тип рифтогенного ультрамафит-мафитового магматизма Азиатско-Тихоокеанской транзитали // Геология и металогения ультрамафит-мафитовых и гранитоидных интрузивных ассоциаций складчатых областей. X Чтения А. Н. Заварицкого 21–22 сентября 2004 г. Материалы международной научной конференции. – Екатеринбург. – 2004. – С. 44–48.
10. Марковский Б. А., Сидоров Е. Г. Парагенезис дунит-клинопироксенитовых и пироксенит-габброидных комплексов // Петрология и металогения базит-гипербазитовых комплексов Камчатки. Тез. докл. науч. сессии Камчатского отделения ВМО. – Петропавловск-Камчатский. – 2000. – С. 36–38.

11. Марковский Б. А., Ротман В. К. Геология и петрология ультраосновного вулканизма. – Л: Недра, 1981. – 247 с.
12. Новаков Р. М., Бурмаков Ю. А., Сидоров М. Д. Геологическое строение, вещественный состав и возраст массивов габбродиорит-монцитонитового комплекса в верховьях р. Правая Лесная (Камчатка) // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск. – 2000. – С. 67.
13. Петрографический кодекс. Магматические и метаморфические образования. Под ред. Н. П. Михайлова. – СПб.: Издание ФГУП «ВСЕГЕИ», 1995. – 128 с.
14. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание 3. Под ред. О. А. Богатикова, А. Ф. Морозова, О. В. Петрова. – СПб.: Издание ФГУП «ВСЕГЕИ», 2009. – 160 с.
15. Петрографический словарь. Под ред. Ф. Ю. Левинсон-Лессинга, Э. А. Струве. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 448 с.
16. Полетаев В. А. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения и рудопроявления перидотит-пироксенит-норитовой формации Центральной Камчатки // Платина России. – Т. III. – Кн. 2. – М.: «Геоинформмарк», 1999. – С. 191–199.
17. Полетаев В. А. Камчатская платиноидно-никеленосная зона – геология и рудоносность: Автореф. дисс. ... канд. геол. – минер. наук: 25.00.11 – М. – 2004. – 22 с.
18. Ротман В. К. Общие черты магматизма внутренней части северо-западного сектора Тихоокеанского подвижного пояса // Советская геология. – 1971. – № 10. – С. 42–53.
19. Селянгин О. Б. Кортландит-амфиболовый пироксенит-горнблендитовая серия расслоенного никеленосного интрузива Восточно-Геофизический, Шанучское рудное поле, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2006. – №2. – Вып. № 8. – С. 9–28.
20. Слядnev Б. И., Шаповаленко В. Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Камчатская. Лист N–57 – Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. – 187 с.
21. Тарарин И. А., Чубаров В. М., Игнатьев Е. К., Москалева С. В. Геологическая позиция, минералогия и платиноидная минерализация медно-никелевых рудопроявлений Квинумского рудного поля Срединного хребта Камчатки // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26. – №1. – С. 94–110.
22. Трухин Ю. П., Сидоров М. Д., Степанов В. А., Кунгурова В. Е. Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива // Геология и разведка. – 2009. – №6. – С. 43–49.
23. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д. Камчатская никеленосная провинция // ДАН РФ. – 2008. – Т. 418. – № 6. – С. 802–806.
24. Флеров Г. Б., Колосков А. В. Щелочной базальтовый магматизм Центральной Камчатки. – М.: Наука, 1976. – 158 с.
25. Флеров Г. Б. К проблеме ультраосновных магм и высококалиевых базальтоидов // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 28-31 марта 2007 г. – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. – Петропавловск-Камчатский. – 2007. – С. 330–337.

26. Флеров Г. Б., Чубаров В. М. К проблеме «водности» ультраосновной магмы // Материалы конференции, посвященной дню вулканолога 30-31 марта, 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2009. – С. 92–100

27. Чубаров В. М. Цинксодержащие шпинели никеленосных базитовых интрузий Центральной Камчатки. Новые данные по петрологии магматических и метаморфических пород Камчатки / Ред. Ю. А. Мартынов. – Владивосток: ДВО АН СССР. – 1989. – С. 157–167.

28. Щека С. А., Чубаров В. М. Никеленосные кортландиты Камчатки // Изв. АН СССР. Сер. Геол. – 1987. – №12. – С. 50–61. **VIAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Новаков Роман Михайлович*¹ – старший научный сотрудник, brom6@mail.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук;

Чубаров Валерий Михайлович, старший научный сотрудник, zond@kscnet.ru, Институт вулканологии и сейсмологии, Дальневосточного отделения Российской Академии Наук;

*Кунгурова Валентина Егоровна*¹, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, kunwe@rambler.ru;

¹ Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 5–17.

R. M., Novakov, V. M. Chubarov, V. Ye. Kungurova

HORNBLLENDE AND PHLOGOPITE PERIDOTITES OF MAFITE-ULTRAMAFITE FORMATIONS OF KAMCHATKA

Geochemical, mineralogical and petrographic peculiarities of hornblende and phlogopite peridotites from plutonic complexes of Kamchatka of different formational belongings were considered. Features of similarity and differences between the cortlandites of the Dukuk complex of the nickeliferous norite-kortlandite formation of Kamchatka with hornblende and phlogopite peridotites associated with the levoandrianovsky series of plutonic complexes of the dunite-clinopyroxenite-gabbro formation were examined.

Key words: Kamchatka, hornblend peridotites, coortlandites, copper, nickel, sulphides.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-5-17

AUTHORS

*Novakov R. M.*¹, Senior Researcher, brom6@mail.ru;

Chubarov V. M., Senior Researcher, zond@kscnet.ru, Institute of Volcanology and Seismology Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia;

Kungurova V. Ye. ¹, Candidate of Geological and Mineralogical Science, Leading Researcher, kunwe@yandex.ru;

¹ Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Burmakov Yu.A., Novakov R. M., Trunin I. V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoj Federacii masshtaba 1:200 000* (State geological map Russian Federation, scale 1:200 000). Izdanie vtoroje. Seriya Zapadno-Kamchatskaya. List O-57-V, VI. Ob»yasnitel'naya zapiska. Saint Peterburg.: VSEGEI, 2007. 187 p.
2. *Geologicheskij slovar: v 2-h tomah* (Geological dictionary: in 2 volumes). H. A. Arslanova, M. N. Golubchina, A. D. Iskanderova i dr.; pod red. K. N. Paffengol'ca. 2-e izd., ispr. Moscow: Nedra, 1978.
3. *Geologicheskij slovar* (Geological dictionary). V treh tomah. Izdaniye tret'ye, pererab. I dop. / Gl. red. O. V. Petrov. T. 2. K–P. Saint Peterburg: Izd-vo VSEGEI, 2011. 480 p.
4. *Klassifikaciya magmaticheskikh (izverzhennyh) porod i slovar terminov. Rekomendacii Podkomissii po sistematike izverzhennyh porod mezhdunarodnogo soyuza geologicheskikh nauk* (Classification of magmatic (igneous) rocks and Glossary of terms. Recommendations of the Subcommission on the systematics of igneous rocks of the international Union of geological Sciences). Per. s angl. S. V. Efremovoy. Moscow: Nedra, 1997. 248 p.
5. Koloskov V. A., Flerov G. B., Kovalenko D. V. *Tihookeanskaya geologiya*. 2009. T. 28. no 4. pp. 16–34.
6. Konnikov E. G., Nekrasov A. N., Orsoev D. A., Yan Honcuan, Slaoguo Chi. *Geologiya i geofizika*. 2009. T. 50. no 5. pp. 595–612.
7. Konnikov E. G., Chubarov V. M., Poletaev V. A., Buhtiyarov P. G. *Tihookeanskaya geologiya*. 2010. t. 29. no 6. pp. 13–25
8. *Koryaksko-Kamchatskij region – novaya platinonosnaya provinciya Rossii* (The Koryak-Kamchatka region – a new platinum province of Russia. The team of authors). Kollektiv avtorov. Saint Peterburg: Izd-vo kartfabriki VSEGEI, 2002. 383 p.
9. Markovskij B. A. *Okrainno-okeanicheskij tip riftogennogo ultramafit-mafitovogo magmatizma Aziatsko-Tihookeanskoy tranzitali* (Marginal back-arc type rifting ultramafite-mafite magmatism in the Asia-Pacific transitory). *Geologiya i metallogeniya ul'tramafit-mafitovyh i granitoidnyh intruzivnyh asociacij skladchatyh oblastej*. X Chteniya A. N. Zavarickogo 21–22 sentyabrya 2004 g. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoj konferencii. Ekaterinburg. 2004. pp. 44–48.
10. Markovskij B. A., Sidorov E. G. *Paragenezis dunit-klinopiroksenitovyh i piroksenit-gabbroidnyh kompleksov* (Paragenesis of dunite-clinopyroxenite and pyroxenite-gabbroid complexes). *Petrologiya i metallogeniya bazit-giperbazitovyh kompleksov Kamchatki*. Tez. dokl. nauch. sessii Kamchatskogo otdeleniya VMO. Petropavlovsk-Kamchatskij. 2000. pp. 36–38.
11. Markovskij B. A., Rotman V. K. *Geologiya i petrologiya ul'traosnovnogo vulkanizma* (Geology and Petrology of ultramafic volcanism). Leningrad: Nedra, 1981. 247 p.
12. Novakov R. M., Burmakov Yu.A., Sidorov M. D. *Geologicheskoe stroenie, veschestvennyj sostav i vozrast massivov gabbrodiorit-monconitovogo kompleksa v verhovyah r. Pravaya Lesnaya (Kamchatka)* (Geological structure, material composition and age arrays gabbrodiorit-Moncontour complex in the upper river Pravaya Lesnaya (Kamchatka)). Materialy regionalnoj konferencii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii. Tomsk. 2000. P. 67.
13. *Petrograficheskij kodeks. Magmaticheskie i metamorficheskie obrazovaniya* (Petrographic code. Igneous and metamorphic formations). Pod red. N. P. Mihaylova. Saint Peterburg: Izdanie FGUP «VSEGEI», 1995. 128 p.
14. *Petrograficheskij kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* (Petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact of education). Izdanie 3. Pod red. O. A. Bogatikova, A. F. Morozova, O. V. Petrova. – Spb.: Izdanie FGUP «VSEGEI», 2009. 160 p.

15. *Petrograficheskiy slovar* (Petrographic dictionary). Pod. red F. Yu. Levinson-Lessinga, E. A. Struve. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1963. 448 p.
16. Poletaev V. A. *Sul'fidnye platinoidno-medno-nikelevye mestorozhdeniya i rudoproyavleniya peridotit-piroksenit-noritovoy formatsii Tsentralnoj Kamchatki* (Sulfide platinoid-copper-Nickel deposits and occurrences of peridotite-pyroxenite-noritoshi formation of Central Kamchatka). Platina Rossii. T.III. Kn. 2. Moscow: ZAO «Geoinformmark», 1999. pp. 191–199.
17. Poletaev V. A. *Kamchatskaya platinoidno-nikelenosnaya zona – geologiya i rudonosnost'* (Kamchatka platinoid-Nickel zone – Geology and ore potential): Avtoref. diss. ... kand. geol.-miner. nauk: 25.00.11. Moscow, 2004. 22 p.
18. Rotman V. K. *Sovetskaya geologiya*. 1971. no 10. pp. 42–53.
19. Selyangin O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2006. no 2. Vyp. no 8. pp. 9–28.
20. Slyadnev B. I., Shapovalenko V. N. i dr. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoj Federacii masshtaba 1:1000 000 (trete pokolenie)* (State geological map Russian Federation, scale 1:1000 000 (third generation)). Seriya Koryaksko-Kamchatskaya. List N–57. Petropavlovsk-Kamchatskiy. Ob'yasnitel'naya zapiska. Saint Peterburg: VSEGEI, 2007. 187 p.
21. Tararin I. A., Chubarov V. M., Ignat'yev E. K., Moskaleva S. V. *Tihookeanskaya geologiya*. 2007. T. 26. no 1. pp. 94–110.
22. Truhin Yu.P. Stepanov V. A., Kungurova V. E. *Geologiya i razvedka*. 2009. no 6. pp. 43–49.
23. Truhin Yu.P. Stepanov V. A., Sidorov M. D. *DAN RF*. 2008. T. 418. no 6. pp. 802–806.
24. Flerov G. B., Koloskov A. V. *Schelochnoj bazaltovyy magmatizm Centra'noy Kamchatki* (Alkaline basaltic magmatism in Central Kamchatka). Moscow: Nauka, 1976. 158 p.
25. Flerov G. B. *K probleme ul'traosnovnyh magm i vysokokalievyyh bazaltoidov* (To the problem of ultrabasic magmas and high-potassium basaltoids). Materialy ezhegodnoj konferencii, posvyaschennoj Dnyu vulkanologa 28-31 marta 2007 g. Institut vulkanologii i seismologii DVO RAN. Petropavlovsk-Kamchatskiy. 2007. pp. 330–337.
26. Flerov G. B., Chubarov V. M. *K probleme «vodnosti» ul'traosnovnoj magmy* (To the problem of «water» ultramafic magma). Materialy konferencii, posvyaschennoj dnyu vulkanologa 30–31 marta, 2009 g. Petropavlovsk-Kamchatskiy: IVIS DVO RAN. 2009. pp. 92–100.
27. Chubarov V. M. *Cinksoderzhaschie shpineli nikelenosnyh bazitovyh intruzij Centralnoj Kamchatki. Novye dannye po petrologii magmaticheskikh i metamorficheskikh porod Kamchatki* (Zinc-containing spinel Nickel mafic intrusions of Central Kamchatka. New data on Petrology of igneous and metamorphic rocks of Kamchatka). Red. Yu.A. Martynov. Vladivostok: DVO AN SSSR. 1989. pp. 157–167.
28. Scheka S. A., Chubarov V. M. *Izv. AN SSSR. Ser. Geol.* 1987. no 12. pp. 50–61.



СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ И РУДНЫХ МИНЕРАЛАХ МАФИТ- УЛЬТРАМАФИТОВЫХ ФОРМАЦИЙ КАМЧАТКИ

Проведена оценка и сравнительный анализ содержаний никеля в минералах руд и пород различных плутонических мафит-ультрамафитовых формаций Камчатки и ассоциирующих с ними вулканических и гипабиссальных образований основного и ультраосновного состава. Выявлены особенности составов минералов из образований различной формационной принадлежности в отношении содержаний никеля.

Ключевые слова: Камчатка, плутонические формации, минералы, никель, сульфиды, самородные металлы, оливины, шпинелиды.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-18-29

Введение

На Камчатке известны три типа мафит-ультрамафитовых плутонических формаций, с которыми связана никелевая минерализация: норит-кортландитовая, дунит-гарцбургит-габбровая и дунит-клинопироксенит-габбровая. С плутоническими комплексами этих формаций ассоциируют вулканогенные и гипабиссальные образования преимущественно основного, реже – ультраосновного состава, в которых также отмечается никелевая минерализация.

Норит-кортландитовая формация представлена интрузиями гранатсодержащих диоритов, диоритов, норитов, габброноритов, ортопироксенитов, горнблендитов и куртландитов, развитых в пределах Камчатского срединного массива (КСМ) метаморфических пород [16, 17, 27]. С ними связаны месторождения и перспективные рудопроявления сульфидных кобальт-медно-никелевых руд (рис. 1). В пределах КСМ с интрузиями норит-кортландитовой формации пространственно ассоциируют интенсивно метаморфизованные образования алисторского вулканического и андриановского плутонического комплексов основного-ультраосновного состава, образующие изолированные поля. В них также отмечены пункты никелевой минерализации [24, 25].

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 18–29.

© Р.М. Новаков, 2017.

Дунит-гарцбургит-габбровая формация представлена массивами ранне-позднемелового возраста в пределах Восточно-Камчатской структурно-формационной зоны (СФЗ, рис. 1). В составе гипербазитовых массивов преобладают гарцбургиты, в меньшей степени распространены дуниты, встречаются пироксениты, вебстериты и рудные хромититы. Эпигенетические преобразования в основном проявляются в серпентинизации ультраосновных пород. С массивами дунит-гарцбургит-габбровой формации тесно связаны позднемеловые вулканы нижних частей разрезов вулканогенно-кремнистых толщ восточных хребтов, восточных полуостровов и острова Карагинский, которые вместе с плутоническими образованиями входят в состав офиолитовых ассоциаций [1, 8, 32]. На острове Карагинском и на полуострове Озерном (рис. 1) к блокам гипербазитов дунит-гарцбургит-габбровой формации в зонах серпентинитового меланжа приурочены содержащие никель проявления медно-колчеданных руд. В оливиновых вебстеритах из массива дунит-гарцбургит-габбровой формации на полуострове Камчатский Мыс известен пункт с самородно-сульфидной медно-никелевой минерализацией [1, 13, 14], которая в основном представлена пентландитом, медно-никелевыми сульфидами и самородной медью. В массивах дунит-гарцбургит-габбровой формации широко распространена аваритовая минерализация, связанная с серпентинитами.

Дунит-клинопироксенит-габбровая формация распространена в пределах Центрально-Камчатской и Восточно-Камчатской СФЗ (рис. 1). Представлена дифференцированными массивами дунитов, перидотитов, клинопироксенитов и габбро, умеренно-щелочных пироксенитов и габбро, монцогаббро, шонкинитов, монцонитов и сиенитов [24]. Умеренно-щелочные разности рассматриваются как более поздние образования [2, 8, 12], с ними ассоциируют позднемеловые вулканы основного и ультраосновного состава нормального, умеренно-щелочного и щелочного подотрядов [2, 8, 9, 10, 24, 30, 31], а также дайки шрисгеймитов [9; 28], флогопитовых перидотитов [2, 8, 18, 12, 24]. Никелевая минерализация представлена ассоциирующими с платиноидами аваритами и никелевыми серпентинами непуит-лизардитового ряда, содержащими до 26,96 масс.% никеля [21]. В различной степени измененных ультраосновных вулканитах, связанных с телами дунит-клинопироксенит-габбровой формации [9], отмечены эпигенетические миллерит и пентландит [19].

Прочие проявления никелевой минерализации. Убогая сульфидная никелевая минерализация установлена также в интрузиях юрчического габброноритового комплекса, который развит в пределах

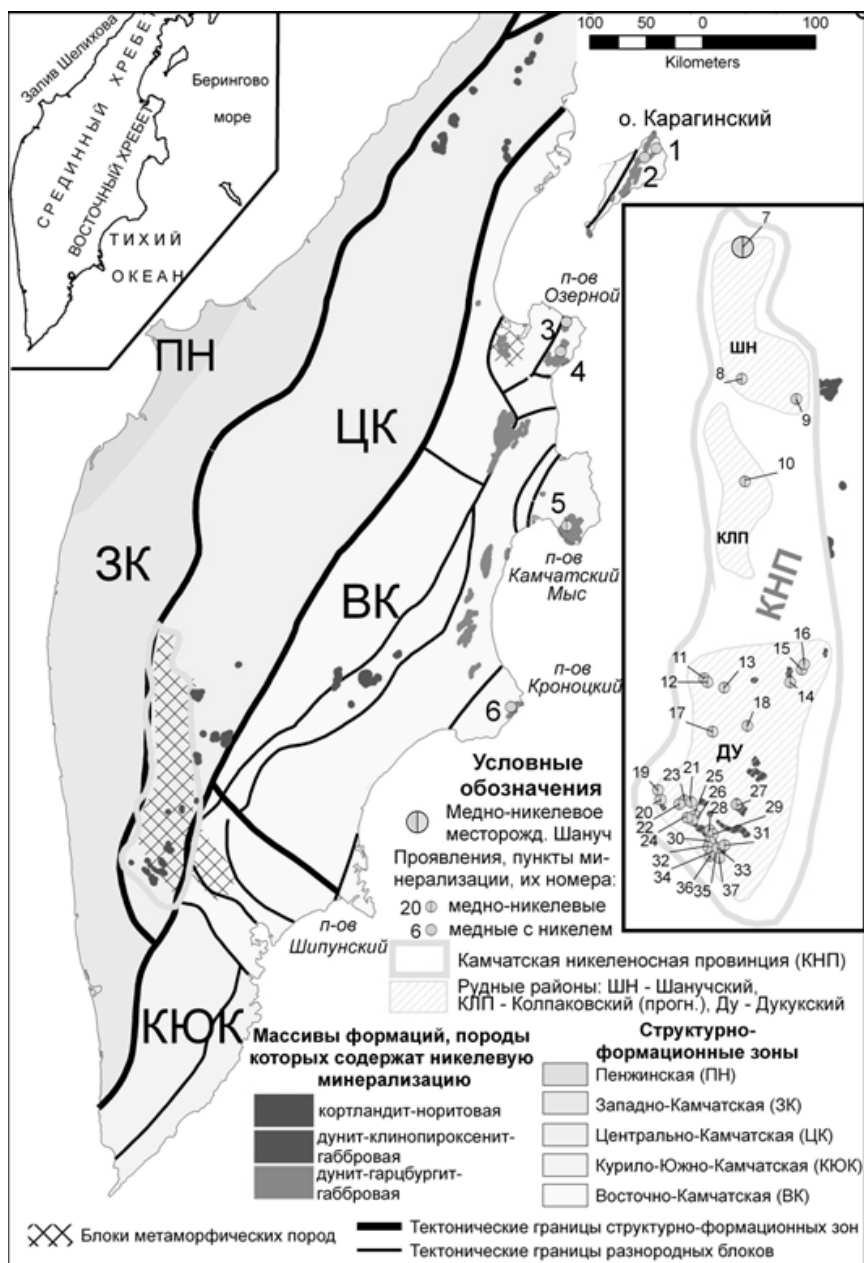


Рис. 1. Схема расположения массивов мафит-ультрамафитовых формаций Камчатки, проявлений и пунктов никелевой минерализации (по [4, 23, 24] с изменениями)

ганальского блока метаморфических пород. В ряде случаев, комплекс сопоставляют с образованиями никеленосной норит-кортландитовой формации [3]. Вместе с тем, юрчицкие интрузии отличаются от них по ряду минералогических, геохимических и геофизических характеристик [5, 22].

Минералы никеля мафит-ультрамафитовых формаций Камчатки представлены сульфидами и их аналогами (сульфоарсенидами, арсенидами, теллуридами, антимонидами и сульфоантимонидами), самородными металлами и сплавами, интерметаллическими соединениями, арсенатами, сульфатами и никельсодержащими серпентинами (табл. 1). Незначительное (до первых процентов) количество изоморфного никеля содержится в магматогенных минералах групп хромита-магнетита и оливина, а также в ряде сульфидов, самородных металлов и сплавов преимущественно гидротермального и гидротермально-метасоматического происхождения. Наибольшее разнообразие никельсодержащих минералов связано с норит-кортландитовой формацией. При этом сульфиды установлены в образованиях всех формаций, а самородные фазы характерны только для ультрамафитов дунит-гарцбургит-габбровой и дунит-клинопироксенит-габбровой. Оценка содержания никеля в минералах переменного состава выявила типоморфные особенности одинаковых минеральных видов из руд и пород различной формационной принадлежности.

Сульфиды и самородные фазы. Пентландиты и аваруиты из оливиновых вебстеритов дунит-гарцбургит-габбровой формации отличаются от аналогичных минералов из серпентинитов низким содержанием никеля (табл. 2), а также присутствием меди и отсутствием кобальта. В массивах дунит-клинопироксенит-габбровой формации содержание никеля в аваруитах составляет 68,4 масс.%. В качестве примеси он отмечается в платиноидах. Наиболее высокое содержание зафиксировано в тетраферроплатине – до 10,4 масс.% и в туламините – до 2,8 масс.% (данные по платиноносным массивам Корякии [21]). Признаком принадлежности сульфидов переменного состава (пентландитов, пирротинов и пиритов) к никеленосным интрузиям норит-кортландитовой формации является сравнительно высокое содержание никеля (табл. 2).

Оливины и шпинелиды. Концентрация никеля в оливинах (до 0,33 масс.%) и шпинелидах (до 0,15 масс.%) из вулканогенных и гипабиссальных пород выше, чем в тех же минералах plutonic разностей (до 0,17 масс.%, (табл. 3). В plutonic породах наиболее высокое фоновое содержание никеля в оливинах типично для ультрамафитов дунит-гарцбургит-габбровой формации (0,17 масс.%).

В шпинелидах наибольшая концентрация никеля характерна для гипербазитов дунит-клинопироксенит-габбровых массивов. В шпинелевых фазах из плутонических пород других формаций она или ниже предела обнаружения метода анализа, или приближается к нему.

Таблица 1

Минералы никеля, установленные в породах и рудах Камчатского региона

Класс	Название минерала	Формула	ДГГ	ДКГ НР	НК	ДКГ УЩ	Генезис
Сульфиды	Гороманиит (?)	(Fe, Ni, Co, Cu) ₉ S ₈					Магматический
	Сугакиит (?)	Cu(Fe, Ni) ₈ S ₈	×				
	Пентландит	(Fe, Ni) ₉ S ₈	×	×	×	×	Магматический и гидротермальный
	Виоларит	(Ni,Fe) ₃ S ₄			×		
	Макиनावит	(Fe,Ni) ₉ S ₈			×		Гидротермальный
	Ni-пирит	(Fe,Ni)S ₂			×		
	Миллерит	NiS			×		
	Хизлевудит	Ni ₃ S ₂			×		
	Полидимит	Ni ₃ S ₄			×		
Зигенит	(Co,Ni) ₃ S ₄			×			
Сульфоарсениды	Герсдорфит	(Ni,Co,Fe)AsS			×		
Арсениды	Раммельсбергит	NiAs ₂			×		
	Сафлорит	(Co,Fe,Ni) As ₂			×		
	Никелин	NiAs			×		
Теллуриды, антимониды и сульфоантимониды	Мелонит	NiTe ₂			×		
	Брейгауптит	NiSb			×		
	Ульманит	NiSbAs			×		
Самородные элементы	Аваруит	Ni ₃ Fe	×	×			
	Аваруит	Ni ₂ Fe	×				
Силикаты	лизардит-непуит	(Ni,Mg) ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₂ ×6H ₂ O		×			
Сульфаты	Моренозит	NiSO ₄ ×7H ₂ O			×		Гипергенный
	Рётгерсит	NiSO ₄ ×6H ₂ O			×		
Арсенаты	Аннабергит	Ni ₃ [AsO ₄]×8H ₂ O			×		
<p>Примечание. × – наличие минерала. Формации (в заголовке таблицы): НК – норит-кортландитовая, ДГГ – дунит-гарцбургит-габбровая, ДКГ (НР) – дунит-клинопироксенит-габбровая (породы нормального ряда), ДКГ (УЩ) – дунит-клинопироксенит-габбровая (умеренно-щелочные разности пород).</p>							

Таблица 2

Оценка и сопоставление содержаний никеля в сульфидах и самородных металлах из пород и руд различных формаций

Магмат. формация	Класс или группа минералов	Название минералов	Примечание	Генезис	Кол-во анализов	Оценка фонового сод. Ni, масс. %	Среднее сод. Ni, масс. %	Медиана сод. Ni, масс. %	min Ni, масс. %	max Ni, масс. %	Станд. откл.	Коефф. фициент вар.	
Дунит-гарцбургит-габбровая	самородные металлы	аваруит	в серпент. в ол. вебст.	гидротер. магмат.	44	75,39	75,50	75,39	65,02	86,39	3,29	4,35	
		уайрауит		гидротер.	13	64,15	63,63	64,15	54,84	70,36	4,90	7,70	
		самор. медь		гидротер.	2	5,40	5,40		4,52	6,27			
	сульфиды	пентландит	включения в аваруите	гидротер.	10	2,59	3,00	2,59	0,51	6,36	2,33	77,57	
			в ол. вебст.	магмат.	14	29,97	29,98	29,97	24,22	34,69	2,95	9,86	
		в пикритах	магмат.	22	24,89	25,27	24,89	19,14	36,97	3,30	13,07		
		гороманит	в ол. вебст.	магмат.	4	24,89	18,49	24,89	17,73	19,54			
		сугакиит	в ол. вебст.	магмат.	8	20,24	18,95	20,24	8,49	25,63	5,94	31,35	
		пирротин	в ол. вебст.	магмат.	3	16,43	17,01	16,43	12,71	21,89	4,62	27,15	
		пирротин		магмат.	2	1,01	1,01		0,23	1,78			
Дунит-клинопироксенит-габбровая	самородные металлы	аваруит		гидротер.	35	68,42	65,42	68,42	21,59	72,25	9,13	13,96	
		уайрауит		гидротер.	3	1,48	1,21	1,48	0,41	1,73			
		самор. медь		гидротер.	3	0,55	0,83	0,55	0,39	1,54			
	сульфиды	пирротин		гидротер.	3	0,07			НПО	0,22			
		пирит		гидротер.	13	НПО			НПО	0,12			
кортландит-норитовая	сульфиды	пентландит	массивный вростки в пирротине	магмат.	74	34,10	32,08	34,10	11,56	38,68	5,59	17,43	
		аргентопентландит		магмат.	8	33,34	32,83	33,34	28,95	36,26	2,99	9,12	
		виоларит		гидротер.	7	19,58	20,13	19,58	18,90	23,11	1,53	7,58	
		пирит		гидротер.	110	28,53	28,74	28,53	13,59	35,85	4,15	14,44	
		пирротин		гидротер.	52	2,86	2,52	2,86	0,15	4,94	1,33	52,92	
			гексагон.	магмат.	83	1,72	1,86	1,72	0,18	5,46	0,79	42,47	
			монокл.	магмат.	21	0,64	0,68	0,64	0,02	2,14	0,54	80,17	

Примечание. НПО – ниже предела обнаружения.

В оливинах из пород с магматогенной сульфидной минерализацией распределение изоморфного никеля неравномерно, вне зависимости от формационной принадлежности, что объясняется высоким коэффициентом разделения никеля между сульфидами и силикатами в процессе рудообразования (рис. 2). В пределах одного образца в разных оливиновых зернах его содержание варьирует от значений ниже предела обнаружения метода анализа до 0,2–0,5 масс. %.

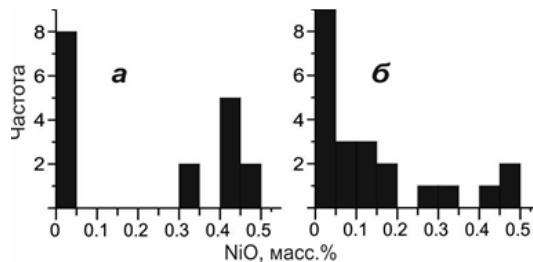


Рис. 2. Распределение NiO в оливинах пород с выраженной сульфидной минерализацией: коротландиты норит-кортландитовой формации (а), оливиновые вебстериты дунит-гарцбургит-габбровой формации (б)

Таблица 3

Оценка и сопоставление содержания изоморфной примеси никеля в оливинах, шпинелидах, оксидах и слюдах плутонических пород различной формационной принадлежности, а также вулканитов, ассоциирующих с массивами дунит-клинопироксенит-габбровой формации

Магм. форм. и ассоциир. Вулканиты	Класс или группа минералов	Название минералов	Кол-ч. анализов	оценка сод. Ni, масс. %	среднее сод. Ni, масс. %	медиана сод. Ni, масс. %	min Ni, масс. %	max Ni, масс. %	Станд. откл.	
вулканические породы										
вулканиты, ассоциир. с массивами дунит-клинопироксенит-габбровой форм.	оливина	форстерит	6	0,33	0,33	0,33	0,30	0,37	0,03	
		оливин	3	0,20	0,20		0,19	0,22		
	магнетита-хромита	субферриалюмохромит	1	0,15						
		субальюмоферрихромит	2	0,10	0,10		0,06	0,14		
		субферрисубальюмохромит	1	0,03						
		субферрихромит	3	0,03	0,04			0,09		
плутонические породы										
дунит-гарцбургит-габбровая	оливина	оливин	5	0,17	0,17	0,16	0,13	0,20	0,03	
		форстерит	78	0,14	0,14	0,14	0,01	0,27	0,05	
	магнетита-хромита	пикотит	12	0,01	0,02	0,01	—	0,07	0,03	
		алюмохромит	71	—	0,02	—	—	0,23		
дунит-клинопироксенит-габбровая	умеренно-щелочные различия	оливина	оливин	11	0,08	0,10	0,08	0,02	0,21	0,07
		магнетита-хромита	магнетит	3	—	0,01		—	0,04	
		слюд	флогопит	1	0,03					
	дуниты, клинопироксениты, габбро	оливина	форстерит	39	0,10	0,10	0,10	0,02	0,21	0,04
			оливин	142	0,07	0,08	0,07	0,00	0,24	0,06
		магнетита-хромита	субальюмохроммагнетит	21	0,12	0,12	0,12	0,04	0,30	0,06
			субферрисубальюмохромит	17	0,09	0,09	0,09	—	0,18	0,05
			магнетит	109	0,07	0,08	0,07	—	0,42	0,08
			субферриалюмохромит	2	0,07	0,07	—	—	0,14	
			субальюмоферрихромит	19	0,06	0,07	0,06	—	0,15	0,05
			хроммагнетит	10	0,02	0,03	0,02	—	0,12	0,04
		ильменита	ильменит	3	0,05	0,05		—	0,09	
		кортландит-норитовая	оливина	гиалосидерит	2	0,11	0,11		0,06	0,16
оливин	37			0,08	0,08	0,08	—	0,24	0,07	
магнетита-хромита	субферрихромпикотит		3	—	0,02		—	0,07		
слюд	флогопит		42	0,02	0,06	0,02	—	0,23	0,07	

Примечание. Составлено с использованием собственным данных, а также [6, 7, 8, 15, 20, 21, 26, 28].

Содержания никеля как в оливинах, так и в шпинелидах иногда повышаются вблизи сульфидных выделений, возможно, вследствие поздних диффузионных процессов или захвата микровыделений сульфидов в ходе аналитических исследований. Преимущественно низкое содержание никеля в оливинах пород с магматогенной сульфидной минерализацией показывает, что при наличии условий для отделения сульфидных фаз в ультрабазитах и ультрамафитах никель связывается в сульфиды, при отсутствии – изоморфно входит в состав силикатов и оксидов.

Заклучение

Особенностью минералов группы хромита-магнетита из пород норит-кортландитовой формации, кроме уже известной повышенной

концентрации цинка [33], является низкое (в основном ниже предела обнаружения) содержание никеля. В этом они сходны со шпинелидами из пород дунит-гарцбургит-габбровой формации. При этом, среднее содержание никеля в минералах группы оливина из пород дунит-гарцбургит-габбровой формации почти в два раза выше.

Химические составы породообразующих и рудных минералов отражают особенности формирования никелевой минерализации. Преимущественно низкое содержание никеля в оливинах пород с выраженной магматогенной сульфидной минерализацией, вне зависимости от формационной принадлежности показывает, что при наличии условий для отделения сульфидных фаз в ультрамафитах никель связывается в сульфиды, при отсутствии – изоморфно входит в состав силикатов и оксидов. Это объясняется высоким коэффициентом разделения никеля между сульфидами и силикатами в процессе магматогенного рудообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояринова М.Е., Вешняков Н.А., и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Восточно-Камчатская серия. Листы О-58-XXVI, XXXI, XXXII (Усть-Камчатск). Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. – 226 с.
2. Бурмаков Ю.А., Новаков Р.М., Трунин И.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Западно-Камчатская. Лист О-57-V, VI. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. – 187 с.
3. Карлузов А.А. Геология и петролого-геохимические особенности мафит-ультрамафитового массива Юрчик (Центральная Камчатка) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2008. – № 1. – С.72–74.
4. Карта полезных ископаемых Камчатской области масштаба 1: 500 000. Главные редакторы: А.Ф. Литвинов, М.Г. Патока (Камчатгеолком), Б.А. Марковский (ВСЕГЕИ). – СПб.: ВСЕГЕИ. – 1999.
5. Конников Э.Г., Некрасов А.Н., Родионов Н.В., Травин А.В., Полетаев В.А., Сидоров Е.Г., Чубаров В.М. Формационная принадлежность и возраст Юрчического массива (Камчатка) // Геохимия. – 2009. – № 11. – С. 1200–1211.
6. Конников Э.Г., Некрасов А.Н., Орсов Д.А., Хонцуань Янь, Слаогуо Чи Гранатсодержащие базиты Кувалорогского массива Камчатки // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 5. – С. 595–612.
7. Конников Э.Г., Полетаев В.А., Закревская О.Ю., Сидоров Е.Г., Ибрагимова Э.К. Геохимическая специфика ультраосновных лав Срединного хребта Камчатки / Э.Г. Конников, // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 435. – № 4. – С. 522–526.
8. Корякско-Камчатский регион – новая платиноносная провинция России. Коллектив авторов. – СПб.: Изд-во картфабрики ВСЕГЕИ, 2002. – 383 с.
9. Марковский, Б.А., Ротман В.К. Геология и петрология ультраосновного вулканизма. – Л: Недра, 1981. – 247 с.

10. Марковский, Б.А. Крайне-океанический тип рифтогенного ультрамафит-мафитового магматизма Азиатско-Тихоокеанской транзитали // Геология и металлогения ультрамафит-мафитовых и гранитоидных интрузивных ассоциаций складчатых областей. X Чтения А.Н. Заварицкого 21-22 сентября 2004 г. Материалы международной научной конференции. – Екатеринбург. – 2004. – С. 44–48.

11. Марковский Б. А., Сидоров Е.Г. Парагенезис дунит-клинопироксенитовых и пироксенит-габброидных комплексов // Петрология и металлогения базит-гипербазитовых комплексов Камчатки. Тез. докл. науч. сессии Камчатского отделения ВМО. – Петропавловск-Камчатский. – 2000. – С. 36–38.

12. Новаков Р.М., Бурмаков Ю.А., Сидоров М.Д. Геологическое строение, вещественный состав и возраст массивов габбродиорит-монзонитового комплекса в верховьях р. Правая Лесная (Камчатка) // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск. – 2000. – С. 67.

13. Новаков Р.М., Иванов В.В., Трухин Ю.П. Находка золото-платиноидно-медно-никелевой минерализации в оливиновых вебстеритах п-ова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка) // Никеленосные провинции Дальнего Востока: Матер. конференции с международным участием. – Петропавловск-Камчатский. – 2012. – С. 47–52.

14. Новаков, Р.М., Иванов В.В., Трухин Ю.П., Панова Е.Г. Медно-никелевая и благороднометалльная минерализация в оливиновых вебстеритах п-ова Камчатский мыс (Камчатка) // Вестник СПбГУ. – 2015. – Сер. 7. – Вып. 4. – С. 82–96.

15. Осипенко А.Б., Новаков Р.М. Хромитовая минерализация в ультрамафитах п-ова Камчатский Мыс (Камчатка) // Записки Всероссийского минералогического общества. – 2002. – № 2. – С. 84–98.

16. Полетаев В.А. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения и рудопроявления перидотит-пироксенит-норитовой формации Центральной Камчатки // Платина России. – Т.III. – Кн. 2. – М.: «Геоинформмарк», 1999. – С. 191–199.

17. Полетаев В.А. Камчатская платиноидно-никеленосная зона – геология и рудоносность: Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук: 25.00.11 – М. – 2004. – 22 с.

18. Ротман В.К. Общие черты магматизма внутренней части северо-западного сектора Тихоокеанского подвижного пояса // Советская геология. – 1971. – № 10 – С. 42–53.

19. Селиверстов В.А., Осипенко А.Б. Петрология родингитов Камчатки // ДВО РАН. Ин-т вулканологии. – Владивосток: Дальнаука. – 1999. – 156 с.

20. Сидоров Е.Г. Находка пикритов на о. Карагинском (Берингово Море) // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 297. – № 3. – С. 681–683.

21. Сидоров Е.Г., Козлов А.П., Толстых Н.Д. Гальмознанский базит-гипербазитовый массив и его платиноносность. – М.: Научный мир, 2012. – 286 с.

22. Сидоров М.Д., Степанов В.А. Геофизические поля и никеленосность Камчатского Срединного массива // Вестник КРАУНЦ, серия науки о Земле. – 2006. – №2. – Вып. №8. – С.140–150.

23. Слядnev Б.И., Боровцов А. К., и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000 000 (третье поколение). Серия Корьякско-Курильская. Лист О-58 – Усть-Камчатск. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. – 256 с.

24. Сляднев Б.И., Шаповаленко В.Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Камчатская. Лист N-57 – Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. – 187 с.

25. Тарарин, И.А., Чубаров В.М. Сульфидная медно-никелевая минерализация в метавулканитах андриановской свиты Срединно-Камчатского массива // Тихоокеанская геология. – 2004. – Т. 23. – № 6. – С. 76–83.

26. Тарарин И.А., Чубаров В.М., Игнатъев Е.К., Москалева С.В. Геологическая позиция, минералогия и платиноидная минерализация медно-никелевых рудопроявлений Квинумского рудного поля Срединного хребта Камчатки // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26. – №1. – С. 94–110.

27. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. Камчатская никеленосная провинция // ДАН РФ. – 2008. – Т. 418. – № 6. – С. 802–806.

28. Флеров Г.Б., Чубаров В.М. К проблеме «водности» ультраосновной магмы // Материал конференции посвященной дню вулканолога 30-31 марта, 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. – С. 92–100

29. Флеров, Г.Б. К проблеме ультраосновных магм и высококалийевых базальтоидов // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 28-31 марта 2007 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. – С. 330–337.

30. Флеров Г.Б., Селиверстов В.А. Мел-палеогеновый магматизм Срединного хребта Камчатки: проблема источников магм // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 2. – С. 1–14.

31. Флеров Г.Б., Колосков А.В. Щелочной базальтовый магматизм Центральной Камчатки. – М.: Наука. – 1976. – 158 с.

32. Хотин, М.Ю., Шапиро М.Н. Офиолиты Камчатского Мыса (Восточная Камчатка): строение, состав, геодинамические условия формирования // Геотектоника. – 2006. – № 4. – С. 61–89.

33. Щека, С.А., Чубаров В.М. Никеленосные кортландиты Камчатки // Изв. АН СССР. Сер. Геол. – 1987. – № 12. – С. 50–61. **МАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Новаков Роман Михайлович – старший научный сотрудник, brom6@mail.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 31), pp. 18–29.

R.M. Novakov

**NICKEL CONTENT IN ROCK-FORMING AND ORE MINERALS
OF MAFITE-ULTRAMAFITE FORMATIONS OF KAMCHATKA**

The estimation and comparative analysis of nickel contents in minerals of ores and rocks of various plutonic mafite-ultramafite formations of Kamchatka and volcanic and hypabyssal formations of the basic and ultrabasic composition associated with them were carried out. The peculiarities of the minerals composition from the formations of different formational belongings as regards nickel content were revealed.

Key words: Kamchatka, plutonic formations, minerals, nickel, sulphides, native metals, olivines, spinels.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-18-29

AUTHORS

Novakov R. M., Senior Researcher, 6rom6@mail.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Boyarinova M.E., Veshnyakov N.A., i dr. *Gosydarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000* (State geological map Russian Federation, scale 1:200 000). Izdanie vtoroe. Vostochno-Kamchatskaya seriya. Listy O-58-XXVI, XXXI, XXXII (Yst-Kamchatsk). Ob»yasnitel'naya zapiska. Saint Peterburg: VSEGEI, 2007. 226 p.
2. Byrmakov U.A., Novakov R.M., Trynin I.V. *Gosydarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000* (State geological map Russian Federation, scale 1:200 000). Izdanie vtoroe. Seriya Zapadno-Kamchatskaya. List O-57-V, VI. Ob»yasnitel'naya zapiska. Saint Peterburg: VSEGEI, 2007, 187 p.
3. Karpuzov A.A. *Izvestiya vyzov. Geologiya i razvedka*. 2008. no 1. pp.72–74.
4. *Karta poleznykh iskopayemykh Kamchatskoy oblasti masshtaba 1: 500 000* (Mineral resources map of the Kamchatka region, scale 1: 500 000). Glavnyye redaktory: A.F. Litvinov. M.G. Patoka (Kamchatgeolkom). B.A. Markovskiy (VSEGEI). Saint Peterburg: VSEGEI. 1999.
5. Konnikov E.G., Nekrasov A.N., Rodionov N.V., Travin A.V., Poletaev V.A., Sidorov E.G., Chybarov V.M. *Geohimiya*. 2009. no 11. pp. 1200–1211.
6. Konnikov E.G., Nekrasov A.N., Orsoev D.A., Honcyan Yan, Slaogyo Chi. *Geologiya i geofizika*. 2009. T. 50. no 5. pp. 595–612.
7. Konnikov E.G., Poletaev V.A., Zakrevskaya O.U., Sidorov E.G., Ibragimova E.K. *Doklady Akademii nauk*. 2010. T. 435. no 4. pp. 522–526.
8. *Koryaksko-Kamchatskij region – novaya platinonosnaya provinciya Rossii* (The Koryak-Kamchatka region – a new platinum province of Russia). Kollektiv avtorov. Saint Peterburg: Izd-vo kartfabriki VSEGEI, 2002. 383 p.
9. Markovskij, B.A., Rotman V.K. *Geologiya i petrologiya yl'traosnovnogo vulkanizma* (Geology and Petrology of ultramafic volcanism). Lenigrad: Nedra, 1981. 247 p.
10. Markovskij, B.A. *Okrainno-okeanicheskij tip riftogenogo yl'tramafit-mafitovogo magmatizma Aziatsko-Tihookeanskoj tranzitali* (Marginal back-arc type rifting ultramafite-mafite magmatism in the Asia-Pacific transitory). *Geologiya i metallogeniya yl'tramafit-mafitovyh i granitoidnyh intruzivnyh associacii skladchatyh oblastej*. X Chteniya A.N. Zavarickogo 21–22 sentyabrya 2004. Materialy mejdunarodnoj naychnoj konferencii. Ekaterinbyrg. 2004. pp. 44–48.
11. Markovskij B. A., Sidorov E.G. *Paragenezis dunit-klinopiroksenitovyh i piroksenit-gabbroidnyh kompleksov* (Paragenesis of dunite-clinopyroxenite and pyroxenite-gabbroid complexes). *Petrologiya i metallogeniya bazit-giperbazitovyh kompleksov Kamchatki*. Tez. dokl. naych. sessii Kamchatskogo otdeleniya VMO. Petropavlovsk-Kamchatskij. 2000. pp. 36–38.
12. Novakov R.M., Byrmakov U.A., Sidorov M.D. *Geologicheskoe stroenie, veshestvennyj sostav i vozrast massivov gabbrodiorit-monconitovogo kompleksa v verhovyy r. Pravaya Lesnaya (Kamchatka)* (Geological structure, material composition and age arrays gabbrodiorit-Moncontour complex in the upper river Pravaya Lesnaya (Kamchatka)). Materialy regionalnoj konferencii geologov Sibiri, Dal'nego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii. Tomsk. 2000. P. 67.

13. Novakov R.M., Ivanov V.V., Tryhin U.P. *Nahodka zoloto-platinoïdno-medno-nikelevoj mineralizacii v olivinovykh vebsteritah p-ova Kamchatskij Mys (Vostochnaya Kamchatka)* (Discovery of gold-platinoid-copper-Nickel mineralization in the olivine websterites Peninsula of the Kamchatka Cape (Eastern Kamchatka)). Nikelenosnye provincii Dal'nego Vostoka: Mater. konferencii s mezhdynarodnim ychastiem. Petropavlovsk-Kamchatskii. 2012. pp. 47–52.
14. Novakov, R.M., Ivanov V.V., Tryhin U.P., Panova E.G. *Vestnik SPbGY*. 2015. Ser. 7. Vip. 4. pp. 82–96.
15. Osipenko A.B., Novakov R.M. *Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2002. no 2. pp. 84–98.
16. Poletaev V.A. *Platina Rossii*. T.III. Kn. 2. Moscow: ZAO «Geoinformmark», 1999. pp. 191–199.
17. Poletaev V.A. *Kamchatskaya platinoïdno-nikelenosnaya zona – geologiya i rydonosnost'* (Kamchatka platinoïd-Nickel zone – Geology and ore potential): Avtoref. diss. ... kand. geol.-miner. nauk: 25.00.11. Moscow. 2004. 22 p.
18. Rotman V.K. *Sovetskaya geologiya*. 1971. no 10. pp. 42–53.
19. Seliverstov V.A., Osipenko A.B. *Petrologiya rodingitov Kamchatki* (Petrology of rodingites of the Kamchatka). DVO RAN. In-t vykhanologii. Vladivostok: Dal'nayka. 1999. 156 p.
20. Sidorov E.G. *Nahodka pikritov na o. Karaginskom (Beringovo More)* (Discovery of picrite on the island karaginskiy (Bering Sea)). Doklady AN SSSR. 1987. T. 297. no 3. pp. 681–683.
21. Sidorov E.G., Kozlov A.P., Tolstyh N.D. *Gal'moenanskij bazit-giperbazitovyy massiv i ego platinonosnost'* (Galmoenansky basic-ultrabasic massif and its platinonosnost). Moscow: Naychnyy mir, 2012. 286 p.
22. Sidorov M.D., Stepanov V.A. *Vestnik KRAYNC, seriya nauki o Zemle*. 2006. no 2. Vip. No 8. pp.140–150.
23. Slyadnev B.I., Borovtsov A. K. i dr. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:1000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Koryaksko-Kuril'skaya. List O–58* (State geological map Russian Federation, scale 1:1000 000 (third generation). Series Koryak Kuril. Sheet O–58 – Ust-Kamchatsk. An explanatory Memorandum). Ust-Kamchatsk. Obyasnitelnaya zapiska. Saint Peterburg: VSEGEI. 2013. 256 p.
24. Slyadnev B.I., Shapovalenko V.N. i dr. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoi Federatsii masshtaba 1:1000 000 (tret'ye pokolenie). Seriya Koryaksko-Kamchatskaya. List N–57* (State geological map Russian Federation, scale 1:1000 000 (third generation). Series Koryak-Kamchatka. Sheet N–57). Petropavlovsk-Kamchatskij. Ob'yasnitel'naya zapiska. Saint Peterburg: VSEGEI, 2007. 187 p.
25. Tararin, I.A., Chybarov V.M. *Tihookeanskaya geologiya*. 2004. T. 23. no 6. pp. 76–83.
26. Tararin I.A., Chybarov V.M., Ignat'yev E.K., Moskaleva S.V. *Tihookeanskaya geologiya*. 2007. T. 26. no 1. pp. 94–110.
27. Tryhin U.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. *DAN RF*. 2008. T. 418. no 6. pp. 802–806.
28. Flerov G.B., Chybarov V.M. *K probleme «vodnosti» yl'traosnovnoi magmy* (To the problem of «water» ultramafic magma). Materialy konferencii posvyashennoi dnu vykhanologa 30-31 marta, 2009 g. Petropavlovsk-Kamchatskij: IVIS DVO RAN, 2009. pp. 92–100.
29. Flerov, G.B. *K probleme yl'traosnovnykh magm i vysokokalievyykh bazaltoidov* (The problem of ultrabasic magmas and high-potassium basaltoids). Materialy ezhegodnoj konferencii, posvyashennoj Dnu vykhanologa 28-31 marta 2007 g. Petropavlovsk-Kamchatskij: IVIS DVO RAN, 2007. pp. 330–337.
30. Flerov G.B., Seliverstov V.A. *Vykhanologiya i seismologiya*. 2008. no 2. pp. 1–14.
31. Flerov G.B., Koloskov A.V. *Shelochnoj bazaltovyy magmatizm Centralnoj Kamchatki* (Alkaline basaltic magmatism in Central Kamchatka). Moscow: Nayka. 1976. 158 p.
32. Hotin, M.U., Shapiro M.N. *Geotektonika*. 2006. no 4. pp. 61–89.
33. Sheka, S.A., Chybarov V.M. *Izv. AN SSSR. Ser. Geol.* 1987. no 12. pp. 50–61.



ГИС «НИКЕЛЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ»

Собраны и систематизированы результаты многолетних геологических исследований различных проявлений никеля и платины на территории Восточной Камчатки. Создан информационный блок единой ГИС по никеленосным и платиноносным объектам Камчатского края.

Ключевые слова: Восточная Камчатка, никель, платина, ГИС, Карагинский, Маркеловское.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-30-40

Введение

Для научно-методического обеспечения прогнозирования рудных месторождений и оценки потенциальных ресурсов никеля, меди, кобальта и металлов платиновой группы на территории Камчатского края в Научно-исследовательском геотехнологическом центре ДВО РАН (НИГТЦ) ведутся работы по формированию единой комплексной геоинформационной системы (ГИС) по никеленосным и платиноносным объектам региона, где собирается и систематизируется первичная геологическая информация, накопленная в результате многолетних работ НИГТЦ, а также опубликованные данные других исследователей [1]. Система формируется путем создания модульных ГИС-проектов [2], предназначенных для решения различных исследовательских задач [3]. Один из таких проектов – ГИС «Никелевая минерализация Восточной Камчатки».

Структура ГИС «Никелевая минерализация Восточной Камчатки». Система разработана в оболочке ArcGIS 10.0 (ESRI), с использованием системы координат UTM–UPS, (зона 57N, эллипсоид WGS 84). В основу ГИС положены базы данных в формате *.mdb, которые содержат пространственную и семантическую информацию.

Структура баз данных в основе ГИС-проекта. Геологическая информация, представленная в виде векторных слоев, содержащих точечные, линейные и полигональные объекты, собрана в базе данных (БД) GIS_Vost.mdb. Аналитические данные находятся в атрибутивных

таблицах слоев в унифицированном формате, с учетом единиц измерения и методов анализа. База данных доступна для обращения с использованием как MS Access, так и ArcGIS.

БД содержит 13 основных слоев, представляющих собой таблицы с набором пространственных и семантических характеристик объектов. Кроме того, в БД содержится одна таблица, содержащая только семантические (преимущественно аналитические) данные (табл. 1).

Информация о топографической основе содержится в персональной базе геоданных **GIS_topo.mdb** (табл.2).

Таблица 1

Структура БД GIS_Vost.mdb

№, п/п	Название слоя	Описание содержимого слоя	Тип слоя
1.	S_RAMKA	Контур территории, на которой проводились работы	Полигональный
2.	S_TN	Точки наблюдения и общая информация о них	Точечный
3.	S_ROUT	Линии геологических маршрутов и общая информация о них	Линейный
4.	S_TSB	Места отбора точечных, штурфовых и бороздовых проб, общая информация о пробах, результаты аналитических исследований	Точечный
5.	S_GH_MAC	Места отбора гидрохимических проб, для которых производился химический анализ на макрокомпоненты, результаты анализа	Точечный
6.	S_GH_MIC	Места отбора гидрохимических проб, для которых производился анализ на микроэлементы методами ICP-AES, ICP-MS и атомной абсорбции, результаты анализа	Точечный
7.	S_LH_V	Места отбора литохимических проб по вторичным ореолам рассеяния, общая информация о пробах, результаты аналитических исследований	Точечный
8.	S_LH_P	Места отбора литохимических проб по первичным ореолам рассеяния, общая информация о пробах, результаты аналитических исследований	Точечный
9.	S_SIL	Места отбора проб, для которых производился силикатный анализ, общая информация о пробах, результаты анализа	Точечный

№, п/п	Название слоя	Описание содержимого слоя	Тип слоя
10.	S_PF	Места отбора проб, для которых производились замеры петрофизических свойств, общая информация о пробах, результаты измерений	Точечный
11.	S_SHLIF	Места отбора сколков на шлифы, петрографические описания	Точечный
12.	S_SHLIH	Места отбора проб для минералогических исследований	Точечный
13.	D_SHLIH	Результаты минералогических исследований шлиховых проб и протоколов	Дополнительная таблица (не является слоем)

Таблица 2

Структура БД GIS_topo.mdb

№, п/п	Название слоя	Описание содержимого слоя	Тип слоя
1.	dnl_l_200	Постоянные поверхностные водотоки шириной менее 20 м	Линейный
2.	dnl_p_200	Постоянные поверхностные водотоки шириной более 20 м	Полигональный
3.	dnl_point_200	Родники	Точечный
4.	hyps_200	Отметки высот	Точечный
5.	phsl_200	Горизонтالي	Линейный
6.	phsl_p_200	Формы рельефа	Полигональный

Помимо семантической информации в атрибутивных таблицах векторных слоев содержатся автоматически вычисляемые поля с информацией о площадях (Shape Area) и периметрах (Shape Length) полигонов, о длине линейных объектов (Shape Length) в единицах карты (квадратных метрах и метрах).

Содержание ГИС «Никелевая минерализация Восточной Камчатки». В систему включены данные, полученные в ходе выполнения геологосъемочных и поисковых работ различного масштаба, а также результаты исследований проведенных НИГТЦ ДВО РАН. Основной объем материалов, касающихся как непосредственно рудопроявлений, так и вмещающей геологической среды относится к территории острова Карагинского, полуостровов Камчатский Мыс и Озерной.

ГИС-проект в виде файла **GIS_Vost.mxd** создан на основе векторных слоев, хранящихся в перечисленных БД и содержит девять интерактивных электронных карт (фреймов) с определенной тематической информацией: «Точки наблюдений и маршруты», «Точечные,

штуфные, борзодвые пробы», «Гидрохимическое опробование», «Литохимия по вторичным ореолам», «Литохимия по первичным ореолам», «Опробование для силикатного анализа», «Петрофизические свойства пород», «Петрографические исследования», «Шлиховое опробование». Каждая из этих карт включает одну или несколько тем, созданных на основе слоев, хранящихся в БД и содержащих результаты маршрутных наблюдений, опробования и аналитических исследований, а также одинаковый для всех карт набор тем топоосновы (рис. 1).

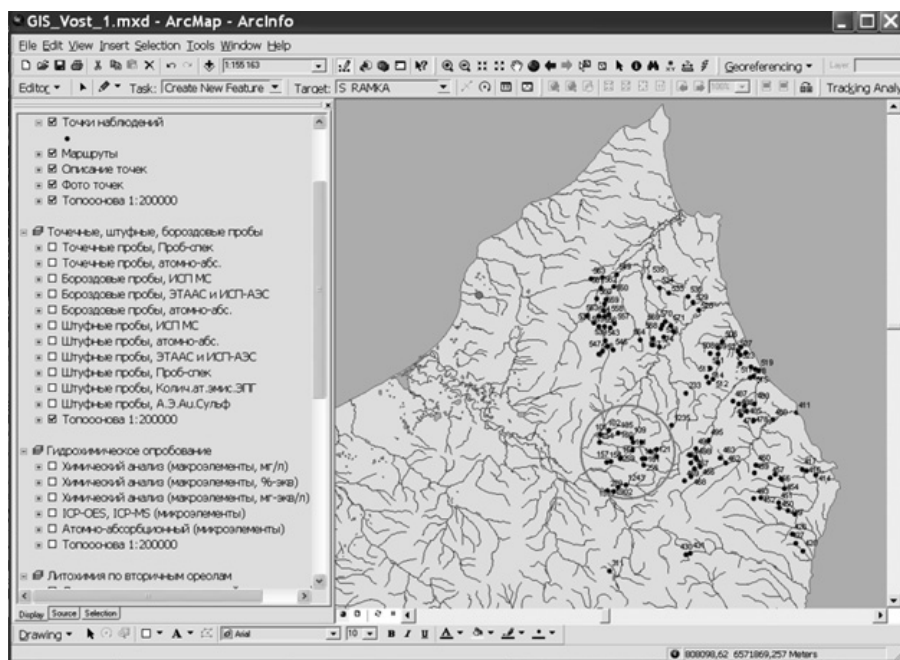


Рис. 1. ГИС «Никелевая минерализация Восточной Камчатки» в среде ArcGIS 10.0. Фрагмент карты северной части острова Карагинского. Показана структура слоев с разделением по видам исследований. Включен слой S_TN с точками наблюдений по ретроспективным данным. Окружностью оконтурен район никелево-медных рудопроявлений Маркеловского, Железного и Монолитного

Карта «Точки наблюдений и маршруты» объединяет четыре темы (табл. 3). Три из них, «Точки наблюдений», «Описание точек» и «Фото точек», получены посредством выборки с применением запросов SQL из одного источника в БД – слоя S_TN. Четвертая тема «Маршруты» – из слоя S_ROUTE.

Содержание тематической карты «Точки наблюдений и маршруты»

№, п/п	Наименование темы	Источник данных темы (слой в БД)	Содержание темы
1.	Точки наблюдений	S_TN, по запросу	Точки наблюдений
2.	Описание точек	S_TN, по запросу	Точки, содержащие гиперссылки на файлы в формате *.txt с их описанием
3.	Фото точек	S_TN, по запросу	Точки, содержащие гиперссылки на файлы в формате *.bmp с их изображением
4.	Маршруты	S_ROUTE	Линии маршрутов

В теме «Точки наблюдений» отображены пункты наблюдений (точки наблюдения в маршрутах, каналы, расчистки и прочее). Темы «Описание точек» и «Фото точек» иллюстрируют объекты карты, для которых имеются гиперссылки с их описанием и фотодокументацией. Описания или фото можно увидеть в отдельном окне с помощью инструмента ArcGIS «Hyperlink». Семантическая информация из атрибутивных таблиц открывается стандартным инструментом «Identify» (рис. 2).

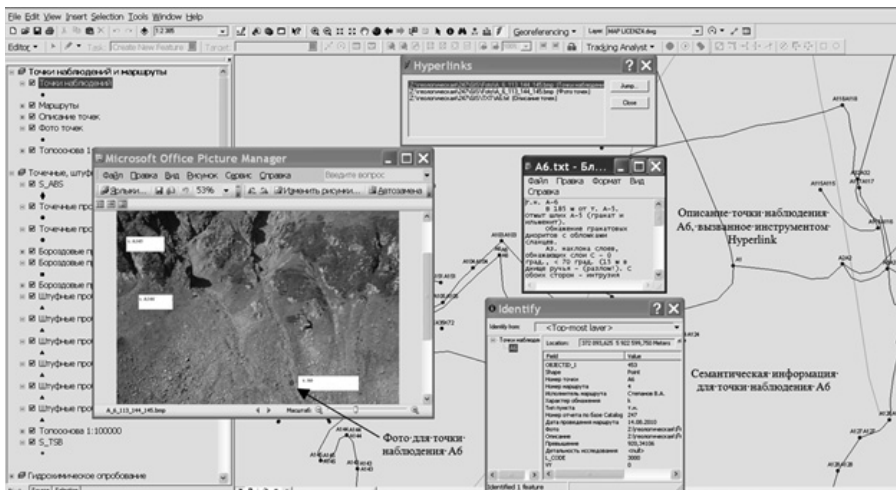


Рис. 2. Фрагмент ГИС «Никелевая минерализация Восточной Камчатки». Карта «Точки наблюдений и маршруты». Показаны фото и описание для точки наблюдения А6, вызванные инструментом «Hyperlink», а также семантическая информация подгруженная с помощью инструмента «Identify»

На карту «Точечные, штуфные, бороздовые пробы» вынесены места отбора соответствующих проб. При организации карты с одной стороны учтены способы их отбора (точечные, штуфные или бороздовые), с другой – виды и методы аналитических исследований, которые были выполнены по каждой пробе. Все темы получены из одного слоя S_TSB посредством выборки запросами SQL (табл. 4).

Таблица 4

Содержание карты «Точечные, штуфные, бороздовые пробы»

Наименование темы	Источник данных темы (слой в БД)	Содержание темы
Точечные пробы, Пробирно-спек.	S_TSB, по запросу	Места отбора точечных проб, проанализированных методом пробирно-спектрального определения элементов платиновой группы (ЭПГ), результаты анализа
Точечные пробы, атомно-абс.	S_TSB, по запросу	Места отбора точечных проб, проанализированных атомно-абсорбционным методом, результаты анализа
Бороздовые пробы, ИСП МС	S_TSB, по запросу	Места отбора бороздовых проб, проанализированных методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), результаты анализа
Бороздовые пробы, атомно-абс.	S_TSB, по запросу	Места отбора бороздовых проб, проанализированных атомно-абсорбционным методом, результаты анализа
Штуфные пробы, ИСП МС	S_TSB, по запросу	Места отбора штуфных проб, проанализированных методом ИСП-МС, результаты анализа
Штуфные пробы, атомно-абс.	S_TSB, по запросу	Места отбора штуфных проб, проанализированных атомно-абсорбционным методом
Штуфные пробы, ЭТААС и ИСП-АЭС	S_TSB, по запросу	Места отбора штуфных проб, проанализированных методом электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии (ЭТААС) и атомно-эмиссионной спектрометрии (ИСП-АЭС), результаты анализа
Штуфные пробы, Проб-спек.	S_TSB, по запросу	Места отбора штуфных проб, проанализированных методом пробирно-спектрального определения элементов платиновой группы, результаты анализа
Штуфные пробы, Колич.ат.эмис.ЭПГ	S_TSB, по запросу	Места отбора штуфных проб, проанализированных методом количественного пробирно-атомно эмиссионного определения элементов платиновой группы, результаты анализа
Штуфные пробы, А. Э. Au.сульф.	S_TSB, по запросу	Места отбора штуфных проб, проанализированных методом атомно-эмиссионного определения золота с экстракционным концентрированием органическими сульфидами, результаты анализа

Карта «Шлиховое отprobование» отображает местоположение точек отбора шлиховых проб, протолокчек и содержит результаты минералогических исследований. При этом атрибутивная таблица слоя S_SHLH содержит только сведения о номере и типе пробы (шлих или протолокчка). Результаты минералогических исследований находятся в таблице D_SHLH, которая не является слоем и не содержит данных пространственной привязки (рис. 3).

D_SHLH												
OB	N_OTCH	N_POIN	N_SAMF	TYPE	MINERALS	PRIMECHANIE	AUTHOR	MAG	ELECTROMAG	NOMAG	LIGHT	SMM
1	219	1017	1017	протолокчка	Вес	грамм	Роголина Л.И.	1,380	1,156	0,064	0,260	4,86
2	219	1017	1017	протолокчка	Пирротин		Роголина Л.И.	99	5			30
3	219	1017	1017	протолокчка	Халькопирит		Роголина Л.И.		зн	12		0,2
4	219	1017	1017	протолокчка	Виоларит	?	Роголина Л.И.			ед.зн		ед.зн
5	219	1017	1017	протолокчка	Борнит		Роголина Л.И.		зн			зн
6	219	1017	1017	протолокчка	Валлерит		Роголина Л.И.		зн			зн
7	219	1017	1017	протолокчка	арсенид_Ni		Роголина Л.И.			14		0,2
8	219	1017	1017	протолокчка	Халькозин		Роголина Л.И.			зн		зн
9	219	1017	1017	протолокчка	Шпинель	розов.	Роголина Л.И.		3 зн			3 зн
10	219	1017	1017	протолокчка	Корунд		Роголина Л.И.			1 зн		1 зн
11	219	1017	1017	протолокчка	Апатит		Роголина Л.И.		зн	29		0,4
12	219	1017	1017	протолокчка	Ортопироксен		Роголина Л.И.		32	25		14,5
13	219	1017	1017	протолокчка	Клинопироксен		Роголина Л.И.		63	20		50,7
14	219	1017	1017	протолокчка	Пироксен	серпентинизирован	Роголина Л.И.					85
15	219	1017	1017	протолокчка	Амфибол	Амфибол	Роголина Л.И.	1				зн

Рис. 3. Таблица D_SHLH с исходными данными минералогических описаний

В таблицу D_SHLH вносятся описания минерального состава проб, где названия диагностированных минералов находятся в одном поле MINERALS в виде списка (рис. 3), а их состав уникален для каждой пробы и может изменяться при поступлении новых данных. В то же время, в атрибутивной таблице слоя названия компонентов должны соответствовать названиям отдельных полей. Поэтому в БД GIS_perv.mdb

Z_SHLH2														
OE	N_POI	N_SAM	AUTHOR	Валлерит	Вес	Виоларит	Галенит	Гидрослюд	Гранат	Графит	Золото	Ильменит	Карбонат	Кварц
1	A2	A2	Козак Л.И.		8,4				52,5	ед.зн		37,1		1,8
2	A32	A32	Воропаева Е.Э		5, 9				44,4			12,4		7,7
3	A33	A33	Козак Л.И.		3,32				42,5	ед.зн		10,7		4,4
4	A5	A5	Козак Л.И.		5,22				46,4	ед.зн		38		1,1
5	A32	A32-1	Воропаева Е.Э		5,39 г		1 зн		54,8	ед.зн		21		1,3
6	A32	A32-2	Воропаева Е.Э		2,53				59,3	зн		16		5
7	A32	A32-3	Воропаева Е.Э		3,2				45,8	ед.зн		22,1		2,6
8	A8	A8-5	Воропаева Е.Э		25,20		ед.зн		ед.зн	ед.зн		ед.зн	зн	1,2
9	1017	1017	Роголина Л.И.	зн	4,86		ед.зн							4
10	1031	1031	Роголина Л.И.		3,2									0,3
11	1145	1145-1	Санилевич Н.С		2,61									1
12	1145	1145-7	Санилевич Н.С		11,51									1,4
13	1145	1145-8	Санилевич Н.С		3,80									0,5
14	1147	1147	Санилевич Н.С		4,64				15	зн		8,2		
15	1147	1147-6	Санилевич Н.С		6,15		ед.зн		36,1	0,3		19,5		0,2
16	1178	1178-1	Воропаева Е.Э		5,6									зн
17	1178	1178-12	Воропаева Е.Э		9,5				ед.зн	ед.зн				зн
18	1178	1178-24	Воропаева Е.Э		22,17									ед.зн
19	1178	1178-25	Воропаева Е.Э		19,7									
20	1192	1192	Козак Л.И.		7,24		1 зн		ед.зн					
21	1192	1192-4	Козак Л.И.		16,99						1 зн			
22	1192	1192-5	Козак Л.И.		12,48						1 зн			
23	1192	1192-6	Козак Л.И.		16,37									
24	1192	1192-8	Козак Л.И.		0,78		0,1		ед.зн			0,1		

Рис. 4. Транспонированная с применением перекрестного запроса SQL таблица D_SHLH

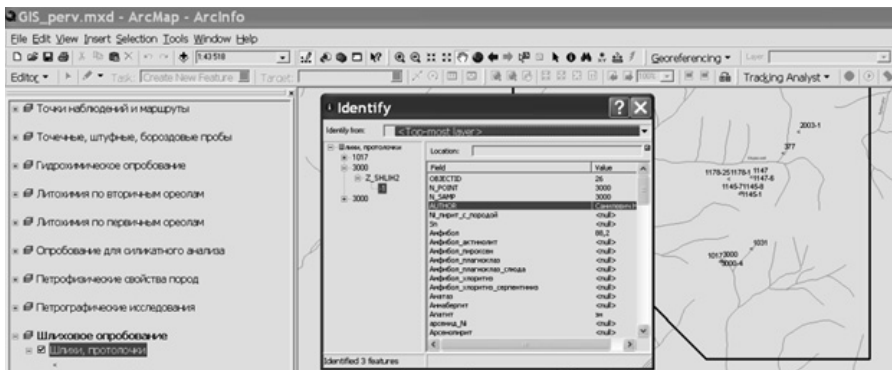


Рис. 5. Фрагмент ГИС «Никелевая минерализация Восточной Камчатки». Карта «Шлиховое опробование». Показана семантическая информация, подгруженная с помощью инструмента «Identify»

таблица D_SHLH транспонирована с помощью перекрестного запроса SQL (рис. 4). Такая схема удобна тем, что при поступлении новых результатов минералогических исследований с изменившимся набором диагностированных минералов (с новыми компонентами в поле MINERALS), она позволяет с помощью запроса автоматически формировать поля, соответствующие этим компонентам. Перекрестный запрос связан со слоем S_SHLH посредством функции ArcMap «Relate...», что позволяет просмотреть данные с помощью инструмента «Identify» «Relate...» (рис. 5).

Карта «Гидрохимическое опробование» показывает местоположение точек отбора гидрохимических проб и состоит из пяти тем, три из которых получены с помощью SQL-запроса из слоя S_GH_MAC и две из слоя S_GH_MIC. Темы различаются по методике аналитических исследований, а для химического анализа на макрокомпоненты – дополнительно по единицам измерения (табл. 5).

Таблица 5

Содержание карты «Гидрохимическое опробование»

Наименование темы	Источник данных темы (слой в БД)	Содержание темы
Химический анализ (макрокомпоненты, мг/л)	S_GH_MAC, по запросу	Места отбора гидрохимических проб, проанализированных на макроэлементы и результаты анализа, выраженные в мг/л
Химический анализ (макрокомпоненты, %-экв)	S_GH_MAC, по запросу	Места отбора гидрохимических проб, проанализированных на макроэлементы и результаты анализа, выраженные в %-экв

Наименование темы	Источник данных темы (слой в БД)	Содержание темы
Химический анализ (макрокомпоненты, мг-экв/л)	S_GH_MAC, по запросу	Места отбора гидрохимических проб, проанализированных на макроэлементы и результаты анализа, выраженные в мг-экв/л
ICP-OES, ICP-MS (микроэлементы)	S_GH_MIC	Места отбора гидрохимических проб, проанализированных на микроэлементы методами ICP-AES, ICP-MS и результаты анализа
Атомно-абсорбционный (микроэлементы)	S_GH_MIC, по запросу	Места отбора гидрохимических проб, проанализированных на микроэлементы атомно-абсорбционным методом и результаты анализа

Карты «Литохимия по вторичным ореолам», «Литохимия по первичным ореолам», «Опробование для силикатного анализа», «Петрофизические свойства пород», «Петрографические исследования» содержат по одной теме соответствующего содержания (табл. 6).

Таблица 6

Содержание карт

Наименование карты	Наименование темы	Источник данных темы (слой в БД)	Содержание темы
Литохимия по вторичным ореолам	Литохимия, полуколичественный спектральный	S_LH_V	Места отбора литохимических проб по вторичным ореолам, проанализированных методом полуколичественного спектрального анализа (ПКСА), результаты анализа
Литохимия по первичным ореолам	Литохимия, полуколичественный спектральный	S_LH_P	Места отбора литохимических проб по первичным ореолам, проанализированных методом ПКСА, результаты анализа
Опробование для силикатного анализа	Окислы (мас.%), S, Fe (вес.%), микроэлементы (ppm)	S_SIL	Места отбора проб, для которых производился силикатный анализ, результаты анализа

Наименование карты	Наименование темы	Источник данных темы (слой в БД)	Содержание темы
Петрофизические свойства пород	Петрофизические свойства пород	S_PF	Места отбора проб, для которых производились замеры петрофизических свойств, результаты измерений
Петрографические исследования	Петрография	S_SHLIF	Места отбора проб, для которых производились петрографические исследования, описания отдельных шлифов

Заключение

В процессе формирования ГИС «Никелевая минерализация Восточной Камчатки» первичная геологическая информация, полученная в разные годы разными исследователями приводится к единой системе. В результате появляются новые возможности для корреляции и интерпретации больших массивов данных, накопленных по минералогии, геохимии и геологии рудопроявлений и пунктов минерализации никеля Восточной Камчатки, а также для прогнозирования и поиска новых объектов и оценки потенциальных ресурсов никеля, меди, кобальта и металлов платиновой группы на территории Камчатского края.

Проводится дальнейшая работа по совершенствованию организации информации в системе и операциях с ней, а также по обеспечению функционирования единой комплексной ГИС по никеленосным и платиноносным объектам региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубенко И. С., Палымский Б. Ф., Горячев Н. А., Зинкевич А. С., Лямин С. М. Разработка ГИС благороднометалльных месторождений Магаданской области // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 1. С. 57–62.
2. Новаков Р. М., Таскин В. В., Сидоров М. Д., Паламарь С. В. Разработка базы данных Шанучского месторождения (Камчатка) в среде Microsoft Access // Вестник Краунц. Серия: Науки о Земле. 2013. № 2 Выпуск №22. С. 1–7.
3. Чесалов Л. Е., Попов А. С., Аракчеев Д. Б. Создание территориально-распределенных информационных систем в сфере управления недропользованием // Разведка и охрана недр. 2007. №11. С. 45–50. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Паламарь Сергей Владимирович – научный сотрудник, veterkam4@mail.ru;
Новаков Роман Михайлович – старший научный сотрудник, 6rom6@mail.ru;
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 30–40.

S. V. Palamar, R. M. Novakov

GIS «NIKEL MINERALIZATION OF EAST KAMCHATKA»

The results of long-term geological researches of various nickel and platinum occurrences of the East Kamchatka territory were collected and systematized. The information block of uniform GIS on nickeliferous and platiniferous objects of Kamchatka Krai was created.

Key words: Eastern Kamchatka, nickel, platina, GIS, Karaginskiy, Markelovskoye.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-30-40

AUTHORS

Palamar S. V., Researcher, e-mail: veterkam4@mail.ru;

Novakov R. M., Senior Researcher, e-mail: 6rom6@mail.ru;

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Golybenko I. S., Palymsky B. F., Goryachev N. A., Zinkevich A. S., Lyamin S. M. *Vestnik SVNC DVO RAN*. 2010. No 1. pp. 57–62.

2. Novakov R. M., Taskin V. V., Sidorov M. D., Palamar S. V. *Vestnik KRAUNC. Nayki o Zemle*. 2013. No 2. Vyp. No 22. pp. 91–97.

3. Chesalov L. E., Popov A. S., Arakcheev D. B. *Razvedka I ohrana nedr*. 2007. No 11. pp. 45–50.



КОЛЛЕКЦИЯ ОБРАЗЦОВ И ПРОБ ИЗ НИКЕЛЕНОСНЫХ ОБЪЕКТОВ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

Проведена ревизия коллекции каменного материала, собранного на объектах с никелевой минерализацией на территории Камчатки. Сформированы соответствующий ГИС-проект и база данных.

Ключевые слова: коллекция, никелевая минерализация, каменный материал, проба, систематизация, базы данных, ГИС.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-41-48

Введение

Накопление и правильное хранение каменного материала обеспечивает возможность его неоднократного использования в исследовательских целях с применением современных лабораторно-аналитических методов, без затрат на организацию новых полевых исследований. Это актуально в связи со сложностью проведения работ на труднодоступных объектах в условиях сокращения финансирования. Ценность имеющихся материалов возрастает по причине незаинтересованности большинства горнорудных компаний в длительном хранении образцов и проб, что часто приводит к их утрате после завершения работ по различным проектам. Сказывается также невнятная государственная политика и недостаточное финансирование в области хранения вещественной информации о недрах [3, 5, 7, 16].

В результате научных исследований НИГТЦ ДВО РАН, проводившихся в течение 20 лет как самостоятельно, так и в сотрудничестве с различными организациями, накоплен большой объем вещественных данных по кобальт-медно-никелевому месторождению Шануч, рудопроявлениям и пунктам с никелевой минерализацией на территории Камчатского края. В НИГТЦ ДВО РАН сформирована коллекция каменного материала: организовано его хранение, созданы соответствующие базы данных и геоинформационная система (ГИС).

Цель статьи – показать назначение и актуальное состояние коллекции.

Назначение коллекции

Материал коллекции используется для минералогических, петрографических, петрофизических, геохимических исследований современными аналитическими методами и служит для решения как научных, так и прикладных задач, касающихся никеленосности и платиносности Камчатского региона.

Состав коллекции и хранение

Материал коллекции представлен образцами и пробами различного способа отбора и назначения: шлифами, аншлифами, штучными, точечными, бороздовыми, силикатными, шлиховыми и др. Часть проб исследована с использованием различных аналитических методов, вместе с тем, значительное их количество не анализировалась вовсе. Основной объем коллекции составляют породы и руды медно-никелевых проявлений и Шанучского месторождения Камчатской никеленосной провинции, охватывающей Камчатский срединный массив [1, 2, 4, 6, 11, 12, 13, 15]. Представлены также породы и руды с никелевой минерализацией на территории Восточной Камчатки (острова Карагинского, полуострова Камчатский Мыс) [9]. В настоящее время в коллекции учтено 2658 образцов, 286 аншлифов, 621 точечная, 578 штучных, 23 бороздовые пробы и 191 проба на силикатный (химический) анализ. Часть проб находится в дробленном или истертом состоянии и представляет собой остатки после лабораторных исследований.

В процессе формирования коллекции в двух помещениях были оборудованы места для хранения. Образцы и пакеты с донными и литохимическими пробами размещены в лотках на стеллажах, а штучные, точечные и бороздовые пробы – на полках (рис. 1). В отдельных помещениях хранятся ящики с кернавыми пробами. Аншлифы и шлифы находятся в рабочих кабинетах в маркированных коробках.

Маркировка единиц хранения

С целью улучшения условий хранения коллекции, внедрения новых возможностей быстрого поиска и формирования выборки образцов и проб, необходимых для исследований, в 2012 году была начата работа по формированию соответствующей электронной базы данных и геоинформационной системы (ГИС). Это потребовало провести ревизию коллекции каменного материала, с тем, чтобы связать образцы и пробы с электронной базой данных и адаптировать их маркировку к условиям долговременного хранения [7,8]. Работа заключалась в подтверждении полевых номеров проб, их принадлежности к отчетным материалам по различным объектам исследований, а также в комплексном анализе различных бумажных носителей ин-

формации – дневников полевых наблюдений, журналов, отчетов, карт фактического материала, реестров образцов и проб, ведомостей результатов аналитических исследований.

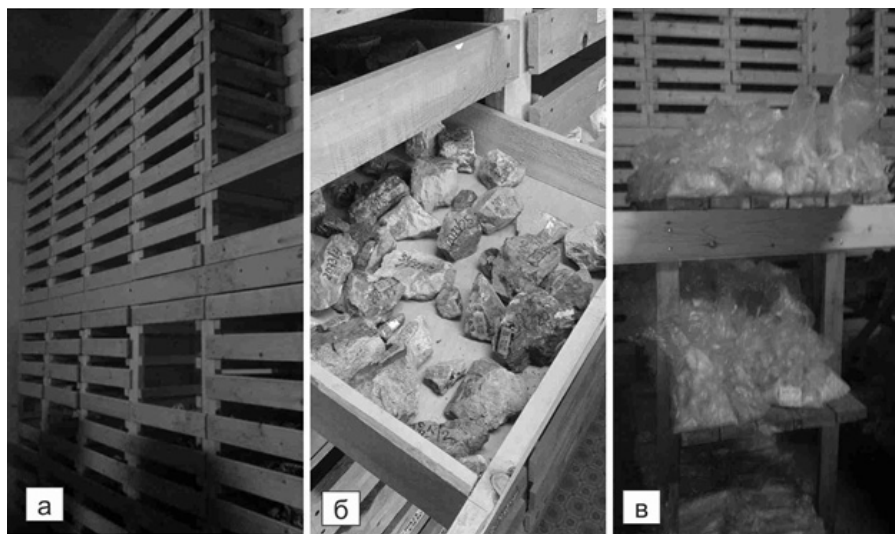


Рис. 1. Размещение проб: а – стеллажи с лотками для образцов, а также проб по вторичным ореолам рассеяния, б – образцы в лотке, в – полки для штучных, точечных и бороздовых проб

Все единицы хранения маркированы этикетками. На образцах и аншлифах этикетки закреплены с помощью эпоксидной смолы, предохраняющей надписи от затирания. Для штучных, бороздовых и точечных проб этикетки изготавливались в двух экземплярах, один из которых помещался внутрь упаковки (мешка или пакета), а другой – снаружи. На этикетках указан полевой номер, год выполнения работ, аббревиатура «НИГТЦ» и уникальный номер, который представляет собой имя директории (папки) на сервере (рис. 2). В этой директории содержатся файлы с информацией по объекту исследований, к которому относится данная проба или образец. Доступ к этим папкам организован через систему «Каталог» (база данных Catalog.mdb) [10]. Система была ранее сформирована в НИГТЦ ДВО РАН для размещения, хранения, поиска и доступа к файлам с отчетными материалами о проведенных исследованиях. «Каталог» позволяет осуществлять поиск и выбор данных по виду, масштабу и году выполнения работ, по автору отчетных и иных документов, по названию работ или отчета, по полезному ископаемому, по карте изученности.

полка, ряд, ящик и др.) с номером электронной папки с отчетными материалами по объекту исследований в БД «Каталог», а также с положением на карте, результатами аналитики и другими сведениями в ГИС-проекте. Кроме того, в БД учитывается вид пробы по способу опробования, ее состояние (издробленное, истертое и проч.). Предусмотрено автоматическое формирование и выпуск этикеток для маркировки образцов, проб, шлифов и аншлифов.

Единая система хранения материалов коллекции, первичной и отчетной информации в НИГТЦ

БД «Реестр», БД «Каталог» и ГИС-проект связаны и составляют единую систему, которая дает возможность не только быстро найти ту или иную пробу или образец в хранилище каменного материала, но и сделать разнообразные выборки с учетом объекта исследований, года проведения работ, исполнителя, вида опробования, методов и результатов анализа, места отбора пробы и т.д., а также посмотреть соответствующие отчетные материалы (рис. 4).

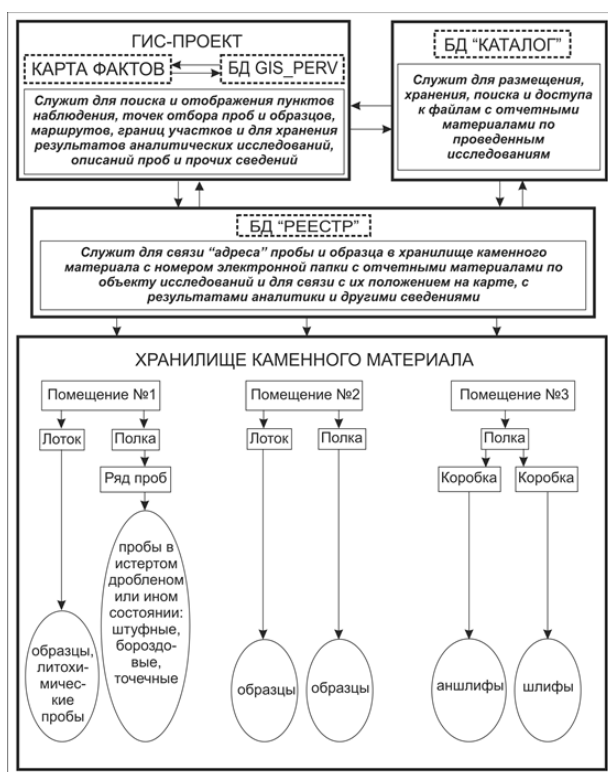


Рис. 4. Единая система хранения материалов коллекции, первичной и отчетной информации в НИГТЦ

Заключение

Проведена идентификация, систематизация и ревизия коллекции каменного материала по никелевым месторождениям, рудопроявлениям и пунктам с никелевой минерализацией на территории Камчатского края, собранной за двадцатилетний период. По территориальному охвату, уровню информативности и основной сфере использования ее можно отнести к научной комплексной коллекции регионального значения [8]. Она может быть использована для решения научно-исследовательских и прикладных задач по изучению никеленосности и платиноносности региона.

В НИГТЦ ведется дальнейшая работа по формированию коллекции, в том числе по ревизии и учету шлиховых, донных, литохимических и керновых проб, совершенствованию алгоритмов подготовки и ввода информации в базы данных, наполнению и совершенствованию ГИС-проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков А. И., Кутыев Ф. Ш., Сидоров Е. Г., Яроцкий Г. П. Медно-никелевое сульфидное оруденение // Никеленосные базит-гипербазитовые комплексы Украины, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Апатиты. 1988. С.59–61.

2. Евстигнеева Т. Л., Минеев С. Д., Чубаров В. М., Гриненко В. А., Округин В. М., Игнатьев Е. К., Козлов А. Н. Некоторые вопросы минералогии и генезиса сульфидных никелевых руд Центральной Камчатки // Никеленосные базит-гипербазитовые комплексы Украины, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Апатиты. 1988. С. 63–69.

3. Задорожный И. М., Ковтонюк Г. П., Колбанцев Л. Р. Фонд кернового материала Северо-западного федерального округа. Состояние, проблемы и пути совершенствования // Региональная геология и металогения. СПб., 2015. № 61. С. 59–76.

4. Игнатьев Е. К., Баженов Е. А., Козлов А. Н., Округин В. М., Чубаров В. М. и др. Геология и медно-никелевое оруденение Срединного массива Камчатки // Никеленосные базит-гипербазитовые комплексы Украины, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Апатиты. 1988. С. 61–63.

5. Куприянова И. И., Кувшинова Л. А., Кувшинова К. А., Клименцова Н. И. Геоэкологическое значение геологических коллекций каменного материала и информационная технология их описания. // Отечественная геология. 2014. № 6. С. 87–95.

6. Лихачев А. П., Фоминых А. Ф. Никель – В кн.: Руководство по оценке прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. М., 1982. С. 86–91.

7. Методические рекомендации по составу и структуре сопровождающих и первичных баз данных ГК-200/2 и ГК-1000/3 // Федеральное агентство по недропользованию. –СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 55 с.

8. Методические рекомендации по формированию, учету, хранению и использованию геологических коллекций. –М.: ВСЕГЕИ, 2005. 55 с.

9. Новаков Р. М., Сидоров М. Д. Никеленосность медно-колчеданных проявлений в серпентинитах Восточной Камчатки // Горный информационно-

аналитический бюллетень. № 11. Специальный выпуск 31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга. – 2016. – С. 13–26.

10. *Новаков Р. М., Таскин В. В., Сидоров М. Д., Паламарь С. В.* Каталог электронных версий отчетных материалов предприятия в среде Microsoft Access // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 9. – С. 214–217.

11. *Новаков Р. М., Трухин Ю. П., Кунгурова В. Е., Сидоров М. Д., Паламарь С. В., Философова Т. М.* Медно-никелевые руды участка Восточно-Геофизический (Шанучское рудное поле, Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. №1. – Вып. 33. – С. 34–45.

12. *Полетаев В. А.* Камчатская платиноидно-никеленосная зона – геология и рудоносность: Автореф. дисс. канд. геол. – мин. наук. Москва, 2004. 22 с.

13. *Сляднев Б. И., Шаповаленко В. Н. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Камчатская. Лист N-57 – Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 187 с.

14. *Таскин В. В., Новаков Р. М., Сидоров М. Д., Паламарь С. В.* ГИС-проект «Квинум-Кувалорогская никеленосная зона»: предпосылки разработки, структура, содержание // Геоинформатика. 2013. № 3. С. 21–27

15. *Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д.* Камчатская никеленосная провинция // ДАН РФ. 2008. Том 418. № 6. С. 802–806.

16. *Черепанов А. С.* Определение целей и задач долговременного хранения каменного материала // Мат-лы VIII Межрегиональной геологической конференции. Уфа, 2010. С. 112–114. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Паламарь Сергей Владимирович – научный сотрудник, veterkam4@mail.ru;
Новаков Роман Михайлович – старший научный сотрудник, brom6@mail.ru;
Трухин Юрий Петрович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, ytrukhin2@yandex.ru;
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analicheskiiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 41–48.

S. V. Palamar, R. M. Novakov, Yu. P. Truhin

COLLECTION OF SAMPLING MATERIAL FROM NIKELFERROUS OBJECTS OF THE KAMCHATKA REGION

Auditing, identification and systemization of the various rock material collected on the objects with nickel mineralization on the territory of Kamchatka was carried out. The geological collection with the corresponding GIS-project and the database was created.

Key words: collection, nickel mineralization, rock material, samples, systemization, data bases, GIS.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-41-48

AUTHORS

Palamar S. V., Researcher, veterkam4@mail.ru,

Novakov R. M., Senior Researcher, 6rom6@mail.ru,

Truhin Yu. P., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, professor, Principal researcher, ytrukhin2@yandex.ru,
Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Bajkov A. I., Kutjev F.S.H., Sidorov E. G., Yarockij G. P. *Medno-nikelevoe sulfidnoe orudnenie* (Copper-Nickel sulfide mineralization). Nikelenosnye bazit-giperbazitovye komplekсы Ukrainy, Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka. Apatity. 1988. pp. 59–61.
2. Evstigneeva T. L., Mineev S. D., Chubarov V. M., Grinenko V. A., Okrugin V. M., Ignat'ev E. K., Kozlov A. N. *Nekotorye voprosy mineralogii i genezisa sulfidnyh nikelevyh rud Central'noj Kamchatki* (Some aspects of Mineralogy and Genesis of sulfide Nickel ores of Central Kamchatka). Nikelenosnye bazit-giperbazitovye komplekсы Ukrainy, Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka. Apatity. 1988. pp. 63–69.
3. Zadorozhnyj I. M., Kovtonyk G. P., Kolbancev L. R. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. Saint Peterburg, 2015. no 61. pp. 59–76.
4. Ignat'ev E. K., Bazhenov E. A., Kozlov A. N., Okrugin V. M., Chubarov V. M. i dr. *Geologiya i medno-nikelevoe orudnenie Sredinnogo massiva Kamchatki* (Geology and copper-Nickel mineralization of the Median massif of Kamchatka). Nikelenosnye bazit-giperbazitovye komplekсы Ukrainy, Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka. Apatity. 1988. pp. 61–63.
5. Kupriyanova I. I., Kuvshinova L. A., Kuvshinova K. A., Klimencova N. I. *Otechestvennaya geologiya*. 2014. no 6. pp. 87–95.
6. Lihachev A. P., Fominyh A. F. *Nikel'. V kn.: Rukovodstvo po ocenke prognoznyh resursov tverdyh poleznyh iskopaemyh* (Nickel – In kN.: Guidance on the assessment of forecasted resources of solid minerals). Moscow, 1982. pp. 86–91.
7. *Metodicheskie rekomendacii po sostavu i structure soprovozhdayuschih i pervichnyh baz dannyh GK-200/2 i GK-1000/3* (Methodical recommendations on composition and structure accompanying and primary databases GK-200/2 and GK-1000/3). Federalnoe agentstvo po nedropolzovaniyu. Saint Peterburg: VSEGEI, 2015. 55 p.
8. *Metodicheskie rekomendacii po formirovaniyu, uchetu, chraneniy i ispol'zovaniyu geologicheskikh kolekcij* (Methodical recommendations for formation, accounting, storage and use of geological collections). Moscow: VSEGEI, 2005. 55 p.
9. Novakov R. M., Sidorov M. D. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. no 11. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3». Moscow: Gornaya kniga, 2016. pp. 13–26.
10. Novakov R. M., Taskin V. V., Sidorov M. D., Palamar' S. V. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2013. no 9. pp. 214–217.
11. Novakov R. M., Truhin YU.P., Kungurova V. E., Sidorov M. D., Palamar' S.V., Filosofova T. M. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2017. Vyp. 33. pp. 34–45
12. Poletaev V. A. *Kamchatskaya platinoidno-nikelenosnaya zona – geologiya i rudonosnost'* (Kamchatka platinoid-Nickel zone – Geology and ore potential: abstract): Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Moscow, 2004. 22 p.
13. Slyadnev B. I., Shapovalenko V. N. i dr. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:1000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Koryaksko-Kamchatskaya. List N-57* (State geological map Russian Federation, scale 1:1000 000 (third generation). Series Koryak-Kamchatka. Sheet N-57). Petropavlovsk-Kamchatskij. Ob'yasnitel'naya zapiska. Saint Peterburg: VSEGEI, 2007. 187 p.
14. Taskin V. V., Novakov R. M., Sidorov M. D., Palamar' S.V. *Geo-informatika*. 2013. no 3. pp. 21–27.
15. Truhin Yu.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D. *DAN RF*. 2008. Tom 418. no 6. pp. 802–806.
16. Cherepanov A. S. *Opreделение celej i zadach dolgovremennogo hraneniya kamenogo materiala* (Determination of the goals and objectives of long-term storage of stone material). Mat-ly VIII Mezhhregional'noj geologicheskoy konferencii. Ufa, 2010. pp. 112–114.

**В. Е. Кунгурова, Ю. П. Трухин,
В. А. Степанов, Р. М. Новаков**

МИНЕРАЛЬНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Проведен сравнительный анализ особенностей минералогического состава различных типов сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч и ряда проявлений Камчатской никеленосной провинции (КНП). Массивные, сетчатые, брекчиевидные (пятнистые) руды, прожилково-вкрапленное и вкрапленное оруденения сингенетичны с интрузивными телами.

Ключевые слова: Камчатская никеленосная провинция, сульфидные медно-никелевые руды, халькопирит-пентландит-пирротинный состав.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-49-65

Сульфидные медно-никелевые руды объектов Камчатской никеленосной провинции (КНП) (рис. 1), связанные с производными водной высокомагнезиальной и богатой кремнеземом магмы бонинитового типа [1], представлены массивными, сетчатыми, брекчиевидными (пятнистыми), прожилково-вкрапленными и вкрапленными (табл. 1) типами, что свидетельствует о сложных условиях их образования. Для каждого из них характерны свои особенности, пространственное размещение, соотношения с вмещающими породами, специфические структуры и текстуры. Проведено обобщение новых данных и использованы ранее опубликованные [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Внутреннее строение самих рудных тел и минерализованных зон сложное и обусловлено сочетанием и неравномерной распространенностью слагающих их разнообразных структурно-генетических типов руд, каждый из которых характеризуется своеобразием минералогического и химического состава и геолого-структурного положения. Тем не менее, все типы руд чередуются без каких-либо признаков взаимных пересечений в пространстве, что позволяет рассматривать их совместно как производные одного процесса.

По минералогическому составу руды являются типичными халькопирит-пентландит-пирротинными (в отдельных случаях виоларит-

пиритовыми), с разными вариациями и соотношениями этих минералов, отражающими различные геологические и физико-химические условия рудоотложения. В рудах, помимо никеля и меди, содержатся также кобальт, благородные металлы (платина, палладий, золото), которые могут извлекаться попутно при металлургической переработке.

Таблица 1

Тектурные типы руд КНП

Типы руд	массивные	сетчатые	брекчиевидные, (пятнистые)	прожилково-вкрапленные, пятнистые	вкрапленные
Объекты оруденения	Шануч, Рассоха, Аннабергитовая Щель, Восточно-Геофизическое	Восточно-Геофизическое	Шануч, Аннабергитовая Щель	Шануч, Восточно-Геофизическое, Рассоха, Аннабергитовая Щель, Нижнемедвежье, Тундровое	Шануч, Восточно-Геофизическое, Рассоха, Аннабергитовая Щель, Нижнемедвежье, Снежное, Верхнемедвежье Олень, Кувалорог, Северное

По распространенности в рудах минералы разделены на несколько групп. В табл. 2 приведены как собственные данные, имеющиеся по минеральному составу руд КНП и опубликованные в разное время [4, 7, 8, 9, 10, 11, 12], так сведения из других литературных источников [5, 6, 13]. Минералы были определены различными методами анализов: оптическим, рентгеноструктурным, микрозондовым.

Массивные руды. В рудах объектов КНП они имеют относительно простой состав, обусловленный ограниченным количеством слагающих рудообразующих минералов: халькопирит, пентландит, пирротин. Незначительны вариации их количественных соотношений, но пирротин резко преобладает над другими рудными минералами. Относительное его содержание колеблется в зависимости от количества нерудных включений. Различаются руды с массивной и петельчатой текстурой (нерудных включений менее 10 %), руды с более разнообразными текстурами (включения составляют 15–30 %) – пятнистые, полосчатые. Структура руды идиоморфнозернистая, гипидноморфнозернистая, алотриоморфнозернистая, интерстициальная,

Минералы, встреченные в рудах объектов КНП

Группы минералов	Название минералов
распространенные, главные	сульфиды: пирротин, пентландит, халькопирит, виоларит, пирит, Ni-пирит; оксиды: шпинелиды, ильменит
редкие	сульфиды: сфалерит, галенит, марказит, молибденит, кубанит, мойхукит (?); оксиды: магнетит, макинавит; арсениды и сульфоарсениды: никелин, леллингит, сперрилит, раммельсбергит, саффорит, герсдорфит, кобальтин, ирарсит; висмутиды: котульскит; теллуриды: майченерит
очень редкие	сульфиды: аргентопентландит, миллерит, годлевскит, хизлевудит, полидимит, тетрадимит; сульфоарсениды: арсенопирит; теллуриды, антимониды: гессит, волынскит, брейгауптит, ульманит, мелонит, мончеит, меренскит, алтаит; самородные: золото, изоферроплатина
минералы зоны окисления	сульфиды: борнит, халькозин, ковеллин; оксиды: гематит, куприт; гидроксиды: лимонит, гетит, лепидокрокит; гидрокарбонаты: азурит, малахит; арсенаты, силикаты: аннабергит, хризокола; сульфаты: моренозит, ретгерсит, ярозит
Примечание: Минералы, отнесенные к главным, присутствуют в наибольшем количестве и встречаются во всех типах руд; редкие – в значительно меньшем количестве и не во всех типах руд; очень редкие – обнаружены в некоторых типах руд и в очень малом количестве.	

распада твердого раствора. Совместно с рудными минералами формируются субпараллельные, реже радиально-лучистые агрегаты амфибола, что может говорить о сингенетичности возникновения рудных и силикатных минералов.

Массивные руды сложены неравномернозернистыми агрегатами пирротина, содержание которого колеблется от 40 до 95 %. Менее широко развит пентландит, количество которого в руде составляет 20–55 %. Халькопирит и пирит в рудах развиты ограниченно: содержание халькопирита колеблется от 2 до 15 %, пирита – от единичных зерен до 1 %.

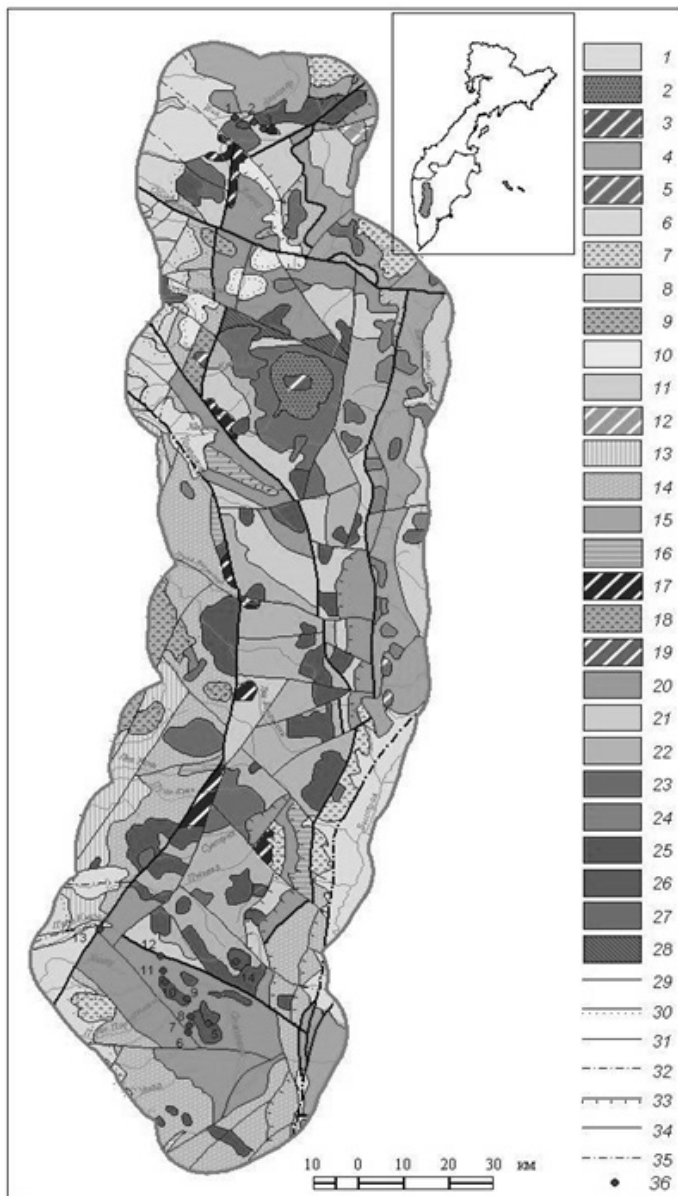


Рис. 1. Геологическая карта Камчатского срединного массива и положение никеленосных интрузивов в его структуре (по материалам Государственной геологической карты масштаба 1:1000000 3-го поколения. Лист N-57. Сляднев Б. И. и др., 2007; с изменениями Сидорова М. Д., 2010) (см. стр. 53):

Условные обозначения: 1–10 – кайнозойские. Квартер. Аллювиальные, пролювиальные, ледниковые, водно-ледниковые отложения (1); Ичинский, Хангарский вулканические комплексы андезит-дацитовые: покровные образования (2), субвулканические образования (3); Рассошинский трахибазальт-базальтовый, Яковской базальтовый вулканические комплексы: покровные образования (4), субвулканические образования (5). Неоген. Эрмановская, Этолонская, Какертская Ильинская свиты. Песчаники, туфопесчаники, алевролиты (6); Кахтунский андезибазальтовый, Кимитинский базальт-андезитовый вулканические комплексы (7). Палеоген. Вивентекская и кулувенская, Утхолокская, Гакхинская, Ковачинская, Снатольская свиты. Песчаники, алевролиты, туфоалевролиты, туффиты (8); Черепановский вулканический комплекс дацит-андезитовый (9); тектоно-гравитационные микститы (брекчии хаотического сложения (10). 11–20 мезозойские. Верхний мел – палеоцен. Кирганикская свита. Туфы трахибазальтов, базальтов, трахибазальты (11), субвулканические образования (12); Верхний мел. Кунунская (13, Хозгонская (14) свиты. Алевролиты, аргилиты, песчаники, аспидные сланцы; Ирунейский вулканический комплекс базальтовый (15); Алисторский вулканический комплекс пикрит-базальтовый. Алисторская свита. Метапикробазальты, метапикриты (16), субвулканические образования. Метапикриты (17); Квахонская свита – туфы базальтов, андезибазальтов (18), субвулканические образования. Базальты, долериты (19); Хейванская, химкинская свиты – метапесчаники и метаалевролиты, графитовые филлиты, альбит-хлоритовые, эпидот-хлорит-актинолитовые, сланцы, филлиты (20). 21–22 протерозойские. Протерозой, верхний. Камчатская метаморфическая серия. Метаформация высокоглиноземистых кристаллических сланцев (21); Колпаковская метаморфическая серия. Метаформация амфиболовых плагиогнейсов (22). 23–28 плутонические комплексы. Кайнозой, неоген, миоцен. Лавкинский гранодиоритовый (23); мезозой, мел, верхний – кайнозой, палеоген, палеоцен. Левоандриановский дунит-клинопироксенит-монцитовый (24); Мезозой, мел, верхний. Кольский плагиогранит-гранодиоритовый (25), Дукукский габбро-норит-кортландитовый (26); Мезозой, мел, нижний. Крутогоровский гнейсоплагиогранитовый (27); Палеозой, нижний. Андриановский метагаббровый (28). 29–30 – геологические границы: между разновозрастными образованиями (29), несогласного залегания (30). 31–35 – разрывные нарушения. Главные (структурообразующие): выходящие на дневную поверхность (31), скрытые под вышележащими образованиями (32); разрывные нарушения второстепенные: надвиги (33), прочие – выходящие на дневную поверхность (34), скрытые под вышележащими образованиями (35). 36 – месторождение и проявления медно-никелевых руд: Шанучский рудный район (1–3): 1 – Шануч; 2 – Графитовый; 3 – Восточно-Геофизическое; Дукукский (5–14): 5 – Кувалорог; 6 – Олень; 7 – Нижне-медвежье; 8 – Аннабергитовая щель; 9 – Северное; 10 – Кортландитовое; 11 – Ясное; 12 – Квинум (I, II); 13 – Тундровое; 14 – Дукукское

Пирротин (фото 1) нередко представлен крупными (до 2,0 мм) изометричными, таблитчатыми и октаэдрическими кристаллами свежего облика. Встречаются своеобразные веретеноподобные или клиновидные двойники давления, единично – двойники превращения моноклинного пирротина в гексагональный. По периферии крупных зерен пирротина, на границе с пентландитом и халькопиритом, встречаются зерна пирротина размером до 0,1 мм. Фиксируется развитие по пирротину вторичного пирита, но в основной массе пирротин в этих

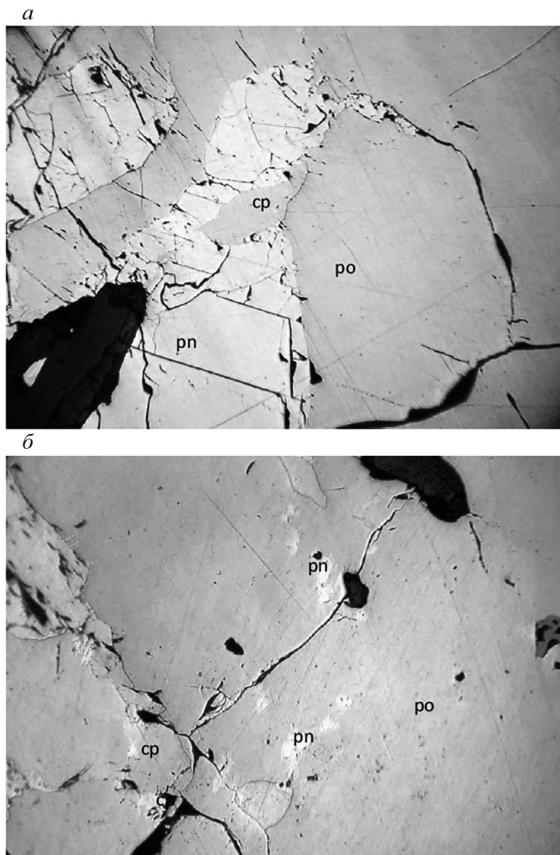


Фото 1. Типичные для массивных руд КНП взаимоотношения главных сульфидных минералов (проявление Восточно-Геофизическое) Фото под микроскопом в отраженном свете: а – срastание выделений пирротина (po) и пентландита (pn); ксеноморфное выделение халькопирита (сп) в пентландите (обр. 169–17); б – пламеневидные выделения пентландита (pn) в пирротине (po); структура распада твердого раствора (обр. 169–20)

рудах неизменен. Из рудных минералов в сростании с пирротинном находятся зерна пентландита, который по трещинам спайности замещен виоларитом. Для внутреннего строения пирротина характерны веретенообразные, линзовидные и пламенивидные выделения пентландита II, являющиеся результатом распада твердого раствора.

Выделения пентландита I состоят из крупных (до 1,0 мм) эвгедральных и субгедральных кристаллов. В периферических зонах выделений пентландита размер зерен минерала уменьшается (до 0,1–0,2 мм), а расположенные между зернами пирротина апофизы выделений пентландита состоят из еще более мелких (0,0п мм) изометрических и ксеноморфных зерен.

Халькопирит представлен ксеноморфными выделениями, выполняющими интерстиции между зонами пентландита I и пирротина, и пространственно приуроченными к нерудным включениям. В пентландите I вокруг отдельных силикатных прожилков развиты оторочки виоларита.

Рудные минералы, выполняющие интерстиции между зернами породообразующих силикатов, характеризуются компактным типом сростания, хотя встречаются и ячеистые структуры. Пространство между рудными минералами, в этом случае, выполняется силикатами.

Руды характеризуются высокими содержаниями никеля (среднее по объектам составляет от 3,47 до 7,58 %), меди (0,92–1,83) и кобальта (0,08–0,19 %). Содержания золота, палладия и платины достигают десятых долей грамма на тонну (Au – до 0,32 г/т; Σ ЭПГ – 0,33–1,16 г/т) (рис. 2, 3).

В целом же можно говорить о формировании породообразующих и рудных минералов вследствие проявления единого магматического процесса в результате разделения расплава на две несмешивающиеся жидкости, кристаллизация которых происходила по мере снижения температуры, чем и объясняется проявление первично ориентированных сростаний как силикатов, так и рудных минералов.

Индикатором образования руды непосредственно из расплава является развитие мirmekитовых выделений пентландита в пирротине. Это позволяет предполагать, что эти руды формировались непосредственно из расплава. В образовании других типов руд заметную роль играли мета- постмагматические процессы.

Брекчиевидные руды занимают промежуточное место между массивными и прожилково-вкрапленными. Они имеют постепенные переходы к прожилково-вкрапленным и нередко локализованы в породах экзоконтактов интрузивных массивов. Общим для обоих типов руд является: сходство в пространственном размещении слагающих

их минеральных разновидностей, характер сростаний, соотношения силикатных и рудных минералов. Термин «брекчиевидный» имеет несколько собирательное значение. Нередко прожилково-вкрапленные руды сменяются прожилково-брекчиевидными, брекчиевидными, брекчиево-прожилковыми, полосчатыми, пятнистыми рудами, объединяемые в общий брекчиевидный тип.

Брекчиевидные руды отличаются от прожилково-вкрапленных значительно большей сульфидонасыщенностью (30–70 %), что приближает их к массивным. Наблюдаются переходы брекчиевидных руд с массивной текстурой. Минеральный состав и морфология минеральных агрегатов в брекчиевидных рудах в целом более сложная, чем в массивных и прожилково-вкрапленных, хотя существуют особенности структур минеральных агрегатов, типов сростаний рудных минералов, их состава, которые обеспечивают некоторое сходство с массивными рудами. Размеры сульфидных агрегатов, слагающих руды, колеблются от долей мм до первых см. Наиболее распространенной является аллотриоморфнозернистая структура. Менее широко встречаются гипидиоморфнозернистая, интерстициальная, ограниченно развиты структуры графическая, тесного сростания, петельчатая, колломорфная.

Брекчиевидные руды наиболее полно представлены на месторождении Шануч и рудопроявлении Аннабергитовая Щель [4, 7, 11]. Одной из главных составляющих руд являются обломковидные образования пород (20–70 %, в среднем 30 %). Это не типичные обломки пород, они имеют различные формы и размеры, состоят из фрагментов вмещающих пород, оплавленного кварца с оторочкой гранофира, сцементированы сульфидным материалом (до 70 %).

Состав брекчиевидных руд КНП крайне разнообразен и изменчив не только по структурно-текстурным и минералогическим признакам, но и по количественным соотношениям основных и второстепенных минералов. Наиболее изучен в рудах месторождения Шануч (р.т. 1; р.т. 4). Даже в аншлифах, отобранных из одного рудного тела объекта, состав их сильно колеблется. Наряду с главными рудными минералами в основной состав брекчиевидных руд иногда входит виоларит, пирит. Вариации количественных соотношений главных сульфидов обуславливают разнообразие минеральных разновидностей руд, связанных между собой постепенными переходами. По минеральному составу руды можно разделить на существенно пирротиновые (пирит-виоларит-пирротиновые, халькопирит-виоларит-пирротиновые), существенно пиритовые (халькопирит-виоларит-пиритовые и виоларит-пиритовые руды), халькопиритовые (виоларит-пирротин-халь-

копиритовыми) и виоларитовые(пирит-пирротин-халькопирит-виоларитовые).

Существенно пирротиновые руды, как правило, располагаются ближе всего к массивным. Остальные руды, выделенные по минералогическому признаку, расположены ближе к контакту с вмещающими породами и на большем удалении от массивных, приурочены к краевым частям рудного тела. Это участки развития более поздних ассоциаций минералов, в сростании с которыми находятся минералы других парагенезисов.

Особенностью брекчиевидных руд является присутствие пирита с повышенным содержанием никеля. В отдельных образцах в брекчиевидных и прожилково-густовкрапленных рудах рудного тела 1 на месторождении Шануч содержание никеля достигает 5 %.

Средние содержания полезных компонентов в брекчиевидных рудах (рис. 2, 3) существенно ниже, чем в массивных (Ni – 1,19–5,31 %; Cu – 0,71–0,88 %; Co – 0,09–0,12 %; Σ ЭПГ – 0,46–0,62 г/т).

Выявлена минералогическая зональность рудного тела 1 на месторождении Шануч [7], в центральной части которого развиты массивные и брекчиевидные руды существенно пирротинового состава. В периферических зонах рудного тела развиты прожилковые, брекчиевидно-прожилковые и прожилково-вкрапленные руды.

В существенно пиритовых, халькопиритовых, виоларитовых типах брекчиевидных и прожилково-вкрапленных руд (в основном на месторождении Шануч – р.т. 1, р.т. 4; проявлении Аннабергитовая Щель), в экзо- и эндоконтактных частях рудовмещающего интрузива, встречены более поздние парагенетические ассоциации минералов, где главными являются пирит, виоларит, из редких появляются никелистый пирит, герсдорфит, сфалерит, никелин, магнетит.

В рудах, особенно вблизи тектонических контактов, происходит замещение пирротина пиритом, магнетитом, марказитом, разложение пентландита. По мнению ряда исследователей [2] участки развития поздних ассоциаций обычно приурочены к пострудным нарушениям, смещающими залежи массивных руд в объектах.

При скоплении прожилков и густых вкраплений руды образуют **пятнистые (сетчатые)** текстуры. Они характерны для руд Восточно-Геофизического проявления. Руды имеют халькопирит-пентландит-пирротиновый, петландит-пирротин-халькопиритовый состав, характеризуются неравномернозернистыми, аллотриоморфнозернистыми, сидеронитовыми, интерстициальными, распада твердого раствора структурами. Содержание сульфидов в пятнистых рудах составляет 50–65 %.

Пирротин в них представлен крупными (до 3 мм) идиоморфными кристаллами, содержащими пламеневидные и пластинчатые выделения пентландита. Выделения пентландита, состоящие из мелких (0,05–0,2 мм) ксеноморфных зерен, выполняют промежутки между зернами пирротина. В выделениях пентландита наблюдаются прожилки виоларита. Халькопирит представлен ксеноморфными выделениями, цементирующими все ранее выделившиеся сульфидные минералы. В халькопирите наблюдались редкие мелкие изометрические выделения никелина.

Прожилково-вкрапленные руды встречаются на всех сульфидных медно-никелевых оруденениях КНП, характеризуются многообразием текстурных рисунков и представлены относительно крупными агрегатами сульфидных минералов. Эти образования также наблюдаются и в интрузивных породах. Комбинации различных текстурных рисунков и разнообразие сростания сульфидов с нерудными минералами создает пеструю картину строения руд.

Для этого типа рудных образований больше характерны аллотриоморфнозернистые структуры, а также сидеронитовая, гипидиоморфнозернистая, интерстициальная, каемковая, реже оторочковая, тесного сростания. Причем, совместно с прожилками сульфидов находится и вкрапленность рудных минералов во вмещающих породах. Минеральный состав рассматриваемых руд неоднороден: в одних образцах руда представлена преобладающим пирротинном, наряду с пентландитом и халькопиритом, в других – преобладает халькопирит или пирит. Содержание виоларита в образцах колеблется от 0,п до 15 %.

Во вкрапленниках и прожилках наиболее широко распространен пирротин. Пентландит чаще находится уже не в виде проявлений распада твердого раствора, а в форме наложенных зернистых образований, совместно с халькопиритом, на выделения пирротина. Располагаются зерна этих минералов, как правило, во внешних периферийных зонах вкрапленников и прожилков, нередко образуя оторочки вокруг зерен пирротина. Это вторая генерация пентландита и халькопирита. В последнем иногда встречаются мельчайшие округлые включения сфалерита в форме эмульсионной вкрапленности, как результат распада твердого раствора. В пирротинсодержащей и пиритовой руде на границе силикатного и сульфидного материалов наблюдается смятие зерен пирита, а в приконтактных пустотах в породе заполнены лишь горловинные участки. Эти факты свидетельствуют о том, что внедрившийся сульфидный расплав был, вероятно, вязкой консистенции. Соотношение пирротина, пентландита и халькопирита примерно 3:2:1.

При сопоставлении геохимических особенностей прожилково-вкрапленных, брекчиевидных и массивных руд КНП отмечается закономерное повышение в последних содержания железа, никеля и кобальта, что может быть объяснено возрастанием общего количества сульфидов в рудах. Вместе с тем, содержание меди в существенно пирротиновых брекчиевидных рудах выше, чем в массивных.

Вкрапленные руды относятся к наиболее распространенному типу руд КНП, характеризуются вкрапленной и пятнистой текстурой. Вкрапленная и тонковкрапленная сульфидная минерализация относятся к зонам рассеянной минерализации, связанной с сингенетическим оруденением, обычным для всех интрузивных рудомещающих пород.

Количество вкрапленных сульфидов в породах варьирует от весьма густой вкрапленности до редкой и, в некоторых случаях, сульфидная минерализация составляет около 50 % площади аншлафа. Размер вкрапленников колеблется от 0,01 до 1–5 мм.

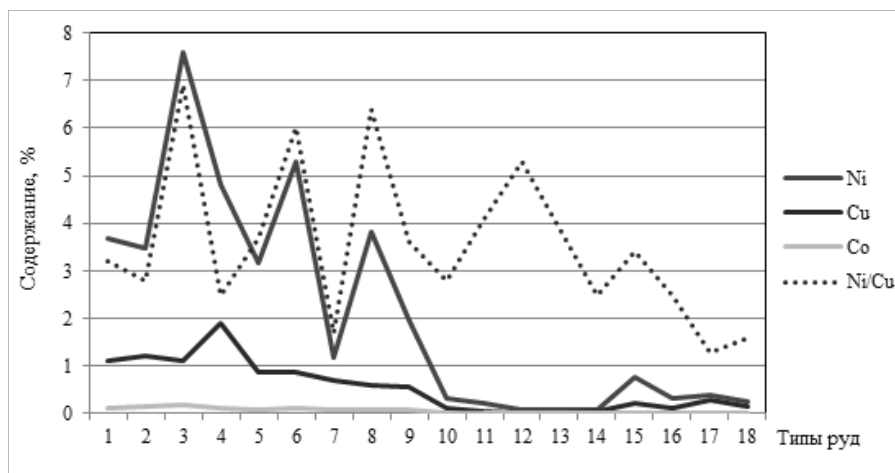


Рис. 2. Средние содержания основных полезных компонентов в различных типах руд месторождения Шануч и проявлений КНП: по оси x: 1–4 – руды массивные: 1 – Восточно-Геофизическое, 2 – Рассоха, 3 – Шануч, 4 – Аннабергитовая Щель; 5–7 – сетчатые, брекчиевидные: 5 – Восточно-Геофизическое, 6 – Шануч, 7 – Аннабергитовая Щель; 8–9 –прожилково-вкрапленные: 8 – Шануч, 9 – Восточно-Геофизическое; 10–18 – вкрапленные: 10 – Шануч, 11–13 –участок Медвежий, 14 – Олень, 15 – Северное, 16 – Аннабергитовая Щель, 17 – Квинум II, 18 – Хихку

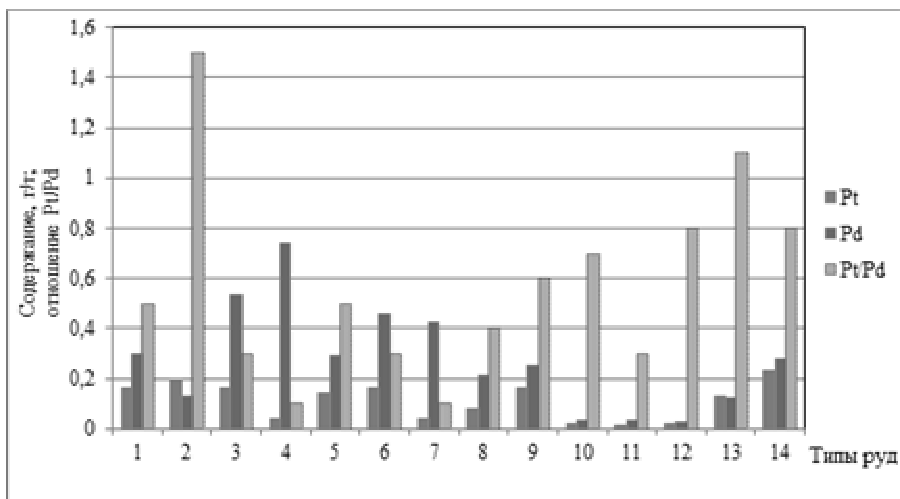


Рис. 3. Средние содержания платины и палладия в различных типах руд месторождения Шануч и рудопоявлений КНП: по оси х: 1–4 – руды массивные: 1 – Восточно-Геофизическое, 2 – Рассоха, 3 – Шануч, 4 – Аннабергитовая Щель; 5–7 – сетчатые, брекчиевидные: 5 – Восточно-Геофизическое, 6 – Шануч, 7 – Аннабергитовая Щель; 8–9 – прожилково-вкрапленные: 8 – Шануч, 9 – Восточно-Геофизическое; 10–14 – вкрапленные: 10 – Шануч, 11–12 –участок Медвежий, 13 – Северное, 14 – Квинум II

Распределение и характер вкрапленных сульфидных образований этого типа наиболее сложные по сравнению с другими типами руд. Среди многообразия форм сульфидной вкрапленности наибольшее распространение имеют следующие три вида обособлений:

– ксеноморфные выделения сульфидов сложной формы и различных размеров, возникающие в интерстициях между идиоморфными и аллотриоморфными зернами силикатных минералов вмещающих пород. Этот тип минеральных сростаний силикатов и сульфидов можно трактовать как сингенетичные руды с типичной интерстиционной, порфиоровидной гипидиоморфнозернистой структурой. В некоторых случаях, при значительном размере вкрапленников эти ксеноморфные выделения сульфидов имеют гнездообразную или «лапчатую» форму. Сульфиды в образованиях этого типа обычно представлены пирротинном, пентландитом, халькопиритом и реже другими сульфидами. Чаще всего это пирротин с пентландитом в виде «пламенеобразных» выделений последнего в минерале «хозяине» – пирротине, как результат распада твердых растворов. По периферии этих сложно построенных зерен сульфидов развиваются в виде оторочки

мелкие выделения пентландита, вероятно, второй генерации, а также халькопирита. Соотношения этих минералов: пирротина – пентландита – халькопирита ориентировочно составляет 3:2:1;

– каплеобразные (глобулеобразные от шарообразных до грушеподобных) изометричные и неправильные по форме выделения сульфидов в первично магматической силикатной матрице. Весьма характерно их внутреннее строение. Почти всегда наблюдается расслоение, обусловленное расположением халькопирита в верхней, а пирротина в нижней части вкрапленников. Макроскопически это наблюдалось в ультрамафитах на участке Медвежьем (Нижнемедвежье, Верхнемедвежье). Микроскопически такие выделения рудных минералов характеризуются четкими аллотриоморфными ровными очертаниями и состоят в основном из тех же сульфидных минералов: пирротина, пентландита и халькопирита, а соотношение их ориентировочно составляет 4:1:2.

Средние содержания полезных компонентов во вкрапленных рудах медно-никелевых объектов КНП существенно меньше, чем в других типах руд и составляют (%): Ni – 0,1–1,54; Cu до 0,36; Co до 0,05 (см. рис. 2); Σ ЭПГ – до 0,35 г/т.

Необходимо также отметить, что встречены тончайшие просечки рудных минералов, в большинстве случаев развивающихся по трещинам спайности силикатных минералов. Эти тончайшие и резкоудлиненные проявления рудной минерализации ассоциируют с вкрапленными выделениями сульфидов. По своему положению в пространстве, выполненном вмещающими оруденение породами, данные обособления можно считать в какой-то степени «эпигенетическими» инфильтрованными выделениями сульфидов по отношению к магматическим. Причем эти тончайшие прожилки чаще всего имеют практически монопирротиновый, монопентландитовый или монохалькопиритовый состав, а также мономагнетитовый. И только при увеличении мощности в них можно увидеть совместное нахождение этих рудных минералов.

В результате анализа трендов распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в массивных и брекчиевидных (в т.ч. прожилково-вкрапленных) рудах (рис. 4), отобранных из рудного тела 1 месторождения Шануч, выявлен отрицательный наклон кривой распределения РЗЭ в брекчиевидных и прожилково-вкрапленных рудах во вмещающих биотит-амфиболовых габбро.

В них более высокие концентрации РЗЭ (20–25 г/т) и повышенные содержания TiO_2 , Zr, Y, Nb. Вероятно, они кристаллизовались на позднемагматическом этапе из остаточных расплавов, насыщенных Cl, F, H_2O , которые способствовали переносу ЭПГ, а низкие количества

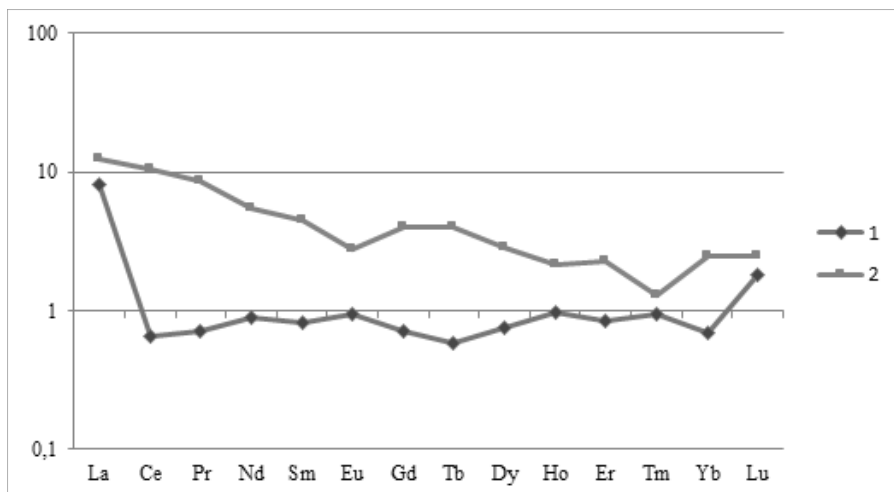


Рис. 4. Кривые распределения редкоземельных элементов, нормированные по хондриту [Taylor S. R., McLennan S. M., 1985] в рудах месторождения Шануч, рудное тело 1: 1 – массивная; 2 – брекчиевидная, переходящая в прожилково-вкрапленную руду

РЗЭ (4–5 г/т) в массивных рудах ($Ni = 6,28$ мас. %) в ультрамафитах показывают, что образование этих пород происходило, очевидно, на раннемагматической стадии в результате гравитационной отсадки сульфидов.

Несмотря на различия состава и форм выделений медно-никелевой сульфидной минерализации КНП, возможно с определенной степенью уверенности говорить, что массивные, сетчатые, брекчиевидные (пятнистые) руды, прожилково-вкрапленное и вкрапленное оруденения сингенетичны с интрузивными телами и локализованы как в приконтактовых, так и в других частях сложно дифференцированных рудоносных интрузий. Отмечается участие поздне-(мета-)магматических процессов в перераспределении рудного вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянгин О. Б. К сравнительной петрологии интрузивов северной и южной зон Камчатской никеленосной провинции. Часть первая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. №1. Вып. 23. – С. 168 –184.
2. Генкин А. Д., Дистлер В. В., Гладышев Г. Д. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука. 1981. 223 с.

3. Кунгурова В. Е. Состав руд сульфидного медно-никелевого проявления Восточно-Геофизическое (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: «Горная книга». Отдельный выпуск 2. 2014. – С. 343–349.

4. Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П. Медно-никелевое рудопроявление Аннабергитовая щель Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2014. – Отдельный выпуск 2. – С. 324–333.

5. Евстигнеева, Т.Л., Минеев С. Д., Чубаров В. М. и др. Некоторые вопросы минералогии и генезиса сульфидных никелевых руд Центральной Камчатки / Никеленосные базит-гипербазитовые комплексы Украины, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Апатиты. 1988. – С. 63–69

6. Полетаев В. А. Камчатская платиноидно-никеленосная зона – геология и рудоносность: Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. – М., 2004. – 22 с.

7. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Шанучское медно-никелевое рудное поле (Камчатка) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2011. – № 1. – С. 20–26

8. Степанов В. А., Гвоздев В. И., Трухин Ю. П., Кунгурова В. Е. и др. Минералы благородных и редких металлов в рудах Шанучского медно-никелевого месторождения (Камчатка) // Записки Российского минералогического общества. 2010. Ч. СXXXIX. № 2. – С. 43–58

9. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П. Платиноносность сульфидных медно-никелевых месторождений Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга», 2014. – Отдельный выпуск 2. – С. 334–342.

10. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Кувакин Г. В. Сульфидное медно-никелевое рудопроявление Рассоха (Дукукский рудный район, Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. – Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – С. 72–82.

11. Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П., Новаков Р. М. Состав руд сульфидного медно-никелевого проявления Аннабергитовая Щель (Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. – Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – С. 42–55.

12. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Алискеров А. А. Структурно-текстурные и минералогические особенности зоны окисления рудного тела № 1 месторождения Шануч (Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. – Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – С. 56–71.

13. Новаков Р. М., Трухин Ю. П., Кунгурова В. Е., Сидоров М. Д., Паламарь С. В., Философова Т. М. Медно-никелевые руды участка Восточно-Геофизический (Шанучское рудное поле, Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. №1. Вып. 33. – С. 34–45. **ПЛАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник; kunwe@rambler.ru,

Трухин Юрий Петрович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; ytrukhin2@yandex.ru,

Степанов В. А. – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; vitstepanov@yandex.ru,
Новаков Роман Михайлович – старший научный сотрудник лаборатории геоинформатики,
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 49–65.

V. Ye. Kungurova, Yu.P. Trukhin, V. A. Stepanov, R. M. Novakov

MINERAL VARIETIES OF DIFFERENT TYPES OF COPPER-NICKEL ORES OF THE KAMCHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE

The comparative analysis of the mineralogical composition features of various types of sulfide copper-nickel ores of the Shanuch deposit and a number of manifestations of the Kamchatka nickeliferous province (KNP) was made. Massive, reticulated, brecciated (spotted) ores, stringer-impregnated and impregnated mineralizations are syngenetic with intrusive bodies.

Key words: Kamchatka nickeliferous province, sulfide copper-nickel ores, chalcopyrite-pentlandite-pyrrhotite composition.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-49-65

AUTHORS

Kungurova V. Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher; kunwe@rambler.ru,
Trukhin Yu.P., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, ytrukhin2@yandex.ru,
Stepanov V. A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, vitstepanov@yandex.ru,
Novakov R. M., Senior staff scientist,
Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Selyangin O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2014. no 1. Vyp. 23. pp. 168–184.
2. Genkin A. D., Distler V. V., Gladyshev G. D. i dr. *Sul'fidnye medno-nikelevye rudy noril'skih mestorozhdenij* (Copper-Nickel ores of the Norilsk deposits). Moscow: Nauka. 1981. 223 p.
3. Kungurova V. E. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten'*. Moscow: ZAO «Gornaya kniga». Otdel'nyj vypusk 2. 2014. pp. 343–349.
4. Kungurova V. E., Stepanov V. A., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyj analiticheskiy byulleten'*. 2014. Otdel'nyj vypusk 2. pp. 324–333.
5. Evstigneeva, T.L., Mineev S. D., Chubarov V. M. i dr. *Nekotorye voprosy mineralogii i genezisa sul'fidnyh nikelovyh rud Central'noj Kamchatki* (Some questions Mineralogy and Genesis of sulfide Nickel ores of Central Kamchatka). *Nikelenosnye bazit-giperbazitovye komplekсы Ukrainy, Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka. Apatity*. 1988. pp. 63–69.

6. Poletaev V. A. *Kamchatskaya platinoidno-nikelenosnaya zona – geologiya i rudonost'* (Kamchatka platinoid-Nickel zone – Geology and ore potential): Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Moscow, 2004. 22 p.

7. Truhin Yu.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D., Kungurova V. E. *Vestnik SVNC DVO RAN*. 2011. no 1. pp. 20–26.

8. Stepanov V. A., Gvozdev V. I., Truhin Yu.P., Kungurova V. E. i dr. *Zapiski Rossijskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2010. CH. CXXXIX. no 2. pp. 43–58

9. Kungurova V. E., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. Moscow: 2014. Otdel'nyj vypusk 2. pp. 334–342.

10. Kungurova V. E., Truhin Yu.P., Kuvakin G. V. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2016. Special'nyj vypusk no 31, «Kamchatka-3». pp. 72–82.

11. Kungurova V. E., Stepanov V. A., Truhin Yu.P., Novakov R. M. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2016. Special'nyj vypusk no 31, «Kamchatka-3». pp. 42–55.

12. Kungurova V. E., Truhin Yu.P., Aliskerov A. A. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2016. Special'nyj vypusk no 31, «Kamchatka-3». pp. 56–71.

13. Novakov R. M., Truhin Yu.P., Kungurova V. E., Sidorov M. D., Palamar' S.V., Filosofova T. M. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2017. no 1. Vyp. 33. pp. 34–45.



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОЗОНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЛАВНЫХ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ РУД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Обобщены имеющиеся данные, полученные в разные годы по результатам микронзондового анализа главных сульфидных минералов, отобранных из различных типов руд Камчатской никеленосной провинции (КНП). Проведен их сравнительный анализ. Изменение состава рассмотренных рудных минералов свидетельствуют об эволюции сульфидного расплава в процессе его кристаллизации, о поздние-(мета-)магматических процессах преобразованиях руд, более широко проявленных на проявлении Аннабергитовая Щель и месторождении Шануч.

Ключевые слова: Камчатская никеленосная провинция, медно-никелевое оруденение, сульфидные минералы, элементы-примеси.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-66-82

Ранее опубликованные рентгеноспектральные микронзондовые исследования состава главных рудообразующих минералов сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч и некоторых проявлений Камчатки [1, 2, 3, 4] дополнены новыми материалами, полученными при их изучении в 2002–2016 гг. сотрудниками НИГТЦ ДВО РАН по договорам с ЗАО НПК «Геотехнология» [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Обобщены имеющиеся данные, полученные в разные годы по результатам микронзондового анализа сульфидов – пирротина, пентландита, виоларита, халькопирита и пирита (рис. 1). Минералы отобраны из различных типов руд месторождения Шануч, проявлений Восточно-Геофизическое, Аннабергитовая Щель, Рассоха, Нижне-медвежье, Кувалорог. Проведен их сравнительный анализ, сделаны выводы о типохимических особенностях минералов и условиях формирования руд КНП.

Анализировались развивающиеся по минералам гипергенные минеральные формы; у пентландитов – это минеральные выделения различных морфогенетических типов: самостоятельные компактные зерна и пламеневидные, пластинчатые микровключения в пирротине,

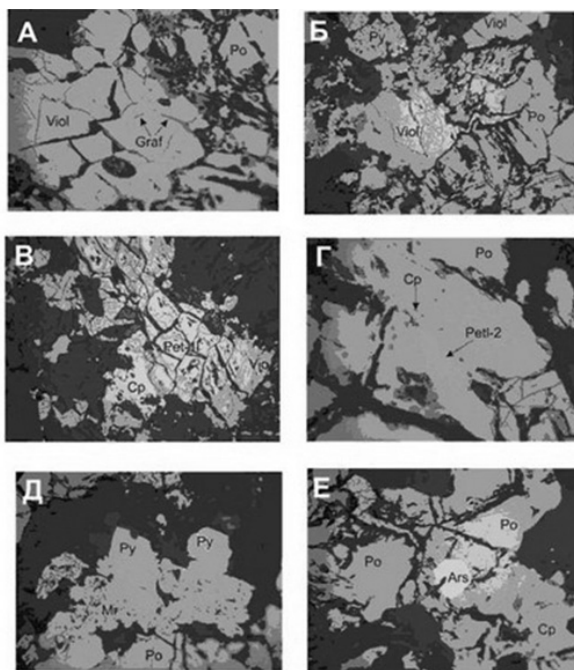


Рис. 1. Характерные сростания минералов в медно-никелевых рудах КНП: А – замещенный виоларитом (Viol) пентландит среди пирротина (Po). В виоларите пластинка графита (увел. 200х); Б – характерные сростания виоларита и пирротина с пиритом (Py). Виоларит и пирротин замещаются гидроксидами железа (серое). Увел. 100х; В – каемочная структура замещения пентландита (Pet) виоларитом (Viol). Увел. 100х; Г – пламеневидные скопления пентландита-2 (Petl-2) вдоль халькопиритового (Cp) микропрожилка в пирротине (Po). Увел. 200х; Д – марказит (Mr)-пиритовые (Py) вкрапленники по границам зерен пирротина (Po). Увел. 100; Е – идиоморфное зерно сульфоарсенида (Ars) в пирротине (Po). Увел. 200. Фото выполнены Гвоздевым В. А. на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL JXA-8100, ДВГИ ДВО РАН

представляющие продукт распада твердого раствора. Наряду с основными элементами (S, Fe, Ni, Cu, Co), в некоторых минералах определялись характерные и возможные элементы-примеси (Pb, Bi, Zn, Sb, Se, Te, Sn, Ag и др.). Низкий уровень чувствительности микрозондового (0,1–0,5 %) анализа, к сожалению, не позволяет получить достоверные результаты по элементам-примесям, содержание которых близко к этому уровню или ниже его.

Исследования рудных минералов из руд КНП производились в разные годы в лабораториях:

– микронзондовой и оптической минералогии ИВиС ДВО РАН на рентгеновском микроанализаторе CAMEBAX-244 оператором Т. М. Философовой. Программы для анализа составлены старшим научным сотрудником лаборатории В. М. Чубаровым;

– в отделе микроанализа ИЭМ РАН на CamScan-2300 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором на полупроводниковом Si(Li) детекторе Link-IMSA оператором А. Н. Некрасовым;

– в ДВГИ ДВО РАН на рентгено-спектральном микроанализаторе JXA JEOL-8100 Гвоздевым В. А., Молчановой

В табл. 1, 2 приведены сводные данные, составленные по результатам локального микронзондового исследования состава рудных минералов.

Пирротин. Выделено три морфологических типа пирротина:

– наиболее ранние выделения в виде вкрапленности мелких зерен в мафит-ультрамафитовых породах и взаимные прорастания пирротина и пироксена;

– преобладающая морфологическая разновидность, представленная крупными (1–2 мм) идиоморфными, реже гипидиоморфными кристаллами, имеющими свежий облик, краевые части которых иногда корродированны, а некоторые имеют зональное строение;

– поздние прожилки пирротина, развивающиеся в трещинках во вмещающих породах, а также ксеноморфные выделения пирротина в пустотках выщелачивания в центральных частях корродированных кристаллов пирита.

В рудах из всех медно-никелевых объектов КНП пирротины характеризуются пониженным содержанием железа (в сравнении с теоретическим) [12, 13.] и повышенным – серы и никеля (табл. 1). При этом пирротины Шанучского месторождения резко выделяются по соотношению двух минералообразующих элементов. В них самое высокое содержание серы (42,12 %) и самое низкое – железа (55,30 %), в отличие от пирротинов из руд других проявлений (37,72–40,61 % серы; 57,45–59,07 % железа), в том числе Восточно-Геофизического (41,61 % серы; 58,20 % железа).

Главными элементами-примесями в пирротинах являются никель, кобальт и медь. Проведенные исследования доказывают, что более высокие содержания никеля отмечаются в пирротине, содержащем включения пентландита, совместно с которым он образует продукты распада твердого раствора. Максимальные его значения характерны для руд, связанных с небольшими по размерам интрузиями: месторождение Шануч (1,64 %), проявления Аннабергитовая Щель (1,51 %), Квинум (1,58 %). Наибольшие вариации содержаний

наблюдались на участке Медвежий (0,02–4,20 %) во вкрапленных в ортопироксенитах рудах, отобранных из керна скважины (табл. 1).

Отмечается некоторая закономерность в отношении распределения серы и никеля в пирротинах различной генетической принадлежности. Так, в сингенетичных пирротинах отмечаются относительно низкие средние содержания никеля и серы, соответственно 0,27 и 40,5 %. В пирротинах второго морфологического типа среднее содержание никеля составляет 1,19, а серы – 40,87 %. В поздних пирротинах среднее содержание никеля возрастает до 1,61 %, серы – до 41,44 %. Эти данные, во-первых, указывают на возможную корреляцию никеля и серы, а во-вторых, дают основание предположить, что в процессе преобразования руд происходило концентрирование никеля в пирротинах.

Примесь кобальта в пирротинах незначительна и колеблется от почти нулевых значений до 0,11 %. Содержания кобальта имеют близкие, почти одинаковые значения на месторождении Шануч, проявлениях Аннабергитовая Щель, Кувалорог. Исключение составляют лишь пирротины из руд Медвежьего с большим размахом содержания не только никеля, как было отмечено выше, но и кобальта – от 0 до 1,95 %, а также на проявлении Квинум II (0,30 %). Уровень содержания меди и их предельные значения примерно одинаковы во всех пирротинах. Примеси теллура и серебра встречены в основном в пирротинах второго, висмута – в пирротинах третьего морфологического типов.

Соотношение основных главных элементов-примесей (никель, кобальт, медь) в пирротинах исследуемых объектов медно-никелевой минерализации показано на диаграмме Ni–Co–Cu (рис. 2), на которой видно, что пирротины из рудопроявлений южной зоны КНП (Аннабергитовая Щель, Кувалорог, Квинум) вписываются в поле пирротинов месторождения Шануч; пирротины проявлений Рассоха, Восточно-Геофизическое имеют никелевую, а проявления участка Медвежий кобальт-никелевую специализацию.

Сравнение химического состава пирротинов в массивных рудах КНП с составом пирротинов во всех остальных типах руд показывает, что количество железа уменьшается от ранних вкрапленных руд – к затронутым мета- постмагматическими преобразованиями брекчиево-жильным и массивным. По мере снижения отношения в пирротинах Fe/S (от 1,37 в массивных рудах до 1,66 во вкрапленных) увеличивается количество никеля (от 0,18 % до 3,18 %). В пирротинах из массивных руд Шанучского месторождения резко повышено количество никеля, по сравнению с таковыми из Восточно-Геофизического рудопроявления: 1,53 % против 0,34 % (средние значения).

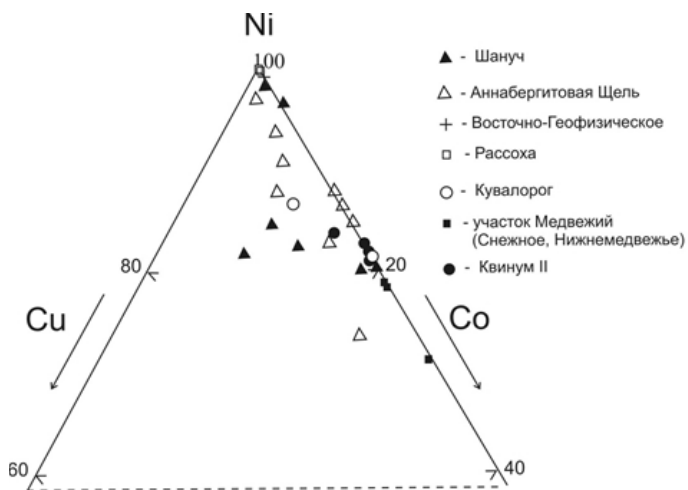


Рис. 2. Диаграмма Cu-Ni-Co для пирротинов сульфидного медно-никелевого месторождения Шануч и некоторых рудопроявлений Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны

Пентландит. В рудах и минерализованных породах КНП пентландит представлен следующими морфологическими типами:

- идиоморфными кристаллами, которые характеризуются повышенным содержанием никеля – 36,32– 38,68 %;
- интерстициальными выделениями, состоящими из мелких зерен; количество никеля составляет 32,81–34,70 %;
- пламенивидными пластинчатыми и линзовидными включениями в пирротине, являющимися продуктами распада твердого раствора, обедненными никелем (29,20–29,96 %), кобальтом (0,10–0,28 %), но с повышенным содержанием железа (до 34,97 %).

К первому типу относятся выделения, состоящие из крупных (до 1 мм) кристаллов пентландита. Эти образования оконтуриваются зонами прожилковых выделений пентландита, состоящими из мелких (0,03–0,2 мм) изометрических, остроугольных и неправильных зерен, которые насыщены мелкими трещинами и порами. Они заполняют интерстиции между зернами ранее отложившегося пирротина. Вероятно, кристаллизация пентландита первого типа начиналась почти одновременно с отложением пирротина и продолжалась после полного выделения последнего, давая остаточные, мелкие зерна пентландита второго морфологического типа. Пентландит третьего морфологического типа представлен пластинчатыми, линзовидными и розетковидными включениями в пирротине. По-видимому, эти выделения являются продуктами распада твердого раствора.

К отдельному типу пентландита следует отнести нитевидные прожилки, прожилково-волоконистые и радиально-лучистые агрегаты минерала, располагающиеся в зонах коррозии пирротина.

В целом пентландиты из руд проявлений КНП являются менее железистыми (28,95–34,72 %), незначительно более сернистыми (33,68–34,74 %) относительно их теоретического состава [13]. Ближе к последнему химический состав пентландитов из руд проявлений Восточно-Геофизическое и Рассоха (табл. 1). Что касается пентландитов из руд месторождения Шануч, то они выделяются более высоким средним содержанием никеля (36,06 %), а участок Медвежий низким (29,94 %) на фоне остальных проявлений (31,19–34,54). Установлена постоянная примесь кобальта (0,10–1,78 %), присутствуют медь, серебро, висмут, теллур. В рудопоявлениях Аннабергитовая Щель и Квинум выявлен аргентопентландит с содержанием серебра от 8,91 до 23,55 %.

Наибольшие вариации содержаний железа, серы, никеля, кобальта наблюдались в пентландитах руд проявления Аннабергитовая Щель и месторождения Шануч. Среднее содержание железа в них самое низкое из всех исследуемых объектов – 28,82–28,95 %.

Пентландиты из руд месторождения Шануч и проявления Аннабергитовая Щель близки по химическому составу; отношение Fe/Ni в них составляет 0,8–0,83. К другой группе можно отнести пентландиты из руд проявлений Восточно-Геофизическое, Рассоха, Кувалорог, участок Медвежий (отношение $Fe/Ni=0,90-1,15$).

Халькопирит. Халькопирит, являющийся наиболее поздним по времени выделения сульфидом, цементирует и пересекает все ранее выделившиеся основные рудные минералы. Встречается в виде зерен и прожилков в сульфидах и силикатах. Выделения халькопирита состоят, как правило, из мелких (0,0_n мм) ксеноморфных зерен свежего облика. Широко распространенное явление – размещение в приконтактной части вмещающей породы вкрапленности мелких зерен и гнезд халькопирита. Халькопирит может быть импрегнирован в коррозионные пустотки на контактах вмещающей породы и рудной массы. В зональных сульфидных прожилках халькопиритом выполняется, как правило, центральная часть. Отмечается коррозия отдельных выделений халькопирита с заполнением образующихся пустот прожилковой разновидностью виоларита. В отдельных случаях от выделений халькопирита во вмещающую породу отходят многочисленные апофизы и прожилки.

В целом содержание минералообразующих элементов (железо, медь, сера) в халькопиритах из руд всех исследуемых объектов мало

Средний химический состав рудных минералов (пирротина, пентландита, аргентолентландита, пирита) из руд КНП

Месторождение, рудопроявление (кол-во образцов)	Элементы, % (в числителе – средние содержания; в знаменателе – минимальные–максимальные)									
	S	Fe	Co	Ni	Cu	Ag	Bi	Te	Сумма	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Пирротин										
Теоретический состав [12, 13.]	36,47 (38,5–38,95)	63,53 (61,05–61,5)		не >1					100,00	
Шануч (33)[8]	40,12 39,20–42,91	56,30 54,44–58,61	0,11 0,04–0,43	1,64 0,92–2,77	0,03 0,02–0,27	– 0–0,04	0,20 0,14–1,32	– 0–0,09	99,40	
Восточно-Геофизическое (7) [8]	40,61 39,64–42,42	58,20 57,22–58,78	–	0,36 0,18–0,64	–	–	–	–	99,17	
Аннабергитовая Щель (22) [8]	38,25 35,61–41,11	58,45 54,22–58,78	0,10 0,06–0,52	1,51 1,1–2,6	–	–	–	–	98,31	
*Рассоха (3) [7]	40,08 39,69–40,47	58,78 58,54–59,17	0,09 0,06–0,13	0,66 0,52–0,82	0,15 0–0,38	–	–	–	99,76	
*Кувалорог (2)	39,35 39,01–39,48	57,96 57,88–58,03	0,11 0,08–0,15	0,78 0,72–0,83	0,02 0–0,04	–	0,81 0,68–0,95	0,08 0–0,16	99,11	
*Медвежий (6)	37,72 37,06–39,48	59,07 55,03–62,17	0,77 0,01–1,95	1,14 0,02–4,20	0,10 0–0,24	–	–	0,03 0–0,12	99,83	
*Квинум (4)	40,03 39,27–40,55	55,15 55,06–55,20	0,30 0,27–0,32	1,58 1,38–2,0	0,02 0–0,06	0,12 0–0,40	1,21 0,95–1,56	0,17 0,07–0,38	98,58	
Пентландит										
Теоретический состав [12]	33,23	32,55		34,22					100,00	
Шануч (10) [8]	36,48 32,64–36,96	28,80 28,51–30,47	0,83 0,28–1,17	38,06 36,74–38,68	– 0–0,31	– 0–0,11	– 0,0–1,38	– 0–0,41	99,99	

Восточно- Геофизическое (9) [8]	34,14 33,05-35,71	31,81 29,43-34,78	1,0 0,19-1,70	32,88 29,91-34,86	-	-	-	99,83
Аннабергитовая Щель (19) [8]	36,74 31,29-39,97	29,82 28,21-34,97	1,78 0,10-2,11	30,54 29,55-37,32	-	0-1,9	0-1,28	98,88
*Рассоха (6) [7]	34,46 33,88-36,41	30,51 28,92-33,81	0,72 0,41-1,10	34,11 29,20-35,94	0,08 0-0,16	-	-	99,91
*Кувалорог (3)	34,15 33,75-34,76	30,78 29,63-32,69	1,33 1,04-1,78	31,19 28,95-32,81	0,03 0-0,09	0,46 0,27- 0,61	0,01 0-0,02	99,62
*Медвежий (5)	33,68 33,61-34,76	34,72 34,58-34,86	1,46 1,30-1,62	29,94 29,91-29,96	-	Zn-0,18 0,07- 0,29	-	99,98
Аргентопентландит								
Аннабергитовая Щель (6) [8]	30,08 29,86-31,67	33,10 32,83-36,2	-	20,16 18,90-23,11	3,00 1,32- 3,01	13,67 8,91- 23,55	-	100,01
*Квинум (1)	31,78	33,01	0,23	19,60	1,10	12,02	0,54	98,47
Пирит								
Теоретический со- став [12,13]	53,45	46,55						100,00
Шануч (32) [8]	52,29 48,72-53,79	45,48	0,06 0,01-1,5	1,64 0,05-2,95	-	-	-	99,47
Аннабергитовая Щель (25) [8]	51,80 49,09-53,15	44,98 39,2-44,66	-	2,87 1,12-3,66	-	-	0-1,48	99,65
Примечание. Анализы минералов осуществлены: - на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL JXA-8100 (аналитик Г. Б. Молчанова, ИГИП ДВО РАН); * - на SamScan-2300 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором на полу-проводниковом Si(Li) детекторе Link-IMSA (оператор Некрасов А. Н., отдел микроанализа ИЭМ РАН).								

Аннаберг-Товая Шель (19) [8]	34,41 33,69- 36,22	31,14 28,91- 31,90	- 0-0,52	- 0-0,08	33,98 31,23- 34,52	-	0,24	-	- 0-0,12	- 0-0,17	- 0-0,03	- 0-0,17	- 0-0,46	- 0-1,78	99,53
*Рассоха (3) [7]	35,35 35,01- 35,75	30,24 30,08- 30,50	0,21 0-0,40	0,09 0-0,18	33,80 33,57- 33,93	0,08 0-0,23	- 0-0,10	-	0,08 0-0,12	0,13 0-0,37	-	-	-	99,98	
*Кувалор (2)	35,37 35,27- 35,48	29,81 29,69- 29,93	0,035 0-0,07	0,055 0,02- 0,09	31,81 31,53- 32,1	0,27 0,21- 0,34	0,07 0,04-0,1	0,01 0-0,03	0,14 0-0,28	0,01 0-0,01	0,17 0-0,35	1,37 1,29- 1,48	0,78 0,73- 0,84	99,93	
*Медвежий (1)	35,26	30,17	0,11	0,22	33,89	0,02	0,23	0,06	-	0,04	-	-	-	100,00	
	35,21 34,7- 35,99	29,71 29,28- 30,15	0,08 0-0,2	0,03 0-0,21	32,38 30,91- 33,49	0,06 0-0,29	0,02 0-0,08	- 0-0,33	0,16 0-0,48	0,04 0-0,15	0,12 0-0,38	0,16 0,4- 1,85	0,72 0-2,0	99,81	

*Рассоха (4) [7]	42,99 42,63- 43,37	28,82 27,57- 29,97	0,93 0,59- 1,23	26,78 25,76- 28,45	0,20 0-0,69	0,07 0,1-0,16	- 0- 0,19	-	-	-	-	-	-	-	0-0,18	-	99,7 9
*Квинум (7)	41,08 39,77- 43,31	26,39 23,17- 37,85	1,49 0,78- 4,45	24,56 13,59- 29,10	0,04 0-0,17	0,12 0,04-0,22	0,10 0- 0,33	0,03 0-0,21	-	0,14 0-0,34	0,07 0-0,28	0,11 0-0,30	0,13 0-0,28	0,72 0-1,06	1,01 0,34- 1,46	96,0 0	
Примечание – Анализы минералов осуществлены:																	
– на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL JXA-8100 (аналитик Г. Б. Молчанова, ИГиП ДВО РАН);																	
* – на SamScan-2300 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором на полупроводниковом Si(Li) детекторе Link-IMSA (оператор Некрасов А. Н., отдел микроанализа ИЭМ РАН)																	

чем отличаются друг от друга и от их теоретического состава (табл. 2). Следует лишь отметить незначительно пониженные концентрации меди по сравнению с теоретическим составом. Отношение Cu/Fe колеблется в них незначительно – от 1,04 до 1,13. Халькопириты месторождения Шануч и проявления Аннабергитовая Щель отличаются разбросом значений серы, железа и меди, в них присутствует наибольшее количество никеля (до 0,56 %), кобальта (до 0,52 %). В минералах установлены примеси теллура, а также висмута, свинца, цинка, сурьмы, олова, мышьяка, которые косвенно свидетельствуют о проявлении мета- постмагматических преобразований.

Результаты изучения гипогенного и гипергенного виоларита из руд месторождения Шануч, его ассоциации и характерные морфологические признаки подробно приведены другими исследователями в ранее опубликованных работах [1, 2, 4].

Виоларит, изученный нами из руд различных объектов КНП представлен следующими морфологическими типами:

- массивным, состоящим из мелких тонкопористых зерен, со средним содержанием (%): Fe – 25,6; Ni – 31,34; S – 41,69; Co – 0,81;
- прожилковым, имеющим следующий химсостав (%): Fe – 29,81; Ni – 26,35; S – 42,12; Co – 0,58.

Виоларит первого типа заполняет пространство между срастаниями идиоморфных зерен пирротина. Ксеноморфные выделения виоларита, размер которых колеблется от 0,0_n до 2 мм, состоят из мелких 0,0_n–0,1 мм, тонкопористых, трещиноватых зерен неправильной формы. Реже наблюдаются почковидные выделения виоларита. В выделениях виоларита первого типа иногда встречаются остатки ксеноморфных зерен пентландита. Выделения виоларита I в целом распределены в рудах неравномерно. По более массивному развивается прожилковый виоларит. При позднемагматических преобразованиях происходит вытеснение никеля железом; при этом высвобождается и кобальт. Из элементов-примесей установлены медь, серебро, висмут, унаследованные от замещаемых ими пентландитов; при этом в прожилковых разновидностях эти содержания выше, чем в массивных.

Виоларит второго типа развит в виде оторочек и прожилков в кристаллах пирротина, пирита и виоларита I.

Исследуемые из руд КНП виолариты (табл. 2) характеризуются повышенным содержанием железа (среднее содержание 26,39–28,82 %). Сопоставление полученных нами данных по среднему составу с теоретическим позволяет предположить, что, как было отмечено выше, при образовании виоларитов происходило частичное замещение никеля

железом, поскольку содержания никеля (среднее по объектам составляет 24,56–30,01) во всех виоларитах гораздо ниже теоретического (39,9 %); кобальт составляет 0,74–1,49 %. Минерал является вторичным по пентландиту и наследует химические особенности последнего. Также, как и у пентландита, содержания никеля, железа, серы, кобальта варьируют в широких пределах.

Пирит. Среди пиритов, отобранных из руд КНП, выделяются несколько морфологических типов. Широко распространены зональные пиритовые образования, присущие пиритовым брекчиевидным, прожилковым, сетчатым и пятнисто-прожилковым рудам, описанным ранее [14]. Для такого же типа руд характерны и графические сростания тонкозернистых пиритовых агрегатов с кварцем. Следующий морфологический тип пиритовых образований представлен крупными (до 1 мм) субгидральными и идиоморфными кристаллами, центральная часть которых зачастую корродирована с образованием субграфической структуры. Кристаллы заключены в мелкозернистую кварцево-пиритовую массу, входящую в состав сульфидных полос, образующих параллельные прожилки. Эти выделения являются поздними образованиями и пересекают основные сульфидные минералы.

Средний химический состав исследуемых пиритов в рудах КНП: Fe – 51,80–52,27; S – 44,98–45,05; содержит примеси никеля – до 3,99 %, кобальта до 1,5 %, серебра, висмута (табл. 2). Для поздних прожилков пирита отмечается повышенное содержание никеля (3,14 %) и кобальта (0,10 %). Средний состав пиритов данного типа (%): Fe – 43,86; S – 52,05; примесь серебра (0,044). Более широко распространен пирит на месторождении Шануч. Здесь иногда содержание никеля в пирите достигает 5 %, а в единичном случае (обр. 139-14 – рудное тело 4) установлен никелистый пирит с содержанием никеля, равным 15,71 %. Отмечается обратная корреляционная зависимость между никелем, железом и серой в пиритах. По разрезу рудного тела 1 месторождения Шануч прослеживается увеличение концентрации никеля в пиритах с глубиной от 0,19 % (гор. 440-450 м), до 0,78 % (гор. 320-360 м) и до 4,45 % (гор. 240-280 м), а затем на гор. 200–220 м – его понижение до 2,75 %. При этом происходит уменьшение железистости пиритов.

Изменение химического состава рассмотренных рудных минералов, отобранных из различных типов руд и объектов КНП, а именно – снижение в сульфидах содержания железа и рост концентраций серы, никеля, кобальта от вкрапленных, сетчатых раннемагматических до позднемагматических брекчиевидных и массивных руд свидетельствуют об эволюции сульфидного расплава в процессе его кристалли-

зации, а также о последующих поздне-(мета-)магматических преобразованиях руд, более широко проявленных в южной части КНП на рудопроявлении Аннабергитовая Щель, а в северной – на месторождении Шануч, особенно вблизи тектонически сорванных контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградова Р. А., Округин В. М., Свешникова А. Л., Сошкина Л. Т.* Виоларит из медно-никелевого месторождения Шануч на Камчатке // Новые данные о минералах СССР. М.: Наука. 1978. Вып. 27. С. 28–38.

2. *Полетаев В. А.* Камчатская платиноидно-никеленосная зона – геология и рудоносность: автореф. дисс. канд. геол. – мин. наук. // М.: МГУ, 2004. 22 с.

3. *Округин В. М., Полетаев В. А.* Полигенность и полихронность медно-никелевого оруденения Камчатки // Материалы XXI Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Владимира Ивановича Смирнова «Фундаментальные проблемы геологии месторождений полезных ископаемых и металлогении». М.: МГУ, 2010. С. 49.

4. *Тарарин И. А. Бадрединов З. Г., Чубаров В. М.* Петрология и рудоносность метаморфических и магматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки. Владивосток: Дальнаука. 2015. 302 с.

5. *Степанов В. А., Гвоздев В. И., Трухин Ю. П., Кунгурова В. Е. и др.* Минералы благородных и редких металлов в рудах Шанучского медно-никелевого месторождения (Камчатка) // Записки Российского минералогического общества. 2010. Ч. СXXXIX. № 2. С. 43–58.

6. *Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е.* Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 75–81.

7. *Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Кувакин Г. В.* Сульфидное медно-никелевое рудопроявление Рассоха (Дукусский рудный район, Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – 2016. – С. 72–82.

8. *Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П., Новаков Р. М.* Состав руд сульфидного медно-никелевого проявления Аннабергитовая Щель (Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. – Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – С. 42–55.

9. *Степанов В. А., Кунгурова В. Е., Гвоздев В. И.* Находка ирарсита в медно-никелевых рудах месторождения Шануч (Камчатка)//Новые данные о минералах. М.: Изд-во Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана. – 2010. – Вып. 45. – С. 23-27.

10. *Кременецкий А. А., Трухин Ю. П.* Отчет «Проведение комплекса работ, связанных с геологическим изучением платиново-медно-никелевых руд в южной части Дукусского никеленосного рудного узла Квинум-Кувалорогской зоны». 2003. Т. I. 331 с.

11. *Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П.* Платиноносность сульфидных медно-никелевых месторождений Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2014. – Отдельный выпуск № 2 «Камчатка». – С. 334–342.

12. Минералы. Справочник. Т. I. М.: АН СССР. 1960. 617 с.

13. Справочник: Определитель рудных минералов в отраженном свете. М.: Недра. 1988. 504 с.

14. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Степанов В. А., Новаков Р. М. Минеральные разновидности различных типов медно-никелевых руд Камчатской никелевой провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2017. – Отдельный выпуск «Камчатка-5». **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник; kunwe@rambler.ru,

Трухин Юрий Петрович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; ytrukhin2@yandex.ru,

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; vitstepanov@yandex.ru,
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 66–82.

V. Ye. Kungurova, Yu.P. Trukhin, V. A. Stepanov

COMPARATIVE ANALYSIS OF MICROPROBE RESEARCHES OF THE MAIN SULFIDE MINERALS OF THE ORES OF THE KAMCHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE

Available data obtained in different years according to the results of microprobe analyses of the main sulfide minerals taken from various types of ores of the Kamchatka nickeliferous province (KNP) were summarized. Their comparative analysis was carried out. The compositional change of the considered ore minerals indicates the evolution of sulfide melting during its crystallization, meta-postmagmatic ores transformations especially widely manifested in the Annabergitovaya Schel' occurrence and Shanuch deposit.

Key words: Kamchatka nickeliferous province, copper-nickel mineralization, sulfide minerals, impurity-elements.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-66-82

AUTHORS

Kungurova V. Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher; kunwe@rambler.ru,

Trukhin Yu.P., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, ytrukhin2@yandex.ru,

Stepanov V. A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, vitstepanov@yandex.ru,

Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Vinogradova R. A., Okrugin V. M., Sveshnikova A. L., Soshkina L. T. *Violarit iz medno-nikelevogo mestorozhdenija Shanuch na Kamchatke* (Violarite of copper-Nickel deposits Sanok on the Kamchatka Peninsula). *Novye dannye o mineralah SSSR*. Moscow: Nauka. 1978. Vyp. 27. pp. 28–38.
2. Poletaev V. A. *Kamchatskaja platinoidno-nikelenosnaja zona – geologija i rudonosnost'* (Kamchatka platinoid-Nickel zone – Geology and ore potential): avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Moscow: MGU, 2004. 22 p.
3. Okrugin V. M., Poletaev V. A. *Poligennost' i polihronnost' medno-nikelevogo orudnenija Kamchatki* (Polygenic and polihronas copper-Nickel mineralization in Kamchatka). *Materialy HHI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferencii, posvjashennoi 100-letiyu so dnja rozhdenija akademika Vladimira Ivanovicha Smirnova «Fundamental'nye problemy geologii mestorozhdenii poleznyh iskopaemyh i metallogenii»*. Moscow: MGU, 2010. p. 49.
4. Tararin I. A. Badredinov Z. G., Chubarov V. M. *Petrologija i rudonosnost' metamorficheskikh i magmatischeskikh kompleksov Central'noi i Vostochnoi Kamchatki* (Petrology and ore potential of magmatic and metamorphic complexes in Central and Eastern Kamchatka). Vladivostok: Dal'nauka. 2015. 302 p.
5. Stepanov V. A., Gvozdev V. I., Truhin Yu.P., Kungurova V. E. i dr. *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshhestva*. 2010. CH. CXXXIX. no 2. pp. 43–58.
6. Truhin Yu.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D., Kungurova V. E. *Rudy i metally*. 2009. no 5. pp. 75–81.
7. Kungurova V. E., Truhin Yu.P., Kuvakin G. V. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'*. 2016. Special'nyi vypusk no 31, «Kamchatka-3». pp. 72–82.
8. Kungurova V. E., Stepanov V. A., Truhin Yu.P., Novakov R. M. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'*, 2016. Special'nyi vypusk no 31, «Kamchatka-3». pp. 42–55.
9. Stepanov V. A., Kungurova V. E., Gvozdev V. I. *Nahodka irarsita v medno-nikelevyh rudah mestorozhdenija SHanuch (Kamchatka)* (Finding of irarsite in copper-Nickel ore deposits chanoch (Kamchatka)). *Novye dannye o mineralah*. Moscow: Izd-vo Mineralogicheskogo muzeja im. A. E. Fersmana. 2010. Vyp. 45. pp. 23–27.
10. Kremeneckii A. A., Truhin Yu.P. *Otchet «Provedenie kompleksa rabot, svjazannyh s geologicheskim izucheniem platinovo-medno-nikelevyh rud v yuzhnoi chasti Dukukskogo nikelenosnogo rudnogo uzla Kvinum-Kuvalorogskoi zony»* (Report «execution of works related to geological research of platinum-copper-Nickel ores in the southern part Dywxhgu Nickel ore node Quenum-Kavalerovskiy zone»). 2003. T. I. 331 p.
11. Kungurova V. E., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'*. Otdel'nyi vypusk no 2 «Kamchatka». 2014. pp. 334–342.
12. *Mineraly. Spravochnik* (Minerals. Reference). T. I. Moscow: AN SSSR. 1960. 617 p.
13. *Spravochnik: Opredelitel' rudnyh mineralov v otrazhennom svete* (Reference: Handbook of ore minerals in reflected light). Moscow: Nedra. 1988. 504 p.
14. Kungurova V. E., Truhin Yu.P., Stepanov V. A., Novakov R. M. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'*. 2017. Otdel'nyi vipusk no 32 «Kamchatka-5».



НЕКОТОРЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Дана сравнительная геохимическая характеристика мафит-ультрамафитовых рудно-магматических образований дукукского комплекса Камчатской никеленосной провинции (КНП). Приведены кларки концентрации элементов в породах комплекса, рассмотрены тренды распределения редкоземельных элементов в рудоносных интрузиях Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны. Сходство геохимических трендов распределения петрогенных, рудных элементов и РЗЭ в породах свидетельствует об образовании их из единого родоначального расплава.

Ключевые слова: Камчатская никеленосная провинция, интрузивы рудоносной формации, мафит-ультрамафитовые породы, кларки концентраций.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-83-99

Интрузивы рудоносной формации, объединяемые в дукукский комплекс, концентрируются у северного и южного флангов Камчатского срединного массива (КСМ). В северной его части – это Шанучское рудное поле (с одноименным месторождением, проявлением Восточно-Геофизическое, Графитовое и др.), в южной – рудопроявления Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны (ККНЗ), связанные с крупным интрузивом Кувалорог (Снежное, Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Кувалорог, Рассоха, Правокихчинское и др.), с его ближними (Олень, Северное, Озерное, Обвальное, Медвежий Мыс) и дальними (Квинум I и II, Тундровое и др.) сателлитами, с дайкообразными телами (рудопроявление Аннабергитовая Щель) [1, 2, 3, 4].

Оруденения КНП связаны с производными водной высокомагнезиальной и богатой кремнеземом магмы бонинитового типа, дифференцировавшейся в абиссальной фации глубинности с образованием пород ряда: кортландит – амфиболовый пироксенит – меладiorит – амфиболовое габбро – норит – амфибол-биотитовый диорит – гранодиорит [5, 6, 7, 8].

Петрология никеленосных базитов и медно-никелевых руд КНП изучена многими исследователями [5, 9, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. В дан-

ной статье проведен сравнительный анализ материалов, полученных в ходе полевых работ 2000–2010 гг. по договору с ЗАО НПК «Геотехнология» по объектам КНП: на Шанучском рудном поле (месторождение Шануч, рудопроявление Восточно-Геофизическое) и проявлений, связанных с Кувалорогской интрузией (Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное, Оленье, Аннабергитовая Щель и некоторые сопоставления их с данными, полученными предыдущими исследователями.

Интрузивные породы, вмещающие оруденения КНП, охарактеризованы в табл. 1, а их химический состав и содержания основных полезных компонентов приведены на рис. 1. Анализы выполнены в ОНПАР ФГУП ИМГРЭ (аналитики Корниенко Е. М., Павлова Т. Н., Юрченкова М. П.) и в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН на рентгенофлуоресцентном спектрометре S-4 Pioneer (исполнители Карташева Е. В., Чеброва Н. И., Рагулина В. М.). Подробные геолого-петрологические исследования интрузивов КНП, их структурное положение, процессы дифференциации и контаминации никеленосных магнезиальных магм изложены Селянгиным О. Б. в ряде статей [6, 7, 8, 13].

В пределах КНП ультраосновные породы встречены только на рудопроявлении Восточно-Геофизическое и Аннабергитовая Щель, где представлены кортландитами (табл. 1). По сравнению с породами ультрамафит-мафит-диоритового ряда для них характерны пониженные содержания (в %): SiO_2 (36,58–43,1), Al_2O_3 (4,98–6,21), TiO_2 0,24–0,34), Na_2O (0,3), K_2O (0,2); повышенные (%): MgO (30,5–33,2), – Ni (0,17–0,25), Cu (0,01–0,07), Co (0,02) (рис. 1). Только в кортландитах отношение Cr/Ti превышает 1 (табл.2), что отличает их от всех интрузивных пород КНП, а Ni/Cu составляет 3,5–13,8.

Ультрамафитовые основные породы рудоносных интрузий КНП представлены пироксеновым горнблендитом, оливинсодержащим плагиоклаз-флогопит-амфиболовым ортопироксенитом, плагиоклаз-амфиболовым, флогопит-амфиболовым ортопироксенитом; апопироксенитовым и апоталькитовым плагиоклаз-флогопитовым амфиболитом, амфиболовым вебстеритом. Содержания основных пороодообразующих компонентов составляют (в %): SiO_2 – 47,5–52,1; Al_2O_3 – 5,14–9,7; MgO – 18,1–23,5; TiO_2 – 0,31–0,86; CaO – 3,61–6,96; Na_2O – 0,09–0,19; K_2O – 0,31–0,98; концентрации полезных компонентов (в %): Ni – 0,028–0,082; Cu – 0,018–0,050; Co – 0,005–0,013; отношение Ni/Cu колеблется от 1,1 до 3,4. В породах месторождения Шануч и проявления Аннабергитовая Щель содержания Al_2O_3 , SiO_2 на 2–3 % выше, по сравнению с другими, а отношение Cr/Ti вдвое ниже (0,4–0,5). В ультрамафитах интрузива Кувалорог и его сателлитов Na/K составляет 1,7–3,7, что больше, чем в аналогичных породах других объектов КНП. Максимальные

значения Ni/Co достигает в небольших по размерам сателлитах интрузии Кувалорог (Оленье, Северное – 13,7, Аннабергитовая Щель – 11,0), малых интрузиях месторождения Шануч (10,4); для них же характерны пониженное Cr/Ti отношение (рис. 1, табл. 2).

Основные интрузивные породы КНП (мафиты) – это габбро, биотит-амфиболовое габбро, плагиоклаз-амфиболовое габбро, биотит-амфиболовый мелано-габбро-норит, норит. Они содержат (в %): SiO₂ – 47,0-53,4; Al₂O₃ – 12,2-18,8; MgO – 5,8-13,3; TiO₂ – 0,3-1,8; CaO – 4,2-10,1; Na₂O – 1,1-2,9; K₂O – 0,31-0,98 0,3-1,7; концентрации полезных компонентов (в %): Ni – 0,03-0,04; Cu – 0,008-0,025; Co – 0,003-0,011. В мафитах интрузива Кувалорог содержание TiO₂ выше, по сравнению с другими интрузиями (табл. 2); показатель Na/K равен 8,6, что в 4–7 раз больше такового в аналогичных породах других объектов. Аномальными значения Ni/Co отношения встречены в породах Аннабергитовой Щели и интрузии Шануч (9,14–14,3 против 3,8-4,0 интрузии Кувалорог и ее сателлитов).

Средние породы (биотитовый диорит, биотит-амфиболовый меладиорит; биотит-амфиболовый диорит, меланократовые диориты, кварцевый диорит) содержат (в %): SiO₂ – 54,2-57,6; Al₂O₃ – 10,6-18,1; MgO – 3,5-7,3; TiO₂ – 0,9-1,7; CaO – 4,2-7,1; Na₂O – 2,2-2,9; K₂O – 1,2-1,9; концентрации полезных компонентов (в %): Ni – 0,01-0,03; Cu – 0,004-0,024; Co – 0,001-0,007. Диориты характеризуются устойчивым показателем Na/K (1,4-1,8); в интрузии Аннабергитовая Щель отношение Ni/Cu ниже (0,3), чем в остальных (2,4-2,7), а Ni/Co в Аннабергитовой Щели и Шануче максимальные (6,7 и 9,2 соответственно), что почти в 2 раза выше, чем в диоритах интрузива Кувалорог и его сателлитах.

Все вмещающие породы интрузива Кувалорог (проявления Рассоха, Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное) отличаются повышенными концентрациями TiO₂, CaO, Na₂O, V, Sr по сравнению с ультрамафит-мафитами, вмещающими другие оруденения КНП (рис. 1) и содержат несколько меньше MgO. В мафитах этого интрузива зафиксированы максимальные значения Na/K.

Геохимическая характеристика рудовмещающих интрузивных образований КНП приведена в табл. 2.

Для сателлитов интрузии Кувалорог, вмещающих проявления Северное, Оленье, отмечается в ультрамафитах повышенные содержания отношений Na/K (3,7), Ni/Co (13,7), Ni/Cu (3,4); в диоритах – Cr/Ti (0,8).

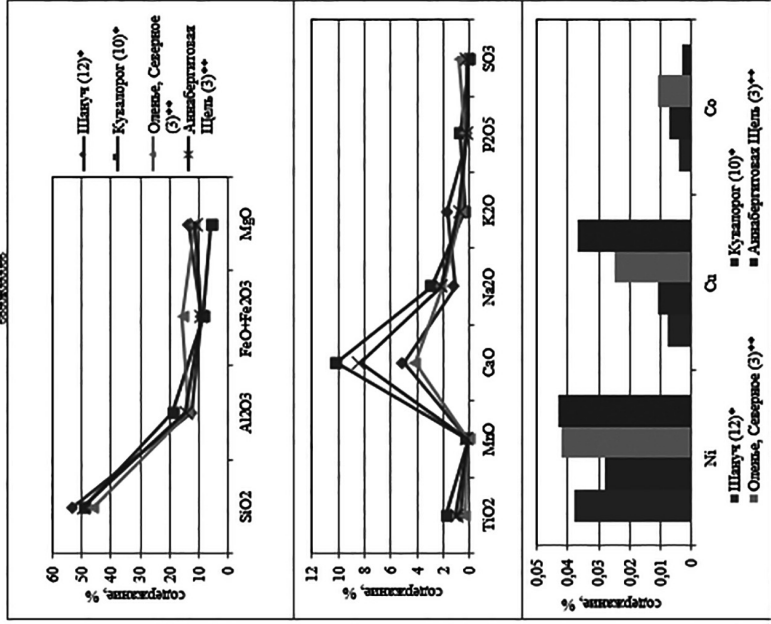
В небольшой по размерам интрузии Аннабергитовая Щель в кортландитах отношение Ni/Cu – 13,8 – самое высокое, встреченное в породах рассматриваемого ряда (от кортландитов до диоритов). В ультрамафитах и мафитах отмечены высокие показатели отношения

Интрузивные породы дукусского рудоносного комплекса

Тип горной породы (по петрографическому ко- дексу, 1995 г., С-Петербург) Ультраосновные	Наименование породы		Месторождение, проявление
	Кортландит		
Ультрамафиты основные	чередующиеся: амфиболовый пироксенит-пироксеновый горнблендит, горнблендит		Восточно-Геофизическое
	плаггиоклаз-амфиболовый, флогопит-амфиболовый ортопироксенит (15–26 % MgO); апотипроксенитовый и апоталькитовый плаггиоклаз-флогопитовый амфиболит		Шануч
Основные	амфиболовый, оливинсодержащий плаггиоклаз-флогопит-амфиболовый ортопироксенит, амфиболовый вебстерит		проявления, связанные с интрузивом Кувалорог (Нижнемедежье, Верхнемедежье, Снежное), с малыми телами (сателлиты интрузии Кувалорог: Оленье, Северное), дайкообразными (Аннабер-гитовая Щель)
	габбро, биотит-амфиболовое габбро (7–14 % MgO); плаггиоклаз-амфиболовое габбро, биотит-амфиболовый мелано-габбро-норит, норит; габбро, роговообманковый норит, габбро-норит, тальк-биотит-амфиболовая порода		Шануч
			проявления, связанные с интрузией Кувалорог (Нижнемедежье, Верхнемедежье, Снежное), с малыми (сателлиты интрузии Кувалорог: Оленье, Северное), дайкообразными телами (Аннабер-гитовая Щель)

Средние	биотитовый диорит, биотит-амфиболовый меладиорит; биотит-амфиболовый диорит, меланократовые диориты, кварцевый диорит	Шанучи; проявления, связанные с интрузией Кувалорог (Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное), с малыми (сателлиты интрузии Кувалорог: Оленье, Северное), дайкообразными телами (Аннабергитовая Щель)
Кислые	мусковит-биотитовые гранодиориты; биотит-амфиболовые платиограниты	Шанучи; проявления, связанные с интрузией Кувалорог (Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное), с малыми (сателлиты интрузии Кувалорог: Оленье, Северное), дайкообразными телами (Аннабергитовая Щель)
Примечание: Использованы материалы, полученные в результате предыдущих исследований.[5, 9], а также проведенных НИГГЦ ДВО РАН в 2000-2014гг. [4, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 15]		

МАФИКА



ДИОРИТЫ

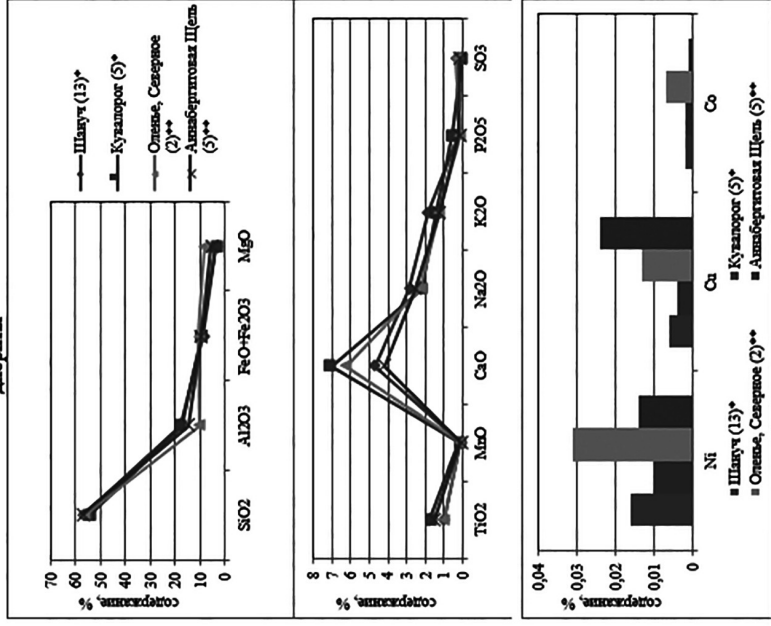


Рис. 1 (продолжение). Анализы выполнены: * – на рентгенофлуоресцентном спектрометре S-4 Pioneer Аналитического центра ИВис ДВО РАН (исполнители Карташева Е.В., Чеброва Н.И., Рагулина В.М.); ** – в ОНПАР ФГУП ИМГРЭ методами: ICP – MS; ПКСА (аналитики Корниенко Е.М., Павлова Т.Н., Юрченкова М.П.)

Геохимическая характеристика рудовмещающих интрузивных образований

Характеристики	Квинум-Кувалоргская никеленосная зона						Шанучское рудное поле								
	Интрузия Кувалорг (проявления Рассоха*, Нижнемедвежье*, Верхнемедвежье*, Снежное*)		Малые тела мафит-ультрамафитового состава (сателлиты Кувалоргской интрузии), слабо дифференцированные (Оленье**, Серверное**), по [4]		Дайкообразные тела ультрамафитов (Аннабергитовая Щель*, Коба**, Квинум II**)		Симло- (дайкообразные?) дифференцированные расслоенные ультрамафит – габро-диорит – диоритовые тела (Шануч*)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
петрохимическая характеристика	TiO ₂ %	Na/K	Fe/Fe+Mg	TiO ₂ %	Na/K	Fe/Fe+Mg	TiO ₂ %	Na/K	Fe/Fe+Mg	TiO ₂ %	Na/K	Fe/Fe+Mg	TiO ₂ %	Na/K	Fe/Fe+Mg
ультраосновные							0,2	1,7	0,3				0,2	1,4	0,3
ультрамафиты основные	0,9	1,7	0,4	0,3	3,7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,45	1,0	0,4	0,4	1,1	0,3
мафиты	1,8	8,6	0,6	0,3	3,2	0,6	0,7	2,3	0,5	0,72	0,6	0,5	-	-	-
диориты	1,7	1,4	0,8	1,0	1,6	0,6	0,7	1,8	0,7	0,94	1,4	0,7	-	-	-
рудные элементы (n*10 ⁻⁴ %)	Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co
ультраосновные							1687	122	198				2469	707	176
ультрамафиты основные	280	180	130	823	240	60	550	500	50	563	256	54	384	207	91

мафиты	281	110	70	420	250	110	430	370	30	377	83	40	-	-	-
диориты	100	40	20	310	130	70	67	240	10	156	57	17	-	-	-
отношения рудных элементов	Ni/Co	Ni/Cu	Cr/Ti	Ni/Co	Ni/Cu	Cr/Ti	Ni/Co	Ni/Cu	Cr/Ti	Ni/Co	Ni/Cu	Cr/Ti	Ni/Co	Ni/Cu	Cr/Ti
ультраос- новые							8,5	13,8	1,8				14,0	3,5	1,6
ультрама- фиты ос- новые	2,1	1,6	1,1	13,7	3,4	0,9	11,0	1,1	0,4	10,4	2,2	0,5	4,2	1,9	1,0
мафиты	4,0	2,5	0,6	3,8	1,7	0,4	14,3	1,2	0,1	9,4	4,5	0,2	-	-	-
диориты	5,0	2,5	0,3	4,4	2,4	0,1	6,7	0,3	0,1	9,2	2,7	0,1	-	-	-
элементы- примеси (n*10 ⁻⁴ %)	V	Sr		V	Sr		V	Sr		V	Sr		V	Sr	
ультраос- новые							40	75					20	220	
ультрама- фиты ос- новые	250	740		210	105		86	60		90	250		130	230	
мафиты	330	490		230	180		193	70		130	320				
диориты	410	510		250	255		178	372		70	470				

Примечание: В таблице приведены средние значения по каждому типу пород:

* – анализы выполнены на рентгенофлуоресцентном спектрометре S-4 Ріолеег Аналитического центра ИВиС ДВО РАН (исполнители Карташева Е. В., Чеброва Н. И., Рагулина);

** – анализы выполнены в ОНПАР ФГУП ИМГРЭ методами: ІСР – MS; ПКС(аналитики Корниенко Е. М., Павлова Т. Н., Юрченкова М. П.)

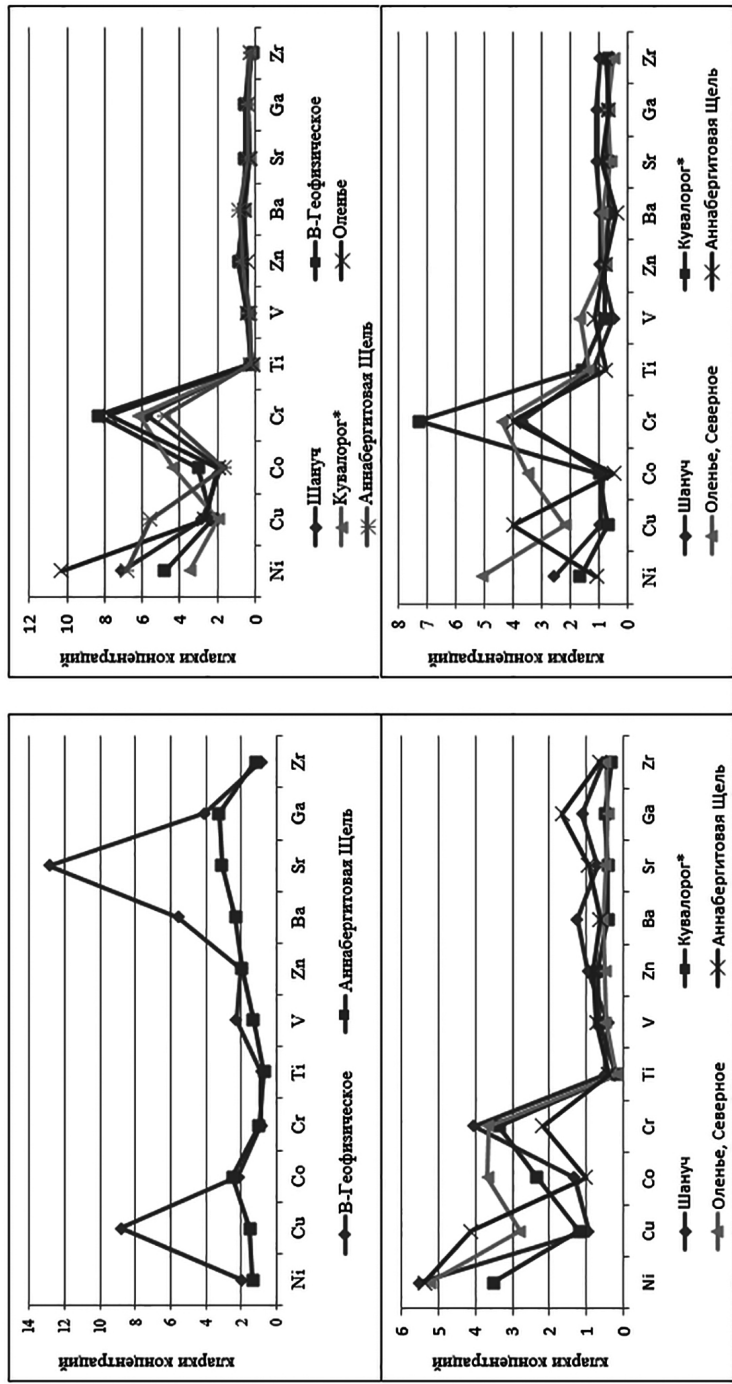


Рис. 2. Кларки концентраций химических элементов в ультраосновных породах (а), ультраосновных породах (б), мафитах (в), аиоритах (г) никеленосных объектов КНП. Примечание: * – под названием Кувалорог – проявления Рассоха, Нижнемедежье, Верхнемедежье, Снежное

Ni/Co (11–14,3), как и в малых интрузивных телах месторождения Шануч и в упомянутых выше ультрамафитовых породах, вмещающих проявления Северное, Оленье.

Отношение Ni/Cu среди всех мафит-ультрамафитовых пород в мафитах Шануча достигает максимальных значений (4,5).

В целом, во вмещающих оруденения КНП породах закономерно возрастает роль Ti и V по отношению к Cr в направлении от ультрамафитов к диоритам, т.е. в направлении дифференциации магмы.

Анализ геохимических данных по интрузивным телам КНП позволили выявить некоторые закономерности распределения химических элементов. Построены графики, которые демонстрируют кларки концентраций Ni, Cu, Co в породах рудовмещающих интрузий исследуемых никеленосных объектов КНП (рис. 2). При вычислении кларков концентраций использованы данные по содержаниям химических элементов в главных типах горных пород, полученные А. Б. Роновым и др. [16].

Породы ряда кортландит – амфиболовый пироксенит – меладiorит – амфиболовое габбро – норит, вмещающие оруденения КНП, характеризуются повышенными кларками концентраций никеля, меди, кобальта. Только в диоритах содержания кобальта околоскларковые, либо меньше средних содержания в подобных типах пород.

Наиболее высокие значения кларков концентрации никеля и меди отмечаются в флогопит-амфибол-плаггиоклазсодержащих ортопироксенитах месторождения Шануч (7,04; 2,84 соответственно), тальк-биотит-амфиболовых породах проявления Аннабергитовая Щель (6,87; 5,56), в плаггиоклаз-флогопит-амфиболовых ортопироксенитах проявления Оленье (10,3; 2,67; рис. 2).

В рудовмещающих породах, представленных роговообманковыми норитами, габброноритами, кларки концентраций никеля также значительны (3,51–5,38), несколько меньше они и в кортландитах (1,37–2,01; рис. 2).

В ультрамафит-мафитах и диоритах отмечаются повышенные концентрации хрома, при этом максимальные – в горнблендитах и амфиболовых пироксенитах проявления Восточно-Геофизическое (рис. 2).

Кларки концентрации титана во всех типах пород, кроме диоритов, < 1.

В кортландитах отмечаются концентрации цинка, стронция, ванадия, бария, галлия, превышающие кларковые в 2 и более раз (рис. 2).

Анализ полученных фактических данных по никеленосным объектам КНП свидетельствует о геохимической специализации исходного расплава на Ni, Cu, Co, которая отражена в повышенных содержаниях перечисленных металлов в петрохимических типах рудовме-

шающих комплексов и соответствующих значениях индикаторных отношений (табл. 2.) как по Квинум-Кувалорогской никеленосной зоне, так и по Шанучскому рудному полю.

Проведен сравнительный анализ [4] трендов распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в ультрамафитовых (рис. 3), мафитовых (рис. 4) и диоритовых породах (рис. 5) рудоносных интрузий исследованных рудопроявлений в Квинум-Кувалорогской никеленосной зоне, построены графики средних значений по типам пород (рис. 6).

Отмечается относительная близость ультрамафитовых и мафитовых фаций (рис. 3, 4, 6, 7) и некоторые различия между меладiorитами (рис. 5, 6, 7) из Кувалорогского материнского массива (Рассоха, Снежное), его ближних малых интрузий (Оленье) и дайковыми комплексами Аннабергитовой Щели, Кобы, Северное. Это хорошо видно на обобщенном графике (рис. 7), где также хорошо демонстрируется различие между группой мафит-ультрамафитов и группой диоритов по суммарному составу РЗЭ. Небольшое количество анализов позволяет сделать только предварительные выводы. Вероятно это связано с тем, что первые образованы в результате гравитационной дифференциации в интрузивных магматических камерах (материнские расслоенные интрузии с сингенетичным оруденением), вторые – продукты ликвации в промежуточных магматических камерах (дайкообразные тела ультрамафитов).

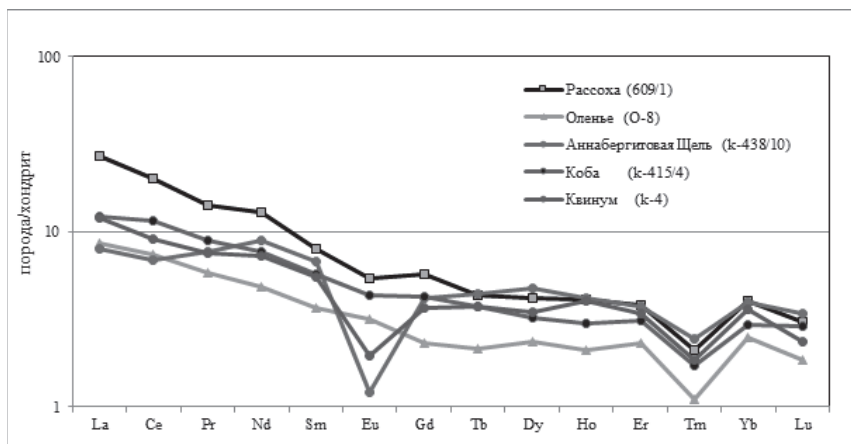


Рис. 3. Кривые распределения редкоземельных элементов, нормированные по хондриту [Taylor S. R., McLennan S. M., 1985] в ультрамафитах Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны (в скобках – номер проанализированного образца)

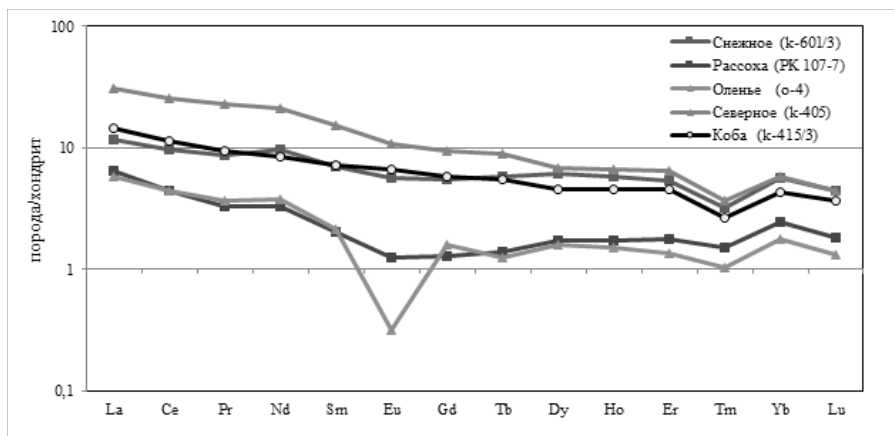


Рис. 4. Кривые распределения редкоземельных элементов, нормированные по хондриту [Taylor S. R., McLennan S. M., 1985] в мафитах Квиннум-Кувалорогской никеленоносной зоны

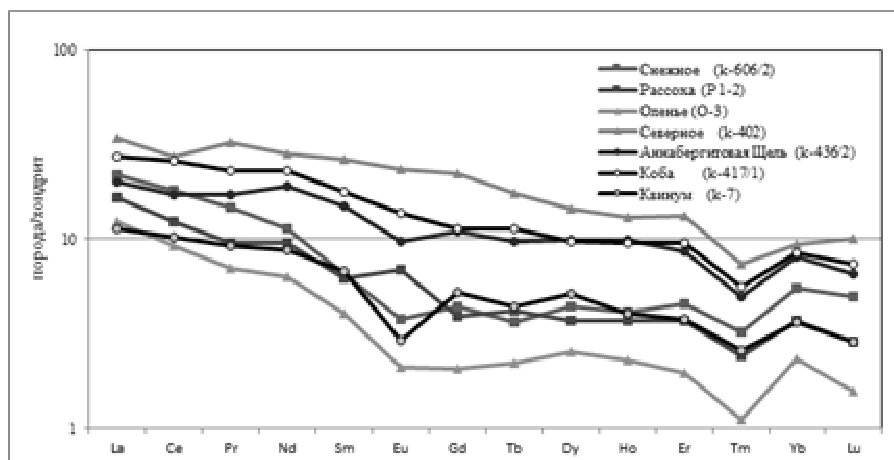


Рис. 5. Кривые распределения редкоземельных элементов, нормированные по хондриту [Taylor S. R., McLennan S. M., 1985] в диоритах Квиннум-Кувалорогской никеленоносной зоны

Количество РЗЭ увеличивается от ультрамафитов и мафитов к диоритам. Характерен отрицательный наклон кривых распределения РЗЭ, что обусловлено обогащением их лёгкими лантаноидами ($La/Yb_{\text{н}} 2,0-6,1$) относительно тяжёлых. В целом для пород характерна отрицательная аномалия по европию и тулию.

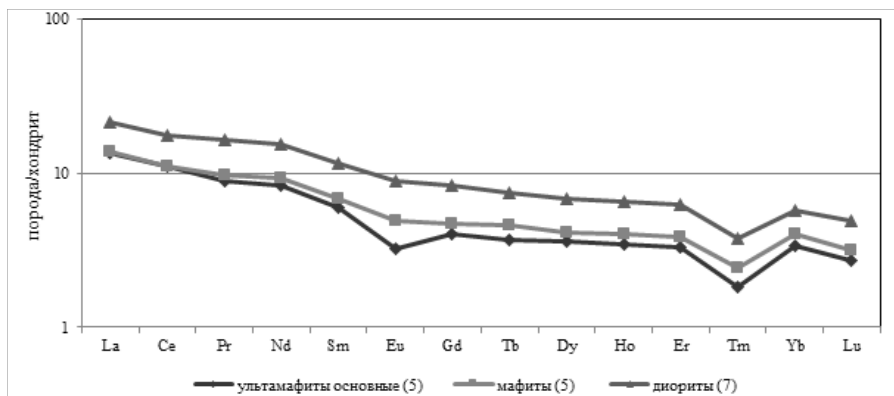


Рис. 6. Средние значения РЗЭ по интрузивным породам ультрамафит-мафит-диоритового состава Квинум-Кувалорогской никеленой зоны

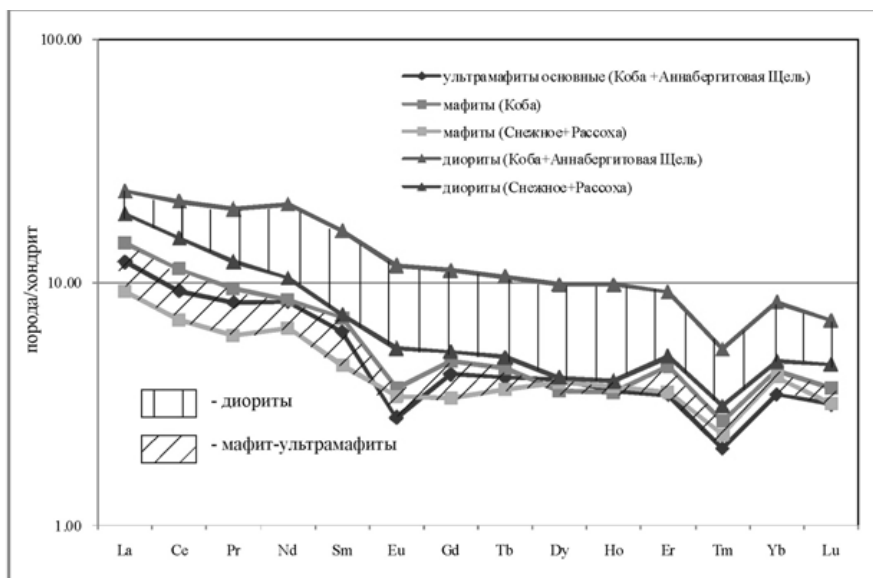


Рис. 7. Обобщенные кривые распределений РЗЭ в главных типах интрузивных пород Квинум-Кувалорогской никеленой зоны

Суммарное количество РЗЭ прямо пропорционально концентрации TiO_2 , P_2O_5 , Sc, V, и обратно пропорционально содержанию MgO .

Вариации фоновых содержаний никеля, кобальта и меди в различных по магнезиальности и основности безрудных породах мафит-ультрамафитовых плутонических формаций Камчатки характеризуют

процессы накопления элементов в результате образования магм и их последующей дифференциации.

Для никеленосных объектов КНП характерна геохимическая специализация исходного расплава на Ni, Cu, Co, отраженная в повышенных содержаниях этих металлов в петрохимических типах рудовмещающих комплексов.

Рудоносные породы представляют собой ряд родственных, пространственно сопряженных интрузий, образующих единую рудно-магматическую систему.

Сходство геохимических трендов распределения петрогенных, рудных элементов и РЗЭ в породах свидетельствует об образовании их из единого родоначального расплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев В. А. Прогнозная оценка никеленосности Срединной металлогенической зоны. Отчет по теме Центральной прогнозно-металлогенической партии за 1989-1990 г.г.. 1990. 161 с.

2. Зотов В. П. Аврамова Н. Н. Отчет о результатах детальных поисковых работ на участке Медвежьем Дукук-Кувалорогской рудной зоны, проведенных Кувалорогской партией в 1979-1982 г.г. 1982. 160 с.

3. Гумовский А. С. Отчет о результатах поисков медно-никелевых месторождений на участке Квинум за 1988-1990 г.г. 1990. В 4-х т.: 269+93+164+90 с.

4. Кременецкий А. А., Трухин Ю. П. и др. Отчет «Проведение комплекса работ, связанных с геологическим изучением платиново-медно-никелевых руд в южной части Дукукского никеленосного рудного узла Квинум-Кувалорогской зоны». Петропавловск-Камчатский. Фонды НИГТЦ ДВО РАН. 2003 г. Т. I. 331 с.

5. Щека С. А., Чубаров В. М. Никеленосные кортландиты Камчатки // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1987. № 2. С. 50–61.

6. Селянгин О. Б. Петрология никеленосных базитов Шанучского рудного поля, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 2. С. 33–55.

7. Селянгин О. Б. К сравнительной петрологии интрузивов северной и южной зон Камчатской никеленосной провинции. Часть первая // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 23. № 1. С. 168–185).

8. Селянгин О. Б. Кортландит – амфиболовый пироксенит – горнблендитовая серия расслоенного никеленосного интрузива Восточно-Геофизический, Шанучское рудное поле, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 9–29.

9. Полетаев В. А. Камчатская платиноидно-никеленосная зона – геология и рудоносность: автореф. дисс. канд. геол. — мин. наук. // Полетаев Владимир Александрович. М.: МГУ, 2004. 22 с.

10. Трухин Ю. П., Сидоров М. Д., Степанов В. А., Кунгурова В. Е. Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива // Геология и разведка. 2009. № 6. С. 43–49.

11. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 75–81.

12. Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П. Медно-никелевое рудопроявление Аннабергитовая Щель Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». – 2014. – Отдельный выпуск 2. – С. 324–333.

13. Селянгин О. Б. К сравнительной петрологии интрузивов северной и южной зон Камчатской никеленосной провинции. Часть вторая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. – № 2. – Вып. 24. – С. 95–115.

14. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Кувакин Г. В. Сульфидное медно-никелевое рудопроявление Рассоха (Дукукский рудный район, Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга», 2016. Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – С. 72–82.

15. Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П., Новаков Р. М. Состав руд сульфидного медно-никелевого проявления Аннабергитовая Щель (Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. – Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – С. 42–55.

16. Ронов А. Б., Ярошевский А. А., Мигдисов А. А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. – М.: Наука. 1990. – 180 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник; kunwe@rambler.ru,

Трухин Юрий Петрович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; ytrukhin2@yandex.ru,

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; vitstepanov@yandex.ru,
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 83–99.

V. Ye. Kungurova, Yu. P. Trukhin, V. A. Stepanov

GEOCHEMICAL FEATURES OF ORE-HOSTING ORES OF THE KAMCHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE

Comparative geochemical characteristics of mafite-ultramafite ore-magmatic formations of the Dukuk complex of the Kamchatka nickeliferous province (KNP) was given. Concentrations Clarks of the elements in the complex rocks were shown, the distribution trends of the rare earth elements in ore-bearing intrusions of the Kwinum-Kavalorog nickeliferous zone were considered. The similarity of geochemical trends of the distribution of petrogenic, ore elements and REE in the rocks indicates their formation from a single parent melting.

Key words: Kamchatka nickeliferous province, intrusive of ore-bearing formation, mafite-ultramafite ores, concentrations Clarks.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-83-99

AUTHORS

Kungurova V. Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher; kunwe@rambler.ru,

Trukhin Yu. P., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, ytrukhin2@yandex.ru,

Stepanov V. A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, vitstepanov@yandex.ru,

Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Poletaev V. A. *Prognoznaja ocenka nikelenosnosti Sredinnoi metallogenicheskoi zony. Otchet po teme Central'noi prognozno-metallogenicheskoi partii za 1989-1990 gg* (Predictive assessment of nicolenicolic Median metallogenic zone. The report on the theme of the Central metallogenic forecast of the party for 1989-1990). 1990. 161 p.

2. Zotov V. P. Avramova N. N. *Otchet o rezul'tatah detal'nyh poiskovykh rabot na uchastke Medvezh'em Dukuk-Kuvalorogskoi rudnoi zony, provedennykh Kuvalorogskoi partiei v 1979-1982 gg.* (Report on the results of detailed prospecting works at the site of the Bear, Dokok-Kavalerovskiy ore zones, held Kavalerovskiy party in 1979-1982). 1982. 160 p.

3. Gumovskii A. S. *Otchet o rezul'tatah poiskov medno-nikelevykh mestorozhdenii na uchastke Kvinum za 1988-1990 gg* (Report on the results of the search for copper-nikelevykh deposits in the area Quinum for the years 1988-1990). 1990. V 4-h t.: 269+93+164+90 s.

4. Kremeneckii A. A., Truhin Yu.P. i dr. *Otchet «Provedenie kompleksa rabot, svjazannykh s geologicheskim izucheniem platinovo-medno-nikelevykh rud v yuzhnoi chasti Dukuk'skogo nikelenosnogo rudnogo uzla Kvinum-Kuvalorogskoi zony»* (Report The execution of works related to geological research of platinum-copper-Nickel ores in the southern part Dywxhgu Nickel ore node Quenum-Kavalerovskiy zone). Petropavlovsk-Kamchatskii. Fondy NIGTC DVO RAN. 2003 g. T. I. 331 p.

5. Sh'eka S. A., Chubarov V. M. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1987. no 2. pp. 50–61.

6. Seljangan O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle.* 2003. no 2. pp. 33–55.

7. Seljangan O. B. *Vestnik Kamchatskoi regional'noi organizacii «Uchebno-nauchnyi centr».* Serija: *Nauki o Zemle.* 2014. T. 23. no 1. pp. 168–185.

8. Seljangan O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle.* 2006. no 2. Vyp. 8. pp. 9–29.

9. Poletaev V. A. *Kamchatskaja platinoidno-nikelenosnaja zona – geologija i rudonosnost'* (Kamchatka platinoid-Nickel zone – Geology and ore potential); avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Poletaev Vladimir Aleksandrovich. Moscow: MGU, 2004. 22 p.

10. Truhin Yu.P., Sidorov M. D., Stepanov V. A., Kungurova V. E. *Geologija i razvedka.* 2009. no 6. pp. 43–49.

11. Truhin Yu.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D., Kungurova V. E. *Rudy i metally.* 2009. no 5. pp. 75–81.

12. Kungurova V. E., Stepanov V. A., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'.* 2014. Otdel'nyi vypusk no 2. pp. 324–333.

13. Seljangan O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle.* 2014. no 2. Vyp. 24. pp. 95–115.

14. Kungurova V. E., Truhin Yu.P., Kuvakin G. V. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'.* 2016. Special'nyi vypusk no 31, «Kamchatka-3». pp. 72–82.

15. Kungurova V. E., Stepanov V. A., Truhin Yu.P., Novakov R. M. *Gornyi informacionno-analiticheskii byulleten'.* 2016. Special'nyi vypusk no 31, «Kamchatka-3». 2016. pp. 42–55.

16. Ronov A. B., Jaroshevskii A. A., Migdisov A. A. *Himicheskoe stroenie zemnoi kory i geohimicheskii balans glavnykh yelementov* (Chemical structure of the earth's crust and geochemical balance of major elements). Moscow: Nauka. 1990. 180 p.



К СРАВНИТЕЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ РУД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Приведена характеристика сульфидного медно-никелевого оруденения Камчатской никеленосной провинции (КНП). По сравнению с другими месторождениями России и мира, для медно-никелевого оруденения Камчатки характерен относительно молодой возраст рудоносных интрузий, умеренные содержания окиси магния, высокие содержания никеля и низкие – элементов платиновой группы.

Ключевые слова: Камчатская никеленосная провинция, интрузивы рудоносной формации, мафит-ультрамафитовые породы, кларки концентраций.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-100-115

В пределах Камчатского срединного массива (КСМ) выделяется Камчатская никеленосная провинция (КНП), в северной части которой располагается Шанучское рудное поле, включающее месторождение Шануч, рудопоявление Восточно-Геофизическое, Графитовое, а в южной – Квинум-Кувалорогская никеленосная зона (ККНЗ) с проявлениями: Рассоха, Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное, Олень, Северное, Аннабергитовая Щель, Коба, Квинум и др. [1, 2].

Наблюдается различный масштаб и продуктивность оруденений в сходных по составу, генетически родственных породах единой никеленосной формации. В одном случае это месторождение Шануч с высокими содержаниями полезных компонентов (никель, медь, кобальт, платиноиды) в рудах, в других – небольшие по размерам рудопоявления и небогатые руды. Рассматривая в единстве процесс становления никеленосных интрузий и неразрывно связанного с ним рудообразования, отметим, что это зависит (по данным опытно-экспериментальных работ [25, 31]), от оптимального сочетания множества факторов, включающих: «наличие исходных магм с содержанием не менее 70–100 г/т Ni; реализацию сульфидно-силикатной несмесимости; возможность миграции контаминированных магм в верхнекоровые уровни без существенной потери сульфидной фазы; реализацию определенного механизма отложения сульфидов и платиноидов в проводнике или магматической камере».

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 100–115.

© В. Е. Кунгурова, В. А. Степанов, Ю. П. Трухин, 2017.

В пределах КНП рудные объекты приурочены:

– к материнским расслоенным интрузиям с сингенетичным медно-никелевым оруденением. В южной части КСМ это массив Кувалорог размером более 20 км², мощностью до 1100 м (по геофизическим данным), сложенный породами кортландит-пироксенит-норит-диоритового ряда. Размеры рудных тел и зон минерализации составляют примерно 400х200 м; руды массивные и вкрапленные (проявления Рассоха, Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное) [3, 4, 5, 6];

– к сателлитам материнской интрузии, площадь которых достигает 0,13 км². Это малые тела габброидов, слабо дифференцированные (четких данных о расслоении нет) или отдельные мелкие интрузии мафит-ультрамафитового состава с сингенетической вкрапленностью, с которыми связаны рудопроявления Оленье, Северное. Вмещающие породы по своему составу неоднородны, представлены кортландит-пироксенит-диорит-гранодиоритами. Отмечаются хлорит-тремолит-кальцит-актинолитовые, хлорит-тремолит-тальковые замещения по ультрамафитам [5, 6, 7]. Размеры рудных зон минерализации составляют 100х200 м, количество сульфидов – 1–15 %. Сульфиды окислены, с характерными структурами выщелачивания;

– к дайкообразным телам ультрамафитов (верхние камеры рудно-магматических систем?), подвергнутыми последующим метаморфическим преобразованиям). С ними связано рудопроявление Аннабергитовая Щель. Площадь интрузивного тела очень незначительна, мощность 20–30 м, падение крутое – <45–80°. Состав пород сложный: горнблендиты-габбронориты-меланократовые диориты-гранодиориты [5, 6, 8, 9, 10, 11, 12];

– к пологозалегающим силлообразным габбро-кортландитовым рудоносным образованиям Квинумского рудного поля (проявления Квинум I, II). Рудные тела часто зональны, центральная часть сложена богатыми прожилково-гнездовыми рудами, а краевые – вкрапленными [13, 14];

– к силлообразным дифференцированным расслоенным ультрамафит-габбродиорит-диоритовым телам с богатым первично-сингенетическим оруденением. Это одиночные тела, либо образующие многоэтажную [10, 15, 16] и полифазную систему внедрений, примером которых является рудное поле Шануч с одноименным месторождением Шануч, где выявлены рудные тела 1, 2, 3, 4, 4-1. Руды в них богатые (табл. 1, 2), массивные, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные, вкрапленные [16, 17];

– к расслоенным малым интрузивным образованиям и их наиболее мафическим разновидностям – кортландитам с сингенетичным оруденением – Восточно-Геофизическое проявление [8, 18].

Приуроченность сульфидного оруденения к различным по размерам никеленосным образованиям, которые были внедрены в различные по составу вмещающие породы, явилась одной из причин разнообразия пород (при сходных глубинах) и оказало влияние на особенности формирования руд, их структурно-минералогическое разнообразие.

В малых интрузиях, с которыми связаны рудные тела месторождения, существенное влияние на процессы формирования рудоносных интрузий и руд оказала контаминация никеленосных магматитов высококремнистым веществом коры, что, видимо, способствовало насыщению магм сульфидами и обогащению ее полезными компонентами [25].

Месторождение Шануч и рудопоявления, обнаруженные в пределах КНП, описаны в ряде статей [1, 11, 16]. Интрузивные никеленосные породы представляют собой серии водной высокомагнезиальной, богатой кремнеземом магмы марианит-бонинитового типа («мокрые» аналоги формации гарцбургитов – ортопироксенитов – габбро-норитов) [8, 10, 18]. Это породы, богатые слюдой и амфиболами: кортландиты, ортопироксениты, вебстериты, мелано- и лейконориты, габбронориты. В неизменном виде они сохранились в расслоенном интрузиве Кувалорог и небольшом интрузиве Восточно-Геофизический. В малых интрузиях Шанучского рудного поля (месторождение Шануч) и в небольших телах южной зоны провинции (проявление Аннабергитовая Щель) породы подверглись поздне-(мета-)магматическим преобразованиям в биотит-амфиболовые меладiorиты – лейкогаббро.

Минералогический состав пород [8, 10] характеризуется широким развитием ортопироксена, амфибола ряда паргасит-гастингсит, тремолит-актинолитовой роговой обманки, куммингтонита, слюды ряда флогопит-биотит, присутствуют хромшпинелиды, ассоциирующие как с силикатами, так и с сульфидами, отсутствует первичный магнетит. Ни в одном из изученных интрузивов весь диапазон составов пород никеленосной формации, охватывающий разности от ультраосновных-основных кумулатов до средних–кислых эвмагматитов, не проявлен полностью [8, 10]. Таким образом, в пределах южной и северной ветвей КНП встречены различные фрагменты единой рудно-магматической колонны.

Разновидности различных типов руд КНП, их минеральный состав, микросондовый анализ главных сульфидных минералов, типы рудовмещающих пород освещены в статьях [17, 19, 20]. Руды массивные, сетчатые, брекчиевидные (пятнистые), прожилково-вкрап-

ленные и вкрапленные. Они локализованы как в приконтактных, так и в других частях сложно дифференцированных рудоносных интрузий. Отмечается активное участие поздне-(мета-)магматических процессов в перераспределении рудного вещества.

В целом, руды объектов КНП характеризуются специфическим минеральным составом, отличающимся от других сульфидных медно-никелевых месторождений как по соотношению главных минералов, так и характеру минеральных парагенезисов.

Ведущая количественная роль принадлежит пирротину (30–90 % объема рудной массы), отмечается высокое содержание пентландита (до 55 %), незначительно распространен халькопирит, (до 15 %); в брекчиевидных и прожилково-вкрапленных рудах месторождения Шануч встречены в значительном количестве виоларит, пирит (до 30 %).

Для пирротинов характерны повышенные, по сравнению с теоретическим, содержания серы (до 42 %) и никеля (до 2–3 %), пониженные – железа.

Основным носителем никеля и кобальта является пентландит; меньшая часть приходится на виоларит и пирротин [19]. Незначительная часть кобальта концентрируется в сульфоарсенидах, пирите, халькопирите. Практически вся медь присутствует в халькопирите. Халькопирит обогащен кобальтом – $0,12 \div 0,52$ %.

В рудах КНП основными элементами платиновой группы являются палладий и платина, при этом преобладает первый (табл. 2, 3). В основном платиноиды присутствуют в виде сульфоарсенидов и соединений с висмутом и теллуrom. Они крайне неравномерно распределены по руде и их размеры редко превышают 0.01 мм. Более богаты палладием массивные и брекчиевидные халькопирит-виоларит-пентландит-пирротинные руды (среднее по месторождению Шануч – 0,4 г/т); пирротинные чаще обогащены платиной (0,13 г/т).

Сводная геохимическая характеристика руд Шанучского рудного поля и ККНЗ приведена в табл. 1, 2.

Рудные тела северной части провинции – месторождения Шануч – характеризуются самыми высокими содержаниями никеля (7,58 % в массивных рудах), меди (1,1 %), кобальта (0,19 %), палладия (0,53 г/т) и платины (0,16 г/т), при этом платино-палладиевое отношение всегда меньше единицы (табл. 2). Руды проявления Аннабергитовая Щель (связанные с сателлитом, расположенным вблизи интрузии Кувалорог) характеризуются более высоким содержанием меди (1.95 %), по сравнению с другими проявлениями ККНЗ, а отношение таких второстепенных элементов, как Cr/Ti – наименьшее (0,4–1,2). Ввиду высокой корреляции с медью, в рудах рудопроявления Анна-

бергитовая Щель повышены, относительно других объектов, содержания палладия (1,12 г/т) и серебра (6,1г/т), ниже платины и золота. По составу интрузивных пород и руд проявление Аннабергитовая Щель наиболее сопоставимо (из всех объектов КНП) с таковыми месторождения Шануч.

Вкрапленные, прожилково-вкрапленные руды южной группы проявлений КНП, связанных с интрузией Кувалорог – Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное, Оленье, Северное – имеют более низкие концентрации никеля (менее 1%), а сумма платиноидов составляет первые сотые доли г/т (табл. 1). Исключение составляет массивная руда, встреченная в ортопироксенитах на проявлении Рассоха (юго-западный фланг интрузии), где содержания никеля от 1,62 до 3,97%. От всех других объектов КНП эти руды отличаются повышенным содержанием платины относительно палладия ($Pt/Pd = 1,5-2,5$).

Особенностью геохимического состава руд КНП является их повышенная никеленосность; отношение $Ni/(Ni+Cu)$ находится в пределах 0,5–0,9. По содержанию главных рудных элементов (никеля, меди, кобальта – табл. 1, 2, 3) руды КНП принадлежат к маломедистым высоконикелистым, с повышенными концентрациями кобальта, с узким диапазоном вариаций $\delta^{34}S$ (от –0,1 до +2,7) и наличием попутных полезных компонентов: палладия, платины; спорадически встречающегося золота, серебра.

Более изученное на глубину и разрабатываемое в настоящее время силами ЗАО НПК «Геотехнология» месторождение Шануч имеет свои особенности и не укладывается в рамки классификации, которая существовала до открытия этого месторождения. Приведенная в тексте табл. 3 позволяет сравнить основные характеристики сульфидных медно-никелевых объектов КНП с некоторыми медно-никелевыми месторождениями России и мира и провести некоторую аналогию.

Формирование месторождений и рудопроявлений шанучского типа определялось спецификой геотектонической обстановки окраины Евразийского континента [22, 23, 24]. Додин Д. А. и др. [21, 11] выделяют для условий Центральной Камчатки самостоятельный шанучский тип, для которого характерны мелкие и средние месторождения никеля с содержаниями платиновых металлов от десятых долей до первых единиц г/т.

Мафит-ультрамафитовые никеленосные образования дукукского комплекса месторождения Шануч (наиболее изученного в пределах КНП) выбиваются и из классификации, разработанной Лихачевым А. П. [31], которая учитывает такие характеристики, как количество окиси магния в интрузивных породах и соотношение рудных элементов –

Таблица 1
Геохимическая характеристика рудных тел Квинум-Кувалоргской никеленосной зоны (средние значения по типам руд)

Характеристики	Расслоенные интрузии массива Ку-валорг (проявления Рассоха, Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Снежное)						Малые тела мафит-ультрамафитового состава (сателлиты Кувалоргской интрузии), слабо дифференцированные (Оленье*, Северное*)						Дайкообразные тела ультрамафитов (Аннабергитовая Щель, Коба*, Квинум II*)					
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
Рудные тела																		
рудные элементы (n*10 ⁻⁴ %) и их отношения	Ni	Cu	Co	Ni/Co	Ni/Cu	Ni	Cu	Co	Ni/Co	Ni/Cu	Ni	Cu	Co	Ni/Co	Ni/Cu			
массивные руды	34700	12300	1400	24,8	2,8	-	-	-	-	-	48200	19000	1300	37,1	2,5			
брекчиевидные, пятнистые, сетчатые	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11900	7100	900	13,2	1,7			
прожилково-вкрапленные	-	-	-	-	-	1930	1007	60	32,1	1,9	-	-	-	-	-			
вкрапленные	1500	365	120	12,5	4,1	1000	400	120	8,3	2,5	3200	1300	100	32	2,5			
второстепенные элементы (n*10 ⁻⁴ %)	Cr	Ti	As	V	Cr/Ti	Cr	Ti	As	V	Cr/Ti	Cr	Ti	As	V	Cr/Ti			
массивные руды	1380	610	190	84	2,3	-	-	-	-	-	1667	1335	22	44	1,2			
брекчиевидные, пятнистые, сетчатые	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	690	1700	-	57	0,4			
прожилково-вкрапленные	-	-	-	-	-	800	2000	-	200	0,4	-	-	-	-	-			
вкрапленные	930	545	-	350	1,7	2000	500	-	150	4,0	785	1210	-	52	0,6			

Примечание: Атомно-абсорбционный анализ на Ni, Cu, Co проведен в лаборатории НИГЦ ДВО РАН на двухлучевом атомно-абсорбционном пламенно-эмиссионном спектрофотометре АА-6300; химико-спектральный на платиноиды – в лаборатории ОАО «Камчатгеология»; на Cr, Ti, As – на рентгенофлуоресцентном спектрометре S-4 Рюлея Аналитического центра ИВЭС ДВО РАН (исполнители Карташева Е. В., Чеброва Н. И., Рагулина); * – использованы данные, полученные НИГЦ ДВО РАН в 2002–2003 гг.: анализы выполнены в ОНПАР ФГУП ИМГРЗ методами: ICP – MS; ПКСА (аналитики Корниенко Е. М., Павлова Т. Н., Юрченкова М. П.)

Геохимическая характеристика рудных тел Шанучского рудного поля (средние значения по типам руд)

Характеристики	Сильно- (дайкообразные?) дифференцированные рاسب- енные ультрамафит – габбро-диорит – диоритовые тела (Шануч)										Расслоенные малые интрузивные тела (Восточно-Геофизическое)						
	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	16	17			
рудаые элементы (n*10 ⁴ %) и их отношения	Ni,	Cu	Co	Ni/Co	Ni/Cu	Pt, г/т	Pd, г/т	Ni	Cu	Co	Ni/Co	Ni/Cu	Pt, г/т	Pd, г/т			
массивные руды	75800	11000	1900	39,9	6,9	0,16	0,53	36800	11300	1100	33,4	3,2	0,16	0,30			
брекчиевидные, пятнистые, сетча- тые	53100	8800	1200	44,2	6,0	0,16	0,46	31800	8600	800	39,8	3,7	0,14	0,29			
прожилково- вкрапленные	38200	6000	1000	38,2	6,4	0,08	0,21	19800	5500	700	28,3	3,6	0,16	0,25			
вкрапленные	3300	1200	100	33,0	2,8	0,02	0,03	15400	3600	500	30,8	4,3	0,13	0,22			
второстепенные элементы (n*10 ⁴ %)	Cr	Ti	As	V	Cr/П			Cr	Ti	As	V	Cr/П					
массивные руды	1230	1140	4	71	1,1			1514	650	46	17	2,3					
брекчиевидные, пятнистые, сетча- тые	1346	1012	3	56	1,3			2540	700	19	15	3,6					
прожилково- вкрапленные	1220	1290	-	79	1,0			1784	1347	-	50	1,3					
вкрапленные	920	1050	-	103	0,9			2010	2294	18	115	0,9					

Примечание: Атомно-абсорбционный анализ на Ni, Cu, Co проведен в лаборатории НИИТЦ АВО РАН на двухлучевом атомно-абсорбционном пламенно-эмиссионном спектрофотометре АА-6300; химико-спектральный на платиноады – в лаборатории ОАО «Камчатгеология»; на Cr, Ti, As – на рентгенофлуоресцентном спектрометре S-4 Pioneer Аналитического центра ИВиС АВО РАН (исполнители Карташева Е. В., Чебро-ва Н. И., Рагулина).

Таблица 3

Сравнительная характеристика некоторых показателей исследуемых медно-никелевых объектов КНП с другими медно-никелевыми месторождениями России и мира

Месторождение, рудопроявление (тип руда)	MgO, %	Ni, %	Ni/Cu	Ni/Co	Pt/Pd	Оруденение	Состав пород рудовмещающих интрузивов	Возраст, млн лет
	2	3	4	5	6			
Камчатская никеленосная провинция								
Шанучское рудное поле								
Шануч (массивные, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные)	5-28	3,82-7,58	6-6,9	38-44	0,3-0,4	медно-никелевое	апопироксенитовые биотитовые амфиболиты, биотит-амфиболовые меладiorиты	49,2
Восточно-Геофизическое (массивные, сетчатые, прожилково-вкрапленные)	12-33	1,54-3,68	3,2-4,3	28-40	0,5-0,6	медно-никелевое	корландиты – ортопироксениты – горнблендиты	53,3
Кувалорогское рудное поле								
Рассоха (массивные, прожилково-вкрапленные)	5-17	2,91-3,47	2,8-4,8	9-25	1,5	медно-никелевое	ортопироксениты – габронориты – нориты – диориты	-
Аннабергитовая Щель (массивные, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные)	7-16	1,0-4,82	1,3-2,5	13-37	0,1-0,3	медно-никелевое	горнблендиты – габронориты – нориты – механократовые диориты	-
Группа проявлений массива Кувалорог: Снежное, Нижнемедвежье, Верхнемедвежье (вкрапленные, прожилково-вкрапленные)	4-27	0,1-0,3	3,0-5,3	14-68	0,3-0,8	медно-никелевое	корландиты – ортопироксениты – горнблендиты – габронориты – амфиболитизированные нориты – диориты	55,2
Олень (вкрапленные)	5-13	0,05-0,15	2,5-3,0	7-8	0,7-0,8	медно-никелевое	ортопироксениты – горнблендиты – габронориты – амфиболитизированные нориты – диориты	-

Месторождение, рудопроявление (тип руда)	MgO, %	Ni, %	Ni/Cu	Ni/Co	Pt/Pd	Оруденение	Состав пород рудоовмещающих интрузивов	Возраст, млн лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Северное (прожилково-вкрапленное, вкрапленное)	7-9	0,05-0,6	3,4-3,6	33-35	1,0-1,1	медно-никелевое	горнблендиты-габбронориты-биотит-роговообманковые меланодриты	-
<i>Квинумское рудное поле</i>								
Тундровое (прожилково-вкрапленные, вкрапленные)	7-22	0,68	3,0	68	0,6	медно-никелевое	амфиболизированные перидотиты-горнблендиты-габбронориты	-
Хихку (массивные, прожилково-вкрапленные)	7-25	1,99	1,1	26	0,8	медно-никелевое	ортопироксениты-габбронориты	-
Квинум I* (прожилково-вкрапленные, вкрапленные)	6-20	0,78	2,6-4,6	35-41	0,5-0,8	медно-никелевое	амфиболизированные перидотиты-габбро-габбронориты	-
Квинум II* (массивные, прожилково-вкрапленные, вкрапленные)	6-18	3,85	2,1-3,3	25-26	0,2-0,6	медно-никелевое	амфиболизированные перидотиты	-
Характеристика некоторых медно-никелевых месторождений по Налдрету, [25]								
Кабанга-Муссонгати**	нет данных	1,66	7,2	12	нет данных	сульфидное Cu-Ni малосульфидное ЭПГ	перидотит-оливиновое габбро-анортосит-габбронорит	1370-1200
Джинчуан	25,7-42,5	1,06	1,76	56	1,0	сульфидное Cu-Ni	дуниты-оливиновые пироксениты-плагиоклазовые лерцолиты-лерцолиты	825-832
Камбада	8,2-41,7	2,90	13,5	70	0,7	сульфидное Cu-Ni	ультрамафитовые коматитогидротермальные лавы-базальты-амфиболиты	2730

Войсис Бей (массивные, леопардовые, магматических брекчий, вкрапленные)	5-25	1,59	0,9-3,7	12-23	0,92-3,42	сульфидное Cu-Ni	троктолит-габбро-троктолит-оливиновое габбро-габбро	1333
Дулут	5-8	0,2	0,33	10	0,3	сульфидное CuNi; малосульфидное ЭПГ	троктолит-габбронорит-норит-анортозит	1120

Таблица 4

Некоторые главные типы платиносодержащих сульфидно-никелевых рудно-магматических систем и связанных с ними м-ний по Чернышеву А. М., Чернышевой М. Н. [28]

Петрохимический тип сульфидно-никелевых рудно-магматических систем	MgO, %	Ni, %	Ni/Cu	Pt/Pd	$\delta^{34}S\%$	Типы рудоносных магматических формаций	Рудные районы, месторождения
Садберийский гибридный низкомагнезиальный, медно-никелевый	2-16	1,20 [21]	1-3	0,6-1	0,5-3	норит-диоритовых плутонов (садберийский тип)	Садбери
Норильско-талнахский тип умеренно-магнезиальный никелево-медный	1-30	0,48-3,20 [21]	0,5-1	0,1-0,4	7-9	дифференцированных пикрит-габбро-долеритовых тел (норильский тип)	Норильск-Талнах, Инсизва, Масккс
Апалачский, роновский повышенно-магнезиальный медно-никелевый	2-40	0,6-1 [30]	1-4	0,4-1	-	Аунит-тарцбургитовая; Аунит-пироксенит-габбровая; перидотит-пироксенит-норитовая, норит-корплан-дитовая и др.	Рона, месторождения Аппалачей, Мокси, Северное Прибайкалье, Кувалорог
Мамонский повышенно-магнезиальный, медно-никелевый	3-35	0,3-3,0; (макс-14,5)[28]	3-3	1-2	1-4	Аунит-перидотит-габбронорит (мамонский), габбро-вермит (печенгский)	Мамон, Юбилейное, Лин-Лейк
Еланский маломagneзиальный никелевый	2-24	0,47-9,35[28]	5-40	0,5-1,5	-1 ± -12	ортопироксенит-норит-диоритовых субвулканических тел (еланский тип)	Елань, Елма, Шануч
Примечание: * - содержание по материалам предшественников [13, 26, 27]; ** - данные Федоренко В. А. [29]							

никель/медь. Подобные месторождения выделены им в регенерированные месторождения войсисбейского типа диорит-норит-пироксенит-троктолитовой формации с обедненными медью платино-медно-никелевыми рудами. Дукукский магматизм, согласно этой классификации, является мало-умеренно-магнезиальным (от 1–20 до 3–30 мас. % в дифференциатах магматической группы), с высоким никель-медным отношением (от 1,5 до более 28:1). К этой же группе им отнесены и месторождения Войсис Бей, Еланское, Елкинское [31].

Петролого-геохимические особенности пород и руд этого типа определяются спецификой их формирования из сульфидоносного расплава. Большую роль при этом играли, как было отмечено выше, процессы контаминации расплавов [8] интрузируемыми породами на путях подъема или в интрузивных камерах. Никеленосные интрузии КНП представлены кремнистыми магнезиальными сериями пород, для которых характерны несоответствие между значительными концентрациями MgO (4–33 %) и повышенными содержаниями SiO₂ (47–57 %), отмечается высокомагнезиальный состав фемических минералов, присутствие в большом количестве ортопироксена, значительна величина отношений MgO/CaO, MgO/FeO, SiO₂/CaO. Небольшие по размерам никеленосные интрузии Шануча характеризуются сниженной магнезиальностью, повышенными содержаниями Al₂O₃, SiO₂, более высокой калиевостью [8, 10]. По этим показателям и по соотношениям в рудах Cr/Ti, Ni/Cu, Ni/Co, Pt/Pd (табл. 1, 2, 3) месторождение Шануч более всего может быть сопоставимо с Еланским, а рудопроявления, связанные с достаточно крупным Кувалорогским интрузивом (имеющим общий «норитовый профиль») больше сходны с Роновским (месторождение Бруванн в расслоенной интрузии Рона) [28] типовыми объектами (табл. 3).

В целом, для объектов описываемого типа проявлений и месторождений КНП, магморудоконтролирующими структурами которых являются зоны тектономагматической активизации. Для них характерны, по сравнению с другими, относительно молодой возраст рудовмещающих интрузий (ранний эоцен) [16], высокие содержания никеля в массивных и брекчиевидных рудах; умеренные содержания окиси магнезия (табл. 3). Среди элементов платиновой группы Pd (кроме руд проявления Рассоха) преобладает относительно Pt. Особенностью руд (как и руд еланского типа) [28] является тесное «пространственно-временное совмещение более раннего халькопирит-пентландит-пирротинового и позднего, обогащенного платиноидами кобальт-никелевого арсенид-сульфоарсенидного парагенеза» из единого расплава в процессе эволюционного развития рудномагматической системы.

Дальнейшие детальные исследования процессов эволюции рудоносной магмы и связанного с этим рудоотложения позволят получить новые данные, полнее охарактеризовать присущий объектам КНП особенный, «шанучский» тип формирования сульфидного медно-никелевого оруденения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев В. А. Прогнозная оценка никеленосности Срединной металлогенической зоны. Отчет по теме Центральной прогнозно-металлогенической партии за 1989-1990 г.г.. 1990. 161 с.
2. Щека С. А., Чубаров В. М. Никеленосные кортландиты Камчатки // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1987. № 2. С. 50–61.
3. Зотов В. П., Аврамова Н. Н. Отчет о результатах детальных поисковых работ на участке Медвежьем Дукук-Кувалорогской рудной зоны, проведенных Кувалорогской партией в 1979-1982 г.г. 1982. 160 с.
4. Гумовский А. С. Отчет о результатах поисков медно-никелевых месторождений на участке Квинум за 1988-1990 г.г. 1990. В 4-х т.: 269+93+164+90 с.
5. Кременецкий А. А., Трухин Ю. П. и др. Отчет «Проведение комплекса работ, связанных с геологическим изучением платиново-медно-никелевых руд в южной части Дукукского никеленосного рудного узла Квинум-Кувалорогской зоны». Петропавловск-Камчатский. Фонды НИГТЦ ДВО РАН. 2003 г. Т. I. 331 с.
6. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Кувакин Г. В. Сульфидное медно-никелевое рудопроявление Рассоха (Дукукский рудный район, Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. – Специальный выпуск № 31, «Камчатка-3». – С. 72–82.
7. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Степанов В. А. Некоторые геохимические особенности рудовмещающих пород Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2017. – Отдельный выпуск № 32 «Камчатка-5». С. 83–99.
8. Селянгин О. Б. К сравнительной петрологии интрузивов северной и южной зон Камчатской никеленосной провинции. Часть первая // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2014. – Т. 23. – № 1. – С. 168–185).
9. Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П. Медно-никелевое рудопроявление Аннабергитовая Щель Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2014. – Отдельный выпуск 2. – С. 324–333.
10. Селянгин О. Б. К сравнительной петрологии интрузивов северной и южной зон Камчатской никеленосной провинции. Часть вторая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. – № 2. – Вып. 24. – С. 95–115.
11. Полетаев В. А. Камчатская платиноидно-никеленосная зона – геология и рудоносность: автореф. дисс. канд. геол. – мин. наук. // Полетаев Владимир Александрович. – М.: МГУ, 2004. – 22 с.
12. Трухин Ю. П., Сидоров М. Д., Степанов В. А., Кунгурова В. Е. Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива // Геология и разведка. 2009. № 6. С. 43–49.

13. Дзюба Б. М., Иванов Б. П. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ, проведенных в пределах Кувалорог-Квинумской рудной зоны и Дукукского массива Квинумской партией в 1981–1982 гг. Петропавловск-Камчатский. ТГФ. Инв. № 4514. 1982. 147 с.
14. Тарарин И. А. Бадрединов З. Г., Чубаров В. М. Петрология и рудоносность метаморфических и магматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки. Владивосток: Дальнаука. 2015. – 302 с.
15. Селянгин О. Б. Петрология никеленосных базитов Шанучского рудного поля, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. – № 2. – С. 33–55.
16. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. – № 5. – С. 75–81.
17. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Степанов В. А., Новаков Р. М. Минеральные разновидности различных типов медно-никелевых руд Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2017. Отдельный выпуск 32 «Камчатка-5». С. 49–65.
18. Селянгин О. Б. Кортландит – амфиболовый пироксенит – горнблендитовая серия расслоенного никеленосного интрузива Восточно-Геофизический, Шанучское рудное поле, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 9–29.
19. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Степанов В. А. Сравнительный анализ микронзондовых исследований главных сульфидных минералов руд Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2017. – Отдельный выпуск 32 «Камчатка-5». – С. 66–82.
20. Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П., Новаков Р. М. Состав руд сульфидного медно-никелевого проявления Аннабергитовая Щель (Камчатка) // Горно-информационный аналитический бюллетень. – М.: Издательство «Горная книга». 2016. Специальный выпуск 31, «Камчатка-3». С. 42–55.
21. Додин Д. А., Чернышов Н. М., Яцкевич Б. А. Платинометалльные месторождения России. СПб: Наука. 2000. – 755 с.
22. Щека С. А., Чубаров В. М. Никеленосные кортландиты Камчатки // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1987. – № 2. – С. 50–61.
23. Щека С. А., Старков Г. Н. О сопряженности состава интрузивов и литолого-фациального состава вмещающих пород (на примере базитов и гипербазитов Камчатки) // Докл. АН СССР. 1968. – Т. 181. – № 3. – С. 710–713.
24. Щека С. А. Некоторые общие закономерности эволюции базит-гипербазитового магматизма // Основные проблемы металлогении Тихоокеанского пояса. Владивосток: ДВФ СО АН СССР. 1971. С. 300–313.
25. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: СПбГУ. 2003. 487 с.
26. Лащинский Г. В., Лукьянов В. Н. Отчет о результатах региональных и поисковых геолого-геофизических работ, выполненных в южной части Срединного Камчатского выступа Дукукской партией в 1976–1979 гг. Петропавловск-Камчатский. ТГФ. 1979. В 3-х томах. 155 + 229 + 223 с.
27. Евтихов И. В., Лукьянов В. Н. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ, выполненных в пределах габбро-норитового массива Кувалорог Кихчикской партией в 1979–1980 гг. Петропавловск-Камчатский. ТГФ. 1980. 124 с. Инв. № 4330.

28. Чернышев А. М., Чернышева М. Н. Рудонесущая роль даек сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудномагматических систем // Вестник ВГУ. Серия: геологическая. 2008. № 2. С. 109–131.

29. Федоренко В. А. Сульфидные медно-никелевые месторождения орогенных обстановок // Третья международная конференция «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения». Сборник тезисов. М. 2012. С. 220–223.

30. Медно-никелевые месторождения Балтийского щита // Ответственные редакторы; Г. И. Горбунов, Х. Папунен. Л.: Наука, 1985. 329 с.

31. Лихачев А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан. 2006. 496 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник; kunwe@rambler.ru,

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; vitstepanov@yandex.ru,

Трухин Юрий Петрович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник; ytrukhin2@yandex.ru,

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.

No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 100–115.

V. Ye. Kungurova, Yu.P. Trukhin, V. A. Stepanov

FOR COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ORES OF THE KAMCHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE

The characteristics of ore bodies and various objects of the Kamchatka nickeliferous province (KNP) is represented. Comparing to other fields of Russia and the world nickel objects are characterized by rather young age of ore-hosting intrusions, high nickel content in massive and brecciated ores and moderate or high content of magnesium oxide.

Key words: Kamchatka nickeliferous province, intrusives of ore-bearing formation, mafite-ultramafite ores, concentrations Clarks.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-100-115

AUTHORS

Kungurova V. Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher; kunwe@rambler.ru,

Trukhin Yu.P., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, ytrukhin2@yandex.ru,

Stepanov V. A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, vitstepanov@yandex.ru,
Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Poletaev V. A. *Prognoznaja ocenka nikelenosnosti Sredinnoi metallogenicheskoi zony. Otchet po teme Central'noi prognozno-metallogenicheskoi partii za 1989-1990 gg* (Predictive assessment of nicolenicole Median metallogenetic zone. The report on the theme of the Central metallogenetic forecast of the party for 1989-1990). 1990. 161 p.
2. Sp'eka S. A., Cpubarov V. M. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1987. no 2. pp. 50–61.
3. Zotov V. P. Avramova N. N. *Otchet o rezul'tatah detal'nyh poiskovyh rabot na uchastke Medvezh'em Dukuk-Kuvalorogskoi rudnoi zony, provedennyh Kuvalorogskoi partiei v 1979-1982 gg* (Report on the results of detailed prospecting works at the site of the Bear, Dokok-Kavalerovsky ore zones, held Kavalerovsky party in 1979-1982). 1982. 160 p.
4. Gumovskii A. S. *Otchet o rezul'tatah poiskov medno-nikelevykh mestorozhdenii na uchastke Kvinum za 1988-1990 gg* (Report on the results of the search for copper-nikelevykh deposits in the area Quinum for the years 1988-1990). 1990. V 4-h t.: 269+93+164+90 p.
5. Kremeneckii A. A., Truhin Yu.P. i dr. *Otchet «Provedenie kompleksa rabot, svjazannyh s geologicheskim izucheniem platinovo-medno-nikelevykh rud v yuzhnoi chasti Dukukskogo nikelenosnogo rudnogo uzla Kvinum-Kuvalorogskoi zony»* (Report The execution of works related to geological research of platinum-copper-Nickel ores in the southern part Dywxhgu Nickel ore node Quenum-Kavalerovskiy zone). Petropavlovsk-Kamchatskii. Fondy NIGTC DVO RAN. 2003 g. T. I. 331 p.
6. Kungurova V. E., Truhin Yu.P., Kuvakin G. V. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'*. 2016. Special'nyi vypusk no 31, «Kamchatka-3». pp. 72–82.
7. Kungurova V. E., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2017. Otdel'nyj vypusk 32 «Kamchatka-5». pp. 83–99.
8. Seljangan O. B. *Vestnik Kamchatskoi regional'noi organizacii «Uchebno-nauchnyi centr»*. Serija: *Nauki o Zemle*. 2014. T. 23. no 1. pp. 168–185.
9. Kungurova V. E., Stepanov V. A., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyi analiticheskii byulleten'*. 2014. Otdel'nyi vypusk 2. pp. 324–333.
10. Seljangan O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2014. no 2. Vyp. 24. pp. 95–115.
11. Poletaev V. A. *Kamchatskaja platinoidno-nikelenosnaja zona – geologija i rudonosnost'* (Kamchatka platinoid-Nickel zone – Geology and ore potential): avtoref. diss. kand. geol. – min. nauk. Poletaev Vladimir Aleksandrovich. Moscow: MGU, 2004. 22 p.
12. Truhin Yu.P., Sidorov M. D., Stepanov V. A., Kungurova V. E. *Geologija i razvedka*. 2009. no 6. pp. 43–49.
13. Dzyuba B. M., Ivanov B. P. *Otchet o rezul'tatah poiskovyh geologo-geofizicheskikh rabot, provedennyh v predelah Kuvalorog-Kvinumskoi rudnoi zony i Dukukskogo massiva Kvinumskoi partiei v 1981–1982 gg* (Report on the results of your search of geological and geophysical work carried out within Kuvalorog-Quiosco ore zones and Dywxhgu array Quioscos party in 1981-1982). Petropavlovsk-Kamchatskii. TGF. Inv. no 4514. 1982. 147 p.
14. Tararin I. A. Badredinov Z. G., Chubarov V. M. *Petrologija i rudonosnost' metamorficheskikh i magmaticheskikh kompleksov Central'noi i Vostochnoi Kamchatki* (Petrology and ore potential of magmatic and metamorphic complexes in Central and Eastern Kamchatka). Vladivostok: Dal'nauka. 2015. 302 p.
15. Seljangan O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2003. no 2. pp. 33–55.
16. Truhin Yu.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D., Kungurova V. E. *Rudy i metally*. 2009. no 5. pp. 75–81.
17. Kungurova V. E., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2017. Otdel'nyj vypusk 32 «Kamchatka-5». Pp. 49–65.
18. Seljangan O. B. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2006. no 2. Vyp. 8. pp. 9–29.

19. Kungurova V. E., Truhin Yu.P. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2017. Otdel'nyj vypusk 32 «Kamchatka-5», pp. 66–82.
20. Kungurova V. E., Stepanov V. A., Truhin Yu.P., Novakov R. M. *Gorno-informacionnyj analiticheskij byulleten'*. 2016. Special'nyj vypusk 31, «Kamchatka-3», pp. 42–55.
21. Dodin D. A., Chernyshov N. M., Jackevich B. A. *Platinometal'nye mestorozhdenija Rossii* (Platinum metal deposits of Russia). Saint Petersburg: Nauka. 2000. 755 p.
22. Sh'eka S. A., Chubarov V. M. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1987. no 2. pp. 50–61.
23. Sh'eka S. A., Starkov G. N. *Dokl. AN SSSR.* 1968. T. 181. no 3. pp. 710–713.
24. Sh'eka S. A. *Nekotorye obshie zakonomernosti yevolyucii bazit-giperbazitovogo magmatizma. Osnovnye problemy metallogenii Tihookeanskogo pojasa* (Some General features of the evolution basic-ultrabasic magmatism. Main problems of metallogeny of the Pacific belt). Vladivostok: DVF SO AN SSSR. 1971. pp. 300–313.
25. Naldrett A. Dzh. *Magmaticheskie sul'fidnye mestorozhdenija medno-nikelevyh i platinometal'nyh rud* (Magmatic sulphide deposits of copper-Nickel and PGE ores). Saint Petersburg, SPbGU. 2003. 47 p.
26. Lashinskii G. V., Luk'janov V. N. *Otchet o rezul'tatah regional'nyh i poiskovyh geologo-geofizicheskikh rabot, vypolnennyh v yuzhnoi chasti Sredinnogo Kamchatskogo vystupa Dukuskoj partii v 1976–1979 gg* (Report on the results of the search and regional geological-geophysical work performed in the southern part of Kamchatka Median projection Dukushi party in 1976-1979). Petropavlovsk-Kamchatskii. TGF. 1979. V 3-h tomah. 155 + 229 + 223 p.
27. Evtihov I. V., Luk'janov V. N. *Otchet o rezul'tatah poiskovyh geologo-geofizicheskikh rabot, vypolnennyh v predelah gabbro-noritovogo massiva Kuvalorog Kihchikskoi partii v 1979–1980 gg* (A report on the results of your search of geological and geophysical works performed within a gabbro-norite massif Kuvalorog Kachinskoe party in 1979-1980). Petropavlovsk-Kamchatskii. TGF. 1980. 124 s. Inv. No 4330.
28. Chernishev A. M., Chernisheva M. N. *Vestnik VGU. Seriya geologicheskaya.* 2008. no 2. pp. 109–131.
29. Fedorenko V. A. *Sul'fidnye medno-nikelevye mestorozhdenija orogenicheskikh obstanovok* (Of copper-Nickel Sulfide deposits in orogenic environments). Tret'ja mezhdunarodnaja konferencija «Ul'trabazit-bazitovye komplekсы skladchatyh oblastei i svjazannye s nimi mestorozhdenija». Sbornik tezisov. Moscow. 2012. pp. 220–223.
30. *Copper-Nickel mestorozhdeniya Baltijskogo snita.* Responsible editors; G. I. Gorbunov, H. Papunen. L.: Nauka, 1985. 329 p.
31. Likhachev, A. P., *Platinum-copper-Nickel and platinum deposits.* Moscow: Eslan. 2006. 496 p.



**В. Е. Кунгурова, Р. М. Новаков,
М. Д. Сидоров, В. А. Степанов**

О ПЕРСПЕКТИВАХ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ДУКУКСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

Приведены данные, полученные в результате проведения прогнозно-оценочных работ в пределах юго-западной части Дукукского рудного района. Они позволили оценить перспективы обнаружения новых медно-никелевых объектов.

Ключевые слова: Камчатская никеленосная провинция, Дукукский рудный район, сульфидные медно-никелевые руды.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-116-120

В юго-западной части Дукукского рудного района (ДРУ) располагается ряд известных ранее проявлений медно-никелевых руд, ореолы никеля и меди в донных отложениях, а также интрузии потенциально никеленосного дукукского комплекса [1, 2, 3, 4].

В 2007 г. сотрудниками НИГТЦ ДВО РАН (по договору с НПО «Геотехнология») совместно с ООО «Аверс-1» [5], на территории, прилегающей с юго-востока к участку Тундровый, были проведены прогнозно-геохимические исследования. В результате поисковых работ геологом Успенским В. С. в верховьях р. Хихку, на левом борту вблизи русла, в моренных отложениях встречена и опробована слабоокатанная глыба интенсивно сульфидизированных ультрабазитов размером 0,7х1,0 м (рис. 1).

Насыщенность найденной глыбы сульфидным материалом составляет около 30–60 %. Вмещающими являются интенсивно измененные породы ультраосновного ряда (предположительно кортландиты), превращенные местами в тальк-хлорит-тремолитовый агрегат с серпентином, магнетитом, реликтами первичного амфибола (паргасита) и оливина. Руда с поверхности в значительной степени окислена и выщелочена, имеет сетчатую, пятнистую, вкрапленную текстуру с участками гнездово-вкрапленной, равномерно-вкрапленной и густо-вкрапленной; сидеронитовую структуру.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 116–120.

© В. Е. Кунгурова, Р. М. Новаков, М. Д. Сидоров, В. А. Степанов, 2017.

Образцы с рудной минерализацией обладают высокой магнитной восприимчивостью (свыше 3000×10^{-5} Си). Подобные магнитные свойства имеют массивные руды месторождения Шануч.

По данным минералогического анализа проб-протокочек в составе сульфидов преобладает пирротин. Халькопирит и пентландит имеют подчиненное значение. В небольших количествах присутствуют пирит, халькозин, ковеллин и магнетит, а из гипергенных минералов – лимонит. Редкими являются самородное золото, галенит, теллуриды и сульфотеллуриды висмута, теллуриды серебра. Нерудные минералы представлены оливином, пироксеном и амфиболом. Подчиненное значение имеют карбонаты, кварц и мусковит.

В химико-технологической лаборатории НИГТЦ ДВО РАН на двухлучевом атомно-абсорбционном пламенно-эмиссионном спектрофотометре АА-6300 с пламенной и электротермической атомизацией проведено количественное определение в пробах никеля, меди, кобальта. В Центральной лаборатории ОАО «Камчатгеология» выполнены химико-спектральные анализы проб на наличие платины, палладия, родия, рутения, иридия и атомно эмиссионное определение золота с экстракционным концентрированием органическими сульфидами.

Средние содержания основных полезных компонентов составили (в %): никеля – 1,99, меди – 1,83, кобальта – 0,08; элементов платиновой группы (в г/т): платины – 0,3, палладия – 0,35, родия – 0,01, рутения – 0,01; а также золота – 0,27 г/т. Отношение $Ni/Cu=1,1$; $Ni/Co=24,8$; Pt/Pd меньше или равно 1.

По петрологическим характеристикам вмещающих пород, структурно-текстурным, минералого-геохимическим особенностям руд, они могут быть сопоставимы с пятнистыми рудами Восточно-Геофизического рудопроявления Камчатской никеленосной провинции (КНП). На нем сульфидное медно-никелевое оруденение локализуется в наиболее магнезиальных породах придонных и средних горизонтов интрузии. Для руд характерна сетчатая, пятнистая текстуры, сидеритовая структура, халькопирит-пентландит-пирротинный состав. Сульфидное медно-никелевое оруденение, обнаруженное в глыбе в



Рис. 1. Рудная глыба в верховьях р. Хихку (фото Новакова Р. М.)

верховьях р. Хихку, также располагается среди существенно магнетитовых пород, имеет такие же структурно-текстурные характеристики и взаимоотношения породообразующих минералов [5, 6].

Геолого-структурные особенности бассейна левобережья р. Хихку имеют определенное сходство с Шанучским рудным полем, в пределах которого выявлено одноименное месторождение и несколько проявлений сульфидных медно-никелевых руд, связанных с малыми мафит-ультрамафитовыми интрузиями дукукского комплекса [8]. Структурно-тектоническая позиция, геолого-геохимические и геофизические особенности юго-западной части района, где встречена глыба сульфидизированных ультрабазитов, позволяют предположить наличие здесь в коренном залегании нового перспективного медно-никелевого рудопроявления с высоким содержанием никеля и меди. На площади находится локальная положительная аномалия поля силы тяжести [5], которая с большой степенью вероятности может указывать на наличие на глубине интрузивного очага, сателлитами которого могут являться выходящие на поверхность интрузии дукукского комплекса, вмещающие сульфидное медно-никелевое оруденение.

Перечисленные выше факты позволяют предположить, что в дальнейшем, при проведении полного комплекса геологических, геохимических и геофизических исследований, в пределах юго-западной части ДРУ могут быть обнаружены новые медно-никелевые объекты с высокими содержаниями полезных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев В. А. Прогнозная оценка никеленосности Срединной металлогенической зоны. // Отчет по теме Центральной прогнозно-металлогенической партии за 1989–90 гг. Петропавловск-Камчатский. 1990. 161 с.

2. Сидоренко В. И. Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов рек Киумшечка, Пымпы, Прав. Кихчика. // Отчет Киумшечской партии о результатах групповой геологической съемки масштаба 1:50 000 и общих поисков и группового геологического доизучения в 1985-1990 гг. Петропавловск-Камчатский. 1990 г. Кн. 1–309 с., кн. 2–287 с., кн.3–185 с., кн.4–225с.

3. Сидоренко В. И., Селиванов М. Т. Легенда Хангарской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1: 200 000 (издание второе). // Объяснительная записка. КПСЭ ГПП «Камчатгеология», 1998, инв. № 6015.

4. Гумовский А. С. Отчет о результатах поисков медно-никелевых месторождений на участке Квинум за 1988-90 гг. Петропавловск-Камчатский. 1990 г. Кн. 1 – 269 с., кн. 2 – 93 с., кн. 3 – 164 с., кн.4 – 90 с.

5. Трухин Ю. П., Степанов В. А. и др. Отчет о результатах прогнозно-геохимических исследований в западной части Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны (по договору № 122-ГТ/07 от 10 июня 2007 г.) Петропавловск-

Камчатский, 2008 г. Кн.1 – 145 стр., 50 рис., 20 фото, 21 таблица; Кн.2 – 104 стр., 12 приложений. Графические приложения – 7 листов.

6. Селянгин О. Б. Кортландит-амфиболовый пироксенит-горнблендитовая серия расслоенного никеленосного интрузива Восточно-Геофизический, Шанучское рудное поле, Камчатка. // Вестник КРАУНЦ Науки о Земле. 2006. № 2. выпуск 8, с. 9–29.

7. Сидоров М. Д., Степанов В. А. Геофизические поля и никеленосность Камчатского срединного массива // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006, № 2 (8), с. 140–150.

8. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы, 2009. №5. С.75-81. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, kunwe@rambler.ru,

Сидоров Михаил Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, smd52@mail.ru.

Новаков Роман Михайлович – старший научный сотрудник, 6rom6@mail.ru,

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, vitstepanov@yandex.ru,

Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 116–120.

V. Ye. Kungurova, R. M. Novakov, M. D. Sidorov, V. A. Stepanov

ABOUT PERSPECTIVES OF COPPER-NICKEL OBJECTS INDICATION IN THE SOUTH-WESTERN PART OF THE DUKUK ORE REGION

The data obtained as a result of prognostic-and-appraisal works within the south-western part of the Dukuk ore knot are given. They made it possible to assess the prospects for prospecting new copper-nickel objects.

Key words: Kamchatka nickeliferous province, Dukuk ore knot, sulphide copper-nickel ores.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-116-120

AUTHORS

Kungurova V. Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, kunwe@rambler.ru,

Novakov R. M., Senior Researcher, 6rom6@mail.ru,

Sidorov M. D., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, nigtc@kscnet.ru,
Stepanov V. A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, vitstepanov@yandex.ru,
Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Poletaev V. A. *Prognoznaya ocenka nikelenosnosti Sredinnoj metallogenicheskoy zony* (Predictive assessment of nicolenicole Median metallogenic zone). Otchet po teme Central'noj prognozno-metallogenicheskoy partii za 1989–90 gg. Petropavlovsk-Kamchatskij. 1990. 161 p.
2. Sidorenko V. I. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye bassejnov rek Kiumshecheka, Pympy, Prav. Kihchika* (Geological structure and mineral resources of river basins of Kimchaek, Pimpy Right. Cacica). Otchet Kiumshechskoj partii o rezul'tatah gruppovoj geologicheskoy s«emki masshtaba 1:50 000 i obshchih poiskov i gruppovogo geologicheskogo doizucheniya v 1985–1990 gg. Petropavlovsk-Kamchatskij. 1990 g. Kn.1– 309 p., kn.2–287p., kn. 3–185 p., kn.4–225 p.
3. Sidorenko V. I., Selivanov M. T. *Legenda Hangarskoj serii listov Gosudarstvennoj geologicheskoy karty Rossijskoj Federacii masshtaba 1: 200 000 (izdanie vtoroe)* (Legend Angarskoi series sheets of the State geological map Russian Federation, scale 1: 200 000 (second edition)). Ob«yasnitel'naya zapiska. KPSEH GGP «Kamchatgeologiya», 1998, inv. no 6015.
4. Gumovskij A. S. *Otchet o rezul'tatah poiskov medno-nikelevyh mestorozhdenij na uchastke Kvinum za 1988–90 gg* (Report on the results of the search for copper-Nickel deposits in the area Kvinum for 1988-90). Petropavlovsk-Kamchatskij. 1990 g. Kn.1: 269 p., kn.2: 93 p., kn.3: 164 p., kn. 4: 90 s.
5. Truhin Yu.P. i dr. *Otchet o rezul'tatah prognozno-geohimicheskikh issledovanij v zapadnoj chasti Kvinum-Kuvalorogskoj nikelenosnoj zony (po dogovoru № 122-GT/07 ot 10 iyunya 2007 g.)* (Report on the results of predictive geochemical researches in the Western part of Quenum-Kavalerovskiy Nickel zone (under contract No. 122-GT/07 from June 10, 2007)). Petropavlovsk-Kamchatskij, 2008 g. Kn.1: 145 p., 50 ris., 20 foto, 21 tablica; Kn.2: 104 p., 12 prilozhenij. Graficheskie prilozheniya – 7 listov.
6. Selyangin O. B. *Vestnik KRAUNC Nauki o Zemle*. 2006. no 2. vypusk 8, pp. 9–29.
7. Sidorov M. D., Stepanov V. A. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2006, no 2 (8), pp. 140–150.
8. Trukhin Yu.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D., Kyngyrova V. E. *Shanychskoe medno-nikelevoe mestorojdenie: geologo-geofizicheskaya model', sostav i geohimiya rydy* (Shanuch copper-nickel deposit: geological and geophysical model, composition and geochemistry of ores). Ores and metals. 2009. №5. pp. 75-81.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕТАЛЛОВ ПО ПЛОТНОСТНЫМ МОДЕЛЯМ ИНТРУЗИЙ

Создана плотностная модель с объемным изображением блоков земной коры, содержащих интрузии дукукского никеленосного комплекса, в том числе не выходящих на дневную поверхность. Определена форма интрузий и занимаемый ими объем. Для оценки концентрации химических элементов рассчитаны средние содержания никеля, меди, кобальта в породах интрузии Кувалорог и рудоносных интрузиях Шанучского рудного поля. Проведенные исследования показали, что продуктивность по Ni, Cu и Co пород дукукского комплекса превышает в 1,5–3 раза кларковые. Определен теоретический ресурсный потенциал провинции, большая часть которого сосредоточена на юге срединного массива.

Ключевые слова: плотность, модель, интрузия, изоденса, никель, провинция.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-121-137

Введение

В южной части Срединного хребта Камчатки находится Камчатская никеленосная провинция (КНП) [10]. Пространственно провинция соответствует структуре срединного массива, расположенного в этой части полуострова. Срединный массив известен в опубликованных работах как Срединный Камчатский массив, Срединный Камчатский выступ или Центрально-Камчатский кристаллический массив. Источником никеля являются магмы, из которых образовались интрузии мел-эоценового дукукского габбро-норит-кортландитового plutонического комплекса, развитого в пределах массива. Рудные тела, представляющие промышленный интерес, приурочены к небольшим интрузиями — апофизам крупных массивов в их надинтрузивной зоне. Примером такого сульфидного медно-никелевого оруденения является месторождение Шануч, относящееся к типу регенерированных месторождений, сформированных в процессе магматического и гидротермального переотложения рудного вещества [1, 11], которое выделилось в промежуточных магматических камерах и каналах-проводниках. В провинции выделяется два рудных района: Шанучский на севере и Дукукский на юге [10]. Кроме того, исследования

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 121–137.

© М. Д. Сидоров, В.Е Кунгурова, 2017.

петрофизических свойств и анализ региональных геологических и геофизических съемок на территории массива позволил прогнозировать потенциально никеленосный район в его центральной части – бассейне р. Колпакова [3, 4]. Были установлены геофизические критерии выявления незродированных интрузий комплекса, что в свою очередь позволило выделить участки, где возможно наличие рудогенерирующих магматических систем подобных месторождению Шануч (рис. 1). Для определения пространственного положения блоков, содержащих интрузии, их формы и объема проведена интерпретация аномалий силы тяжести, создана воксельная 3D модель плотности срединного массива.

Исходные данные и методика определения объемов. Породы никеленосного магматического комплекса обладают повышенной плотностью по отношению к вмещающей среде в верхней части земной коры. Форму интрузий и занимаемый ими объем можно определить, если построить замкнутую поверхность, внутри которой плотность геологической среды будет превышать $2,9 \text{ г/см}^3$. Такая и большая плотность соответствует породам базит-ультрабазитового ряда. Для этой цели применима методика плотностного моделирования с объемным изображением результатов в виде модели, состоящей из совокупности кубических ячеек определенной плотности.

Создание такой модели состоит из двух этапов. На начальном этапе рассчитываются теоретические глубинные геолого-геофизические разрезы в 2D или 3/4D варианте, пересекающие исследуемый блок коры. В плоскости разрезов определяется плотность геологической среды.

Для моделирования на этой стадии используются геологические карты, стратиграфическая колонка, данные сейсморазведки (если имеются), результаты количественной интерпретации геофизических аномалий, данные бурения скважин и иная априорная информация о строении района. На следующем этапе из отдельных разрезов синтезируется база данных плотности (БДП), содержащая плановые координаты X, Y, Z точек на глубинных разрезах и подобранную в них модельную плотность D. Точки на разрезах расположены в узлах квадратной сетки. Шаг выбирается в зависимости от детальности (масштаба) подобранных разрезов и может изменяться от десятков до сотен метров.

БДП служит исходным материалом для вычисления 3-х мерной матрицы плотности, построения изоплотностных поверхностей по заданной величине и вычисления объема. Размер элементарной ячейки воксельного изображения различен для разных участков (групп аномалий) и зависит от густоты сети разрезов. Так, для аномалий в Шанучском районе размер изменялся от 2 до 0,8 км, в Колпаковском – 2 и 0,5 км, в северной части Дукукского района – 2, 1 и 0,5 км.

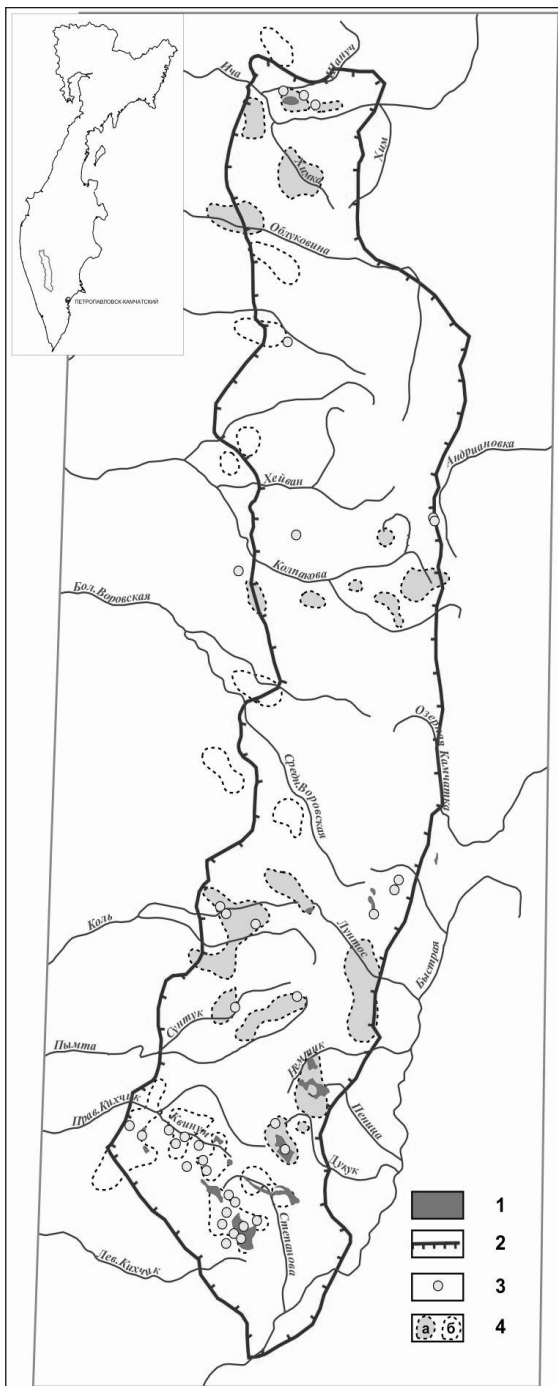


Рис. 1. Схема перспективных локальных максимумов силы тяжести в КНП: 1 – выходы интрузий никеленосного комплекса; 2 – граница срединного массива; 3 – рудопроявления никеля; 4 – аномалии Δg , связанные с крупными интрузиями дукукского комплекса: а – интрузии, для которых построена плотностная модель и вычислен объем, б – плотностная модель отсутствует

Подробно методика и анализ плотностных моделей по районам КНП были опубликованы в соответствующих статьях [5, 6, 8].

Определение средних концентраций Ni, Cu, Co в породах Дукукского магматического комплекса. В КНП интрузии никеленосного комплекса представлены двумя типами массивов. Один тип – крупные тела площадью до 20–30 км², мощностью более 1 км (Кувалорог, Дукук, Пеницкий). Другой тип интрузивных тел представлен небольшими штоками, дайками и пластовыми телами амфиболовых габбро, пироксенитов, перидотитов, горнблендитов, кортландитов, диоритов мощностью от нескольких до 200 м и протяженностью до 1200 м [9]. Малые интрузии являются апофизами или проводниками между крупными массивами [11]. На севере провинции обнажены только малые интрузии, а на юге представлены интрузивы обоих типов.

Кувалорогский интрузив представляет собой сложно дифференцированную интрузию основного ультрамафитового–основного состава площадью около 28 кв.км [12]. Наиболее изучен его западный фланг, где в 2006–2007 гг. НИГТЦ ДВО РАН проводил прогнозно-геохимические исследования. Эти данные использованы для определения средних содержаний. Для подсчета взяты пробы из различных типов пород, в т.ч. 97 проб пород без видимых сульфидов и 115 – с сульфидной минерализацией (табл. 1). Использованы результаты полного спектрального полуколичественного анализа, проведенного в Центральной лаборатории ФГУП «Камчатгеология» на приборе ДФС-8 методом просыпки на трехфазной дуге. Расшифровка спектрограмм велась по эталонам «Гранит-83». Предел обнаружения составляет (в %): Ni – 0,0005; Cu – 0,0001; Co – 0,0003. При изучении химического и минералогического состава образцов выделены ультрамафиты основные и основные породы (табл. 1): оливинные плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты, иногда с прослоями или линзами кортландит-шрисгеймитов, амфиболовые, биотит-амфиболовые мелано-габбро-нориты, сменяющиеся более мелкозернистыми лейкократовыми. В лейконоритах нередко отмечаются блоки-ксенолиты вмещающих сланцев хейванской свиты, интенсивно ороговикованных, зачастую графитизированных и насыщенных гранатом. Подавляющая часть пород относится к основным разностям с содержанием SiO₂ в диапазоне 44–53 %. Ультрабазиты (кортландиты) единичны, ограничена и доля пород, более кремнеземистых, чем базиты.

Кларки концентраций никеля, меди кобальта в основных типах пород приведены в табл. 2 [2]. При сравнении средних содержаний (табл. 1, 2) никеля, меди, кобальта в основных ультрамафитах и основных породах интрузива Кувалорог с кларками содержаний в основных

Таблица 1

Содержания никеля, меди, кобальта в породах западного фланга массива Кувалорог

Тип породы	Наименование породы	Среднее значение. % разброс содержания			к-во проб
		Ni	Cu	Co	
<i>Породы без видимой сульфидной минерализации</i>					
ультрамафиты основные	амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты	0,0280 0,004- 0,04	0,0185 0,003- 0,03	0,0126 0,005- 0,02	24
основные	плагиоклаз-амфиболовое габбро, биотит-амфиболовые мелано-габбро-нориты	0,0281 0,0015- 0,07	0,0113 0,003- 0,05	0,0070 0,002- 0,02	73
ультрамафиты основные+основные	все: амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты+ плагиоклаз-амфиболовое габбро, биотит-амфиболовые мелано-габбро-нориты	0,0281 0,0015- 0,07	0,0131 0,003- 0,05	0,0084 0,002- 0,02	97
<i>Породы с видимой сульфидной минерализацией – вкрапленной, прожилково-вкрапленной</i>					
ультрамафиты основные	амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты, с вкрапленностью сульфидов 1–10 %	0,1429 0,02-0,7	0,0457 0,001- 0,1	0,0119 0,005- 0,02	60
ультрамафиты основные	лимонитизированные амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты	0,1546 0,004- 0,7	0,0415 0,003- 0,4	0,0075 0,0015- 0,02	42
основные	габбро, биотит-амфиболовые мелано-габбро-нориты, с вкрапленностью сульфидов 3–10 %	0,1577 0,1-0,3	0,0216 0,007- 0,1	0,0114 0,007- 0,02	13

Таблица 2

Кларки содержаний никеля, меди, кобальта в различных типах пород (по А. Б. Ронову, А. А. Ярошевскому, А. А. Мигдисову, 1990)

Содержания, %	Типы горных пород			
	Ультраосновные	Основные	Средние	Кислые
Ni	0,1230	0,0080	0,0061	0,0008
Cu	0,0080	0,0090	0,0060	0,0025
Co	0,0080	0,0030	0,0020	0,0010

породах отмечается, что они превышают их в 1,5–3 раза и составляют (%): никель – 0,0281 (кларк – 0,0080); медь – 0,0131 (кларк – 0,0090); кобальт – 0,0084 (кларк – 0,0030). Кларки же никеля – 0,1230 % в ультраосновных породах – выше, чем в рассматриваемых ультрамафитах и мафитах, а содержания меди и кобальта выше их кларков, составляющих для этих металлов 0,0080. В целом, разброс содержаний химических элементов значительный – от менее, чем кларковые, до концентраций, в несколько раз их превышающих. Однако следует отметить тот факт, что в большинстве проб обнаружены повышенные относительно кларка значения никеля (в 82,5 % от всех проанализированных проб), кобальта (в 77,3 %), меди (в 51,5 %).

Всё наблюдавшееся в интрузиве сульфидное оруденение связано, в основном, с оливинсодержащими плагиоклаз-флогопит-амфиболовыми ортопироксенитами, меньше – с биотит-амфиболовыми габбро и габбро-норитами. Повышенные концентрации никеля в пределах 0,1–0,7 % характерны для вкрапленной сульфидной минерализации в оливинсодержащих плагиоклаз-флогопит-амфиболовых ортопироксенитах и биотит-амфиболовых мелано-габбро-норитах, а также для интенсивно окисленных (лимонитизированных) и выщелоченных руд (табл. 1).

Рассчитаны средние содержания никеля, меди, кобальта в породах рудоносных интрузий *Шанучского рудного поля* в северной части Камчатской никеленосной провинции (табл. 3, 4). Были проанализированы пробы, отобранные из керна разведочных скважин. Анализ проведен в аналитическом центре ИВиС ДВО РАН на рентгенофлуоресцентном спектрометре «S4 PIONEER» полуколичественным методом. Интрузивы месторождения Шануч – это сближенные дифференцированные ультрамафит – габбро-диорит – диоритовые тела, вытянутые в субширотном направлении. Мощность интрузий – от первых метров до 200 м. По геофизическим данным на глубине 2 км и более моделируется область с плотностью, отвечающей крупной диорит-габбро-перидотитовой интрузии. Никеленосные малые интрузии являются ее апофизами [11].

Таблица 3

Средние содержания никеля, меди, кобальта в породах и рудах месторождения Шануч

Тип породы	Наименование породы	Среднее значение, % разброс содержаний			к-во проб
		Ni	Cu	Co	
Породы без видимой сульфидной вкрапленности					
ультрамафиты ос- новые	плагноклаз-амфиболовые, флогопит-амфиболовые ортопироксениты (15 – 26 % MgO)	0,0563 0,0122- 0,1066	0,0256 0,0017- 0,1823	0,0054 0,0023- 0,0085	12
основные	габбро, меладiorиты (7 – 14 % MgO)	0,0377 0,0094- 0,0832	0,0083 0,0013- 0,0185	0,0040 0,0025- 0,0059	12
средние	диориты	0,0156 0,0011- 0,0771	0,0057 0,0002- 0,0276	0,0017 0,0001- 0,0036	13
кислые	гранодиориты, плагиограниты	0,0130 0,0011- 0,0257	0,0044 0,0001- 0,0165	0,0011 0,0001- 0,0018	8
ультрамафиты ос- новые+основные	плагноклаз-амфиболовые, флогопит-амфиболовые ортопироксениты + габбро, меладiorиты	0,0470	0,0170	0,0047	24
ультрамафиты основные +основные+средние	плагноклаз-амфиболовые, флогопит-амфиболовые ортопироксениты + габбро, меладiorиты+диориты	0,0360	0,0130	0,0036	37
Руда массивная, прожилково-вкрапленная, вкрапленная во вмещающих породах					
массивная, прожилково-вкрапленная руда в % в плагноклаз- амфиболовых, флогопит-амфиболовых ортопироксенитах		4,6654 1,22-10,9	0,5098 0,0216- 2,19	0,1274 0,0394 0,2665	26
вкрапленность сульфидов 1 – 5 % в плагноклаз-амфиболовых, флогопит- амфиболовых ортопироксенитах + габбро, меладiorитах		0,4877 0,1674- 1,315	0,1099 0,0172- 0,2878	0,0137 0,0073- 0,0325	14

Таблица 4

Средние содержания никеля, меди, кобальта в породах и рудах проявления Восточно-Геофизическое

Тип породы	Наименование породы	Среднее значение, % разброс содержания			к-во проб
		Ni	Cu	Co	
Породы без видимой сульфидной вкрапленности					
ультрамафиты основные	амфиболовые пироксениты и их оливинсодержащие разновидности	0,0509 0,0017- 0,1249	0,0216 0,001- 0,0447	0,0098 0,0037- 0,0154	11
ультрамафиты основные	чередующиеся амфиболовые пироксениты – пироксеновые горнблендиты, горнблендиты	0,0259 0,005- 0,1676	0,0197 0,0019- 0,0704	0,0084 0,0011- 0,0127	11
ультрамафиты основные	все: амфиболовые пироксениты и их оливиносодержащие разновидности, пироксеновые горнблендиты, горнблендиты	0,0384	0,0207	0,0091	22
Породы с видимой сульфидной минерализацией – вкрапленной, прожилково-вкрапленной					
породы эндоконтакта с массивной и прожилково-вкрапленной рудой		2,7171 0,53-6,27	0,5324 0,0848- 0,8698	0,0974 0,0079- 0,2183	8
ультраосновные	кортландиты с вкрапленностью сульфидов 1–3%	0,2469 0,0729- 0,9832	0,0707 0,0162- 0,3061	0,0176 0,0106- 0,0149	6
ультраосновные	кортландиты с вкрапленностью сульфидов до 7–10%	0,6237	0,1843	0,0267	1

Рудоносный интрузив Восточно-Геофизический располагается в восточной части Шанучского рудного поля. Он внедрен в толщу кристаллических сланцев камчатской серии, имеет удлиненную форму с размерами на поверхности 250×450 м. Разведанная часть интрузии сложена породами из ряда кортландит – пироксеновый горнблендит, которые являются самыми ультраосновными и ультрамафитовыми для всего рудного поля. Интрузия содержит залежь сульфидных медно-никелевых руд, локализованную у его южного края.

Средние содержания никеля в ультрамафитах, мафитах, средних и кислых породах Шанучского рудного поля (как месторождения Шануч, так и рудопроявления Восточно-Геофизическое, табл. 3, 4) выше кларковых в соответствующих им типах пород (табл. 2).

В табл. 1–3 жирным курсивом выделены средние содержания химических элементов, использованные далее для расчетов теоретического ресурсного потенциала металлов в интрузивных блоках.

Определение объема интрузий никеленосного магматического комплекса. Вычисление объема магмы, из которой сформированы интрузии, проведено по плотностным моделям, составленным для наиболее перспективных аномалий в каждом из рудных районов провинции (кроме аномалий Квинум-Кувалорогской зоны). Интерпретация проведена с помощью программ Geosoft (Oasis Montaj, GM-SYS, Euler 3D). Воксельная 3D-модель составлена до глубины 10 км, так как в этом слое на фоне геосреды срединного массива хорошо выражены плотные блоки с базитовыми интрузиями [7]. Блоки, содержащие интрузии комплекса, выделялись по интерполированным изоповерхностям 2,9 г/см³. Внутри эти блоки состоят преимущественно из габбро и норитов а также в незначительном количестве из основных ультрамафитов с плотностью 3,0 и более г/см³. Кроме того, известно, что внутри крупных массивов содержится большое количество ксенолитов вмещающих пород, даек и небольших штоков других более поздних магматических комплексов. Все это уменьшает объем, занятый дукукской магмой. Оценить величину, на которую нужно уменьшить объем блоков, можно по данным бурения глубоких скважин в массиве Кувалорог. Эта интрузия наиболее изучена как с поверхности, так и на глубину. В бассейне ручья Медвежий пробурено несколько вертикальных скважин глубиной от 500 до 900 м. Анализ разрезов этих скважин показал, что около 11 % разреза не принадлежит базитам дукукского комплекса. Так, в наиболее глубокой скважине № 3 из 900 м разреза 135 м слагают сланцы и андезиты, что составляет 15 % от общей мощности. В скважине № 2 из 700 м разреза не принадлежат дукукскому комплексу пород 90 м (13 %), в скважине № 5 эти цифры составляют 502 и 25

(5 %) и соответственно. В обнаженной части интрузии также встречаются участки, занятые иными породами (ксенолиты сланцев, метаалевролитов, окварцованных пород и др.). Понижающий коэффициент в 11 % применен в расчетах ко всем крупным, в т.ч. незродированным прогнозируемым интрузивам провинции. Ниже, на рис. 2–4, изображены блоки с интрузиями, включенными в подсчет, их форма и положение.

Крупные интрузии в Шанучском районе не имеют выходов на дневную поверхность. Обнажены только небольшие интрузивные тела. Верхние кромки крупных интрузивов залегают на глубине от 0 до 6 км. Наиболее глубоко (5,5–6,5 км) расположена интрузия аномалии 3 (руч.Рыбный). Гипсометрически выше всех расположен интрузив под г. Верхняя Тхонжа, с которым связано формирование рудномагматической системы месторождения Шануч и рудопроявлений одноименного рудного поля.

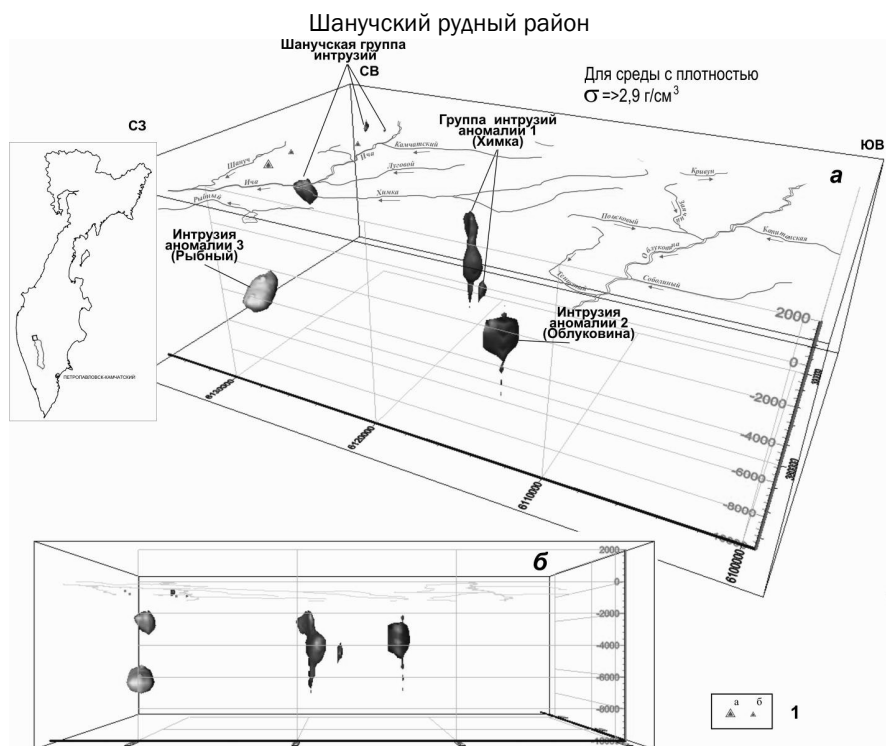


Рис. 2. Интрузии базитов в Шанучском рудном районе, выделенные по плотностной модели в верхней части земной коры. Вид с юго-запада (а) и фронтальная проекция (б) с юга. Предполагаемые интрузии оконтуренные по изоденсе 2,9 г/см³: 1 – месторождение (а) и рудопроявления (б) никеля

Таблица 5

Шанучский рудный район. Теоретический ресурсный потенциал металлов

Магматическая система	Объем, куб. км	Количество металлов в интрузиях, млн. т					
		Средние содержания хим. эл. в породах по А. Б. Ронову и др. 1990 г.			Реальные средние содержания хим. эл. в породах интрузий месторождения Шануч		
		Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co
Шанучское рудное поле. Аномалии №7,8	1,11	0,26	0,29	0,10	1,52	0,55	0,15
р. Облуковина. Аномалия №2	1,65	0,38	0,43	0,14	2,25	0,81	0,22
Верх. течение р. Химка. Аномалия №1	4,13	0,96	1,08	0,36	5,63	2,04	0,56
Руч. Рыбный. Аномалия №3	3,91	0,91	1,02	0,34	5,33	1,93	0,53
ИТОГО	10,81	2,51	2,82	0,94	14,73	5,33	1,47

Таблица 6

Колпаковский район. Теоретический ресурсный потенциал металлов

Магматическая система	Объем, куб. км	Количество металлов в интрузиях, млн. т					
		Средние содержания хим. элементов в породах по А. Б. Ронову и др. 1990 г.			Реальные средние содержания химических элементов в породах интрузии Кувалорог		
		Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co
Аномалия №6	4,30	1,00	1,12	0,37	3,50	1,63	1,05
Аномалия №12	1,31	0,30	0,34	0,11	1,07	0,50	0,32
Аномалии №13, 14	0,89	0,21	0,23	0,08	0,73	0,34	0,22
Аномалия №10	1,12	0,26	0,29	0,10	0,91	0,43	0,27
Аномалия №11	0,22	0,05	0,06	0,02	0,18	0,08	0,05
ИТОГО	7,84	1,82	2,05	0,68	6,39	2,98	1,91

Реальные средние содержания металлов в породах рудоносных интрузий Шанучского рудного поля, по сравнению с кларковыми, увеличивают потенциал (в млн. т): никеля – на 12,22; меди – на 2,51; кобальта – на 0,53.

В Колпаковском районе нет обнажений интрузий никеленосного комплекса, но есть как прямые, так и косвенные признаки наличия интрузивов на относительно небольших глубинах. Расчеты показывают, что донные части предполагаемых по аномалиям силы тяжести интрузий находятся на глубине не более -4 км, а верхние кромки залегают на уровне моря и выше. В этих местах и наблюдаются прямые признаки никеленосности [5].

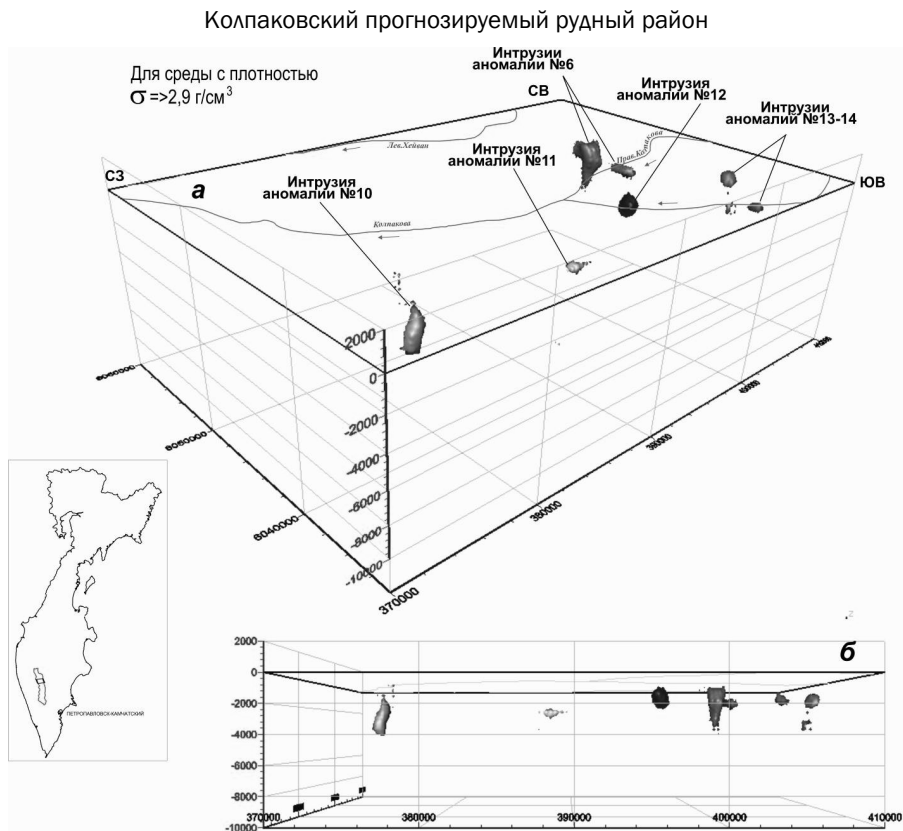


Рис. 3. Интрузии базитов в Колпаковском прогнозируемом рудном районе, выделенные по плотностной модели в верхней части земной коры. Вид с юго-запада (а) и фронтальная проекция (б) с юга. Предполагаемые интрузии, околтуренные по изоденсе $2,9 \text{ г/см}^3$

Реальные средние содержания металлов в интрузиях Колпаковского района, по сравнению с кларковыми, увеличивают потенциал (в млн. т): никеля – на 4,57; меди – на 0,93; кобальта – на 1,23.

Дукукский рудный район (северная часть)

Наиболее большие по размерам интрузии находятся в Дукукском рудном районе. Часть из них обнажается (Дукукский, Кувалорогский, Пеницкий массивы), но значительная по массе часть не имеет выходов на дневную поверхность. Самое глубокое дно имеет интрузия в бассейне р. Сунтук (около -5 км). Большинство же интрузивов сосредоточены в интервале от 0 до -4 км, имеют разнообразные сложные формы и занимают значительный объем. Большое количество малых интрузивов сосредоточено на юго-западе района – в Квинум-Кувалорогской зоне. В зону входит и наиболее изученный массив Кувалорог. Интрузии этой части района в подсчет объемов не включены. Используются только данные опробования для определения реальных средних содержаний металлов в породах никеленосного комплекса.

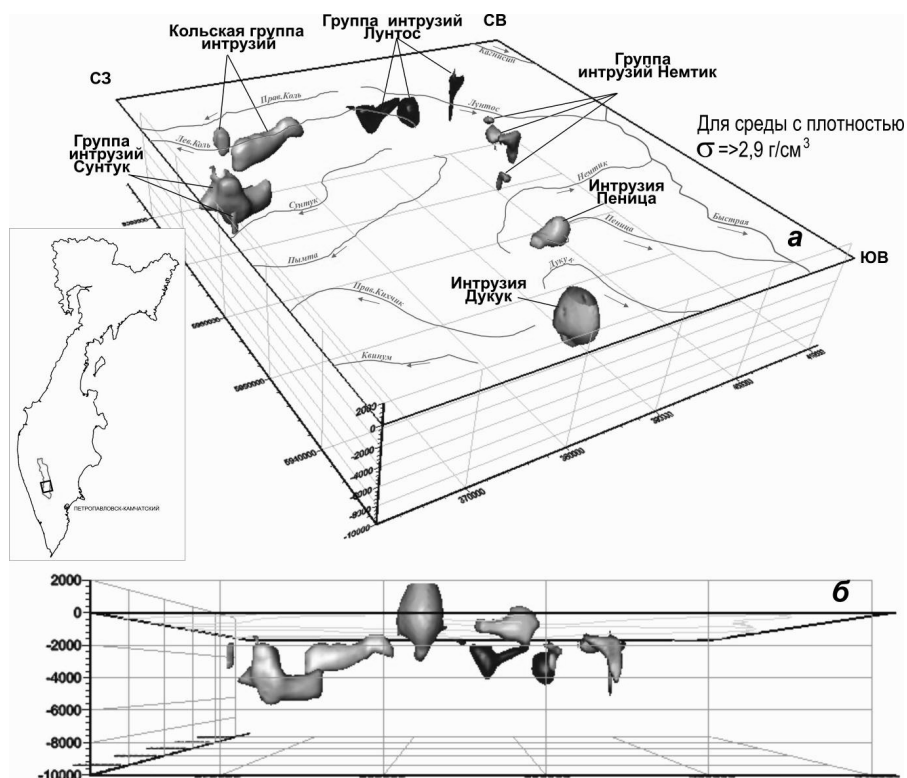


Рис. 4. Интрузии базитов на севере Дукукского рудного района, выделенные по плотностной модели в верхней части земной коры. Вид с юго-запада (а) и фронтальная проекция (б) с юга. Предполагаемые интрузии, оконтуренные по изоденсе 2,9 г/см³

Таблица 7

Дукусский район (северная часть). Теоретический ресурсный потенциал металлов

Магматическая система	Объем, куб. км	Количество металлов в интрузиях, млн. т					
		Средние содержания хим. элементов в породах по А. Б. Ронову и др. 1990 г.			Реальные средние содержания хим. элементов в породах интрузии Кувалорог		
		Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co
Кольская группа интрузий	37,38	8,67	9,76	3,25	30,45	14,2	9,11
Группа интрузий Лунтос	27,59	6,4	7,2	2,4	22,48	10,48	6,72
Группа интрузий Немтик	12,46	2,89	3,25	1,08	10,15	4,73	3,04
Интрузия Пеница	10,68	2,48	2,79	0,93	8,7	4,06	2,6
Интрузия Дукук	27,59	6,4	7,2	2,4	22,48	10,48	6,72
Группа интрузий Сунтук	44,5	10,32	11,61	3,87	36,26	16,91	10,84
ВСЕГО:	160,2	37,17	41,81	13,94	130,54	60,86	39,03

Таблица 8

Теоретический ресурсный потенциал КСМ

Участок, рудный район, узел, рудное поле	Объем интрузивных блоков, куб. км	Кларк			Реальные средние		
		Ni, млн т	Cu, млн т	Co, млн т	Ni, млн т	Cu, млн т	Co, млн т
Дукусский рудный район, северная часть (без Квинум-Кувалорогской зоны)	160,20	37,17	41,81	13,94	130,54	60,86	39,02
Колпаковский рудный район (прогнозируемый)	7,84	1,82	2,05	0,68	6,39	2,98	1,91
Шанучский рудный район	10,81	2,51	2,82	0,94	14,73	5,33	1,47
ВСЕГО:	178,85	41,49	46,68	15,56	151,66	69,17	42,41

Реальные средние содержания металлов в породах никеленосного интрузивного комплекса Дукукского района, по сравнению с кларковыми, увеличивают потенциал (в млн. т): никеля – на 93,37; меди – на 19,05; кобальта – на 25,09.

Реальные средние содержания металлов в интрузиях никеленосной провинции, по сравнению с кларковыми, увеличивают потенциал (млн. т): никеля – на 110,17; меди – на 22,49; кобальта – на 26,85.

Заключение

Низкая плотность среды срединного массива позволяет по аномалиям силы тяжести выявить внутри его массивные блоки, содержащие базитовые интрузии никеленосного комплекса. Методами количественной интерпретации геофизических данных определяются пространственное положение, форма и объем занимаемый интрузиями комплекса.

Оценка концентрации химических элементов в реальных породах дукукского магматического комплекса проведена на основе опробования и анализа пород в интрузиях Шанучского рудного поля и массива Кувалорог. Проведенные исследования показали, что продуктивность по металлам Ni, Cu и Co пород дукукского комплекса превышает в 1,5–3 раза кларковые.

Расчеты показали, что максимальный теоретический ресурсный потенциал сосредоточен на юге КНП, он на порядок выше, чем в других районах. Тем не менее, для всех районов можно сказать, что теоретическое количество металлов в породах рассмотренных интрузий достаточно для формирования крупных месторождений на доступной для поисков и разведки глубине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан. 2006. 496 с.
2. Ронов А. Б., Ярошевский А. А., Мигдисов А. А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 180 с.
3. Сидоров М. Д., Степанов В. А. Геофизические поля и никеленосность Камчатского срединного массива // Вестник КРАУНЦ, серия науки о Земле. Петропавловск-Камчатский, 2006. №2, вып. №8, С.140-150.
4. Сидоров М. Д. Геофизические критерии прогнозирования никеленосных интрузий в Камчатском срединном массиве. Чтения памяти академика К. В. Симакова: Материалы Всероссийской конференции, 25-27 ноября 2009 г., Магадан. 2009.
5. Сидоров М. Д. Плотностное моделирование магматических структур в Колпаковском перспективном никеленосном районе (срединный массив, Камчатка) // – 2015. – Тихоокеанская геология. – Том.34. – №3. – С.31-41.

6. Сидоров М. Д., Таскин В. В., Вешняков Н. А. Плотностные неоднородности в верхней коре Шанучского рудного района и проблема выявления невоскритых никеленосных интрузий (срединный массив, Камчатка) // Региональная геология и металлогения № 65/2016, с.104-115

7. Сидоров М. Д. Плотностная модель Камчатского срединного массива // Камчатка-3: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Специальный выпуск 31. 2016. № 11. с.83-87 М.: Издательство «Горная книга».

8. Сидоров М. Д. Воксельная модель плотности и прогнозирование никеленосных интрузий в Дукукском рудном районе (срединный массив, Камчатка) // Региональная геология и металлогения № 70. 2017, с. 86–97.

9. Сляднев Б. И., Шаповаленко В. Н., Крикун Н.Ф., Полетаева А. А., Роман В. К., Сидоренко В. И., Сидоров Е. Г., Суриков С. Н., Хасанов Ш. Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист N-57 Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2007. 206 с.

10. Трухин Ю. П., Степанов В. А. Сидоров М. Д. Камчатская никеленосная провинция // ДАН, Т.418, №6, 2008, с 802-805.

11. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы, 2009. №5. С.75-81

12. Трухин Ю. П., Сидоров М. Д., Степанов В. А., Кунгурова В. Е. Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 78-85. **ПЛАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Сидоров Михаил Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, smd52@mail.ru,

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, kunwe@yandex.ru,

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.

No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 121–137.

M. D. Sidorov, V. Ye. Kungurova

THE DEFINITION OF THE RESOURCE POTENTIAL OF METALS ACCORDING TO DENSITY MODELS OF INTRUSIONS

Density model with a three-dimensional view of the crustal blocks containing the intrusions of the Dukuk nickeliferous magmatic complex, including not coming to the surface was created. The form of the intrusions and the volume occupied by them were defined. To estimate the concentration of chemical elements an average content of nickel, copper, cobalt in rocks of Kuvalorog intrusion and ore-bearing intrusions of Shanuch ore field was calculated. Studies have shown that the productivity of Dukuk complex rocks is 1.5–3 times more than Clarke in

Ni, Cu and Co. The theoretical resource potential of the province, which most part is concentrated in the south of the Median massif, was determined.

Key words: density model, intrusion, isodense, nickel, province.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-121-137

AUTHORS

Sidorov M. D., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, nigtс@kscnet.ru, smd52@mail.ru,

Kungurova V. Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, kunwe@yandex.ru,

Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Lihachev A. P. *Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorojdenya* (Platinum-copper-nickel and platinum deposits). Moscow: Aslan. 2006. 496 p.
2. Ronov A. B., Jroshevsky A. A., Migdisov A. A. *Himicheskoe stroenie zemnoj kory i geohimicheskij balans glavnyh jelementov* (The chemical structure of the earth's crust and geochemical balance of major elements). Moscow. Science. 1990. 180 p.
3. Sidorov M. D., Stepanov V. A. *Geofizicheskie polya i nikelenosnost' Kamchatskogo sredinnogo massiva* (Geophysical fields and nickel content of Sredinny massif, Kamchatka). Bulletin of Kamchatka regional association»Educational-Scientific centre» Earth sciences. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2006. no 2. Vol. 8. pp.140–150.
4. Sidorov M. D. *Geofizicheskiye kriteriyi prognozirovanya nikelenosnyh intruzii v Kamchatskom sredinnom massive* (Geophysic criteria forecasting of nickeliferous intrusions in Kamchatka medium massif). In memory of academician K. V. Simakov: Materials of All-Russian conference. 25–27 November 2009. Magadan 2009.
5. Sidorov M. D. *Tihookeanskaja geologija*. 2015, vol. 34, no 3, pp. 31-41.
6. Sidorov M. D., Taskin V. V., Veshnyakov N. A. *Regional'naja geologija i metallogenija*. 2016, no 65, pp. 104–115.
7. Sidorov M. D. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* No 11, Special'nyj vypusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 83–87.
8. Sidorov M.D. *Regional'naja geologija i metallogenija*. 2017, No 70, pp. 86–97.
9. Sijadnev B. I., Shapovalenko V. N., Krikun N.F, Poletaeva A. A., Rotman V. K., Sidorov V. I., Sidorov E. G., Surikov S. N., Hasanov Sh. G. *Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj federacii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie)* (State geological map of Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation)). List N-57 Petropavlovsk-Kamchatskij. Objasnitel'naja zapiska. SPb.: Izd-vo SPb kartfabriki VSEGEI, 2007. 206 p.
10. Truhin Ju. P., Stepanov V. A. Sidorov M. D. *DAN*, T.418, no 6, 2008, pp. 802–805.
11. Truhin Ju. P., Stepanov V. A., Sidorov M.D., Kungurova V. E. *Rudy i metally*, 2009. no 5. pp. 75–81.
12. Truhin Ju. P., Sidorov M.D, Stepanov V. A., Kungurova V. E. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka*. 2009. no 6. pp. 78-85.



КРАТКИЙ ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА В ГЕОЛОГИИ

Представлен краткий литературный обзор зарубежных публикаций посвященных применению материалов дешифрирования аэро- космоснимков и цифровых моделей рельефа при решении широкого ряда геологических задач.

Ключевые слова: аэро- космоснимок, цифровая модель рельефа, дешифрирование, линеаментный анализ, месторождения полезных ископаемых, установление структурных особенностей.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-138-144

Введение

Результаты мониторинга поверхности Земли с применением летательных аппаратов в последние десятилетия широко используются в различных сферах деятельности человека, в том числе и в геологии [17, 4, 24, 13, 3, 22, 26]. Предпосылками стали повышение доступности аэро- и космоснимков, непрерывное наращивание мощности вычислительной техники, развитие новых технологических и методических подходов к обработке материалов дистанционного наблюдения, а также постоянное обновление соответствующего программного обеспечения для этого. Основное применение материалов дистанционного зондирования в геологической области заключается в линеаментном анализе космических снимков (КС), аэрофотоснимков (АФС), а также цифровых моделей рельефа (ЦМР) основанных на радарной съемке. В настоящей работе предпринята попытка провести краткий литературный обзор использования линеаментного анализа для целей геологии в зарубежной практике.

Линеаментный анализ в геологии. Идея линеаментного анализа впервые появилась в ходе исследования пространственного распределения эпицентров землетрясений, проводившегося в начале прошлого столетия Эдвардом Зюссом, однако четкого определения понятию «линеамент» дано не было [25]. Позднее, в работе [8] полученный материал был обобщен и, в результате, «линеамент» определен

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 138–144.

© В. В. Таскин, 2017.

как «четкая линия рельефа, раскрывающая структуру земной коры скрытую под осадочным слоем». Работы [25], [8] положили начало развития теоретических и практических основ линеаментного анализа. Более позднее определение, появившееся в работе [16]: «единичный или составной объект ландшафта, сегменты которого расположены линейно или слегка искривленно, отличны от соседних объектов, и предположительно отражают близповерхностную тектоническую ситуацию» принимается в настоящей работе.

В [15] отмечено, что пространственное распределение, плотность и количество пересечений линеаментов на единицу площади, установленные на КС и ЦМР, являются ключевыми факторами для выделения высокопроницаемых зон, служащих путями миграции вещества. Это мнение разделяется специалистами, занимающимися разведкой месторождений полезных ископаемых (ПИ), картированием землетрясений, наблюдением за изменением ландшафта местности и другими смежными областями исследований [5, 19, 20].

Так, обработка АФС северо-восточной части Джабалпурского пояса оруденения в Индии позволила выделить зависимость между характером распределения линеаментов и областью сульфидной минерализации [21]. Линеаментным анализом разномасштабных КС западной части Арабо-Нубийского щита была установлена связь месторождений и рудопроявлений с тектоническими и геологическими процессами [1]. Для проведения цифрового линеаментного анализа, в [18] карта линеаментной сети южной части Индии была поделена на 432 ячейки квадратной формы со стороной равной 18 км (18 по горизонтали и 24 по вертикали). Если линеамент приходился на более чем одну ячейку, он разделялся на отдельные сегменты разбивочной сеткой. Каждая ячейка, за исключением попавших на территорию водных объектов была охарактеризована следующими параметрами: общее количество сегментов, количество сегментов, совпадающих и не совпадающих по направлению, а также общее количество пересечений сегментов. Три преобладающих направления линеаментов, установленные в результате исследования позволили выделить новые структурные особенности изучаемой области.

Пространственная зависимость между линеаментами, магматическими центрами, а также месторождениями и проявлениями ПИ северо-западной части Аргентины была установлена в ходе линеаментного анализа КС совместно с данными аэромагнитной съемки и полевых геологических исследований в работе [7]. Автором показаны преимущества комбинирования геофизических и геологических ме-

тодов с анализом космических изображений на предварительных этапах исследований.

Использование линеаментного анализа также применялось при поиске и разведке месторождений подземных вод в Корее. В [10] показано, что набор карт, включающий карты распределения линеаментов, длины их самих и сегментов, а также точек пересечения является ценным инструментом при определении наилучшего распределения скважин в пространстве и их устройства.

Выделение морфотектонических структур с применением ЦМР проводилось в [9] для территорий Венгрии и северо-западной части Греции на локальном и региональном уровнях. При этом использовались: численная дифференциальная геометрия, цифровая геоморфометрия, анализ сети речного стока, цифровая обработка КС, выделение линеаментов и их анализ, пространственно-статистический анализ, а также специализированные методы цифровой обработки.

Дешифрирование цветных и черно-белых КС применялось в [23] с целью выделения, картирования и описания линеаментов преобладающих направлений, а также их ассоциации с разломными зонами в ходе изучения тектоники центральной части Эфиопского нагорья.

Существенный вклад в понимание геологической ситуации территории, прилегающей к кратерному озеру Гельчук на юго-западе Турции, сделан в [6]. Показано, что идентификация вулканических конусов, кальдер, линеаментов и определение их плотности по данным дешифрирования КС позволили установить связь между вулканизмом плиоценового возраста и областями перспективными на предмет полезных ископаемых.

В работе [2] показано, что мониторинг линеаментной динамики, может дать дополнительную информацию при предсказывании сейсмических событий традиционными методами. Так, авторами [2] были проанализированы космические снимки одной и той же территории в видимом и инфракрасном диапазонах, выполненных за 128 и 48 до, а также через 73 дня после землетрясения между территориями юга Перу и севера Чили. Установлен факт появления за 1–4 месяца до произошедшего события не фиксировавшихся ранее линеаментов, которые исчезли через 2 месяца после него.

Исследования динамики развития тектонической обстановки на региональном уровне с применением технологий автоматического дешифрирования КС и ЦМР проведено в работе [14] для северной границы Африканского нагорья.

Пример исследования тектонических дизъюнктивов с применением дешифрирования КС и ЦМР на глубину представлен в [11, 12].

Выводы

Выполненный литературный обзор показывает, что дешифрирование и дальнейший линейментный анализ КС АФС и ЦМР во многих странах мира в последние десятилетия применяется для решения широкого диапазона геологических задач: поиск и разведка месторождений полезных ископаемых, установление структурных особенностей изучаемой территории, предсказывание сейсмических событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahmed F.* Relationships of mineral deposits and lineament analysis of the Red sea region, northeastern Sudan // *Advances in Space Research.* – 1983. – № 2 – P. 71–79.

2. *Arellano-Baeza A. A., Zverev A. T., Malinnikov V. A.* Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data // *Advances in Space Research.* – 2006. – № 37 – P. 690-697.

3. *Arcasoy A., Toprak V., Kaymakçı N.* Comprehensive Strip Based Lineament Detection Method (COSBALID) from point-like features: a GIS approach // *Computers & Geosciences.* – 2004. – № 30 – P. 45-57.

4. *Bhattarai K. D.* Computer analysis of the lineaments of Nepal // *Advances in Space Research.* – 1984. – № 11 – P. 105-113.

5. *Boucher R. K.* The relevance of lineament tectonics to hydrocarbon occurrences in the Cooper and Eromanga Basins, South Australia // *Journal of Petroleum Exploration Society of Australia.* – 1995. – № 21 – P. 69-75.

6. *Cengiz O., Sener E., Yagmurlu F.* A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isparta, SW Turkey) // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2006. – № 27 – P. 155-163.

7. *Chernicoff C. J., Richards J. P., Zappettini E. O.* Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence // *Ore Geology Reviews.* – 2002. – № 21 – P. 127-155.

8. *Hobbs W. H.* Lineaments of the Atlantic border region // *Geological Society of America Bulletin.* – 1904. – № 15 – P. 483-506.

9. *Jordan G., Meijninger B. M.L., van Hinsbergen D. J.J., Meulenkamp J. E., van Dijk P. M.* Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* – 2005. – № 7 – P. 163-182.

10. *Kim G. B., Lee J. Y., Lee K. K.* Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue™ scripts // *Computers & Geosciences.* – 2004. – № 30 – P. 1117-1126.

11. *Koike K., Nagano S., Ohmi M.* Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm (STA) // *Computers & Geosciences.* – 1995. – № 21 – P. 1091-1104.

12. Koike K., Nagano S., Kawaba K. Construction and analysis of interpreted fracture planes through combination of satellite-image derived lineaments and digital elevation model data // *Computers & Geosciences*. – 1998. – № 24 – P. 573-583.
13. Mulders M. A. Advances in the application of remote sensing and for surveying mountainous land // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2001. – № 1 – P. 3-10.
14. Masoud A. A., Koike K. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt // *Journal of African Earth Sciences*. – 2006. – № 45 – P. 467-477.
15. Masoud A. A., Koike K. Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2011. – № 65 – P. 457-467.
16. O'Leary D. W., Friedman J. D., Pohn H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms // *Geological Society of America Bulletin*. – 1976. – № 87 – P. 1463-1469.
17. Qureshy M. N. Geophysical and Landsat lineament mapping – an approach illustrated from west-central and South India // *Photogrammetria*. – 1982. – № 37 – P. 161-184.
18. Reddy R.K. T. Digital analysis of lineaments – a test study on South India // *Computers & Geosciences*. – 1990. – № 4 – P. 549-559.
19. Rowan L. C., Bowers T. L. Analysis of linear features mapped in Landsat thematic mapper and side-looking airborne radar images of the Reno 1 degree by 2 degree Quadrangles, Nevada and California; implications for mineral resource studies // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 1995. – № 61 – P. 749-759.
20. Rowland J. V., Sibson R. H. Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // *Geofluids*. – 2004. – № 4 – P. 259-283.
21. Roy A. Significance of fold and lineament patterns in sulphide mineralization in the northeastern part of the Jabalpur (India) mineralized belt – a photo-geological interpretation // *Photogrammetria*. – 1975. – № 31 – P. 53-64.
22. Smith M. J. Wise S. M. Problems of bias in mapping linear landforms from satellite imagery // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2007. – № 9 – P. 65-78.
23. Solomon S., Ghebreab W. Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea // *Journal of African Earth Sciences*. – 2006. – № 46 – P. 371-378.
24. Song G. S., Ma C. P., Yu H. S. Fault-controlled genesis of the Chilung Sea Valley (northern Taiwan) revealed by topographic lineaments // *Marine Geology*. – 2000. – № 169 – P. 305-325.
25. Suess E. *The face of the Earth*. – Oxford, 1904. – 604 p.
26. van der Meer F., van der Werff H., van Ruitenbeek F., Hecker C. A., Bakker W. H., Noomen M. F., van der Meijde M., Carranza E., de Smeth J., Woldai T. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: a review // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2012. – № 14 – P. 112-128. **IAAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Таскин Виталий Витальевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, taskin-v@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 138–144.

V. V. Taskin

SHORT OVERVIEW OF FOREIGN EXPERIENCE OF LINEAMENT ANALYSIS EXPLOITATION IN A SPHERE OF GEOLOGY

Short literature overview of foreign papers dedicated to interpretation of aerial, space images and exploitation of digital elevation models data to solve a wide range of geological problems has been shown in the present study.

Key words: aerial image, space image, digital elevation model, interpretation, lineament analysis, mineral deposits, structure features allocation.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-138-144

AUTHOR

Taskin V. V., Candidate of Technical Sciences; Senior Researcher Scientist, taskin-v@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Ahmed F. *Relationships of mineral deposits and lineament analysis of the Red sea region, northeastern Sudan*. Advances in Space Research. 1983. no 2 pp. 71–79.
2. Arellano-Baeza A. A., Zverev A. T., Malinnikov V. A. *Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data*. Advances in Space Research. 2006. no 37, pp. 690-697.
3. Arcasoy A., Toprak V., Kaymakçı N. *Comprehensive Strip Based Lineament Detection Method (COSBALID) from point-like features: a GIS approach*. Computers & Geosciences. 2004. no 30. pp. 45–57.
4. Bhattarai K. D. *Computer analysis of the lineaments of Nepal*. Advances in Space Research. 1984. no 11. pp. 105–113.
5. Boucher R. K. *The relevance of lineament tectonics to hydrocarbon occurrences in the Cooper and Eromanga Basins, South Australia*. Journal of Petroleum Exploration Society of Australia. 1995. no 21. pp. 69–75.
6. Cengiz O., Sener E., Yagmurlu F. *A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isparta, SW Turkey)*. Journal of Asian Earth Sciences. 2006. no 27. pp. 155–163.
7. Chernicoff C. J., Richards J. P., Zappettini E. O. *Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence*. Ore Geology Reviews. 2002. no 21. pp. 127–155.

8. Hobbs W. H. *Lineaments of the Atlantic border region*. Geological Society of America Bulletin. 1904. no 15. pp. 483-506.
9. Jordan G., Meijninger B. M.L., van Hinsbergen D. J.J., Meulenkamp J. E., van Dijk P. M. *Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2005. no 7. pp. 163-182.
10. Kim G. B., Lee J. Y., Lee K. K. *Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue™ scripts*. Computers & Geosciences. 2004. no 30. pp. 1117-1126.
11. Koike K., Nagano S., Ohmi M. *Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm (STA)*. Computers & Geosciences. 1995. no 21. pp. 1091-1104.
12. Koike K., Nagano S., Kawaba K. *Construction and analysis of interpreted fracture planes through combination of satellite-image derived lineaments and digital elevation model data*. Computers & Geosciences. 1998. no 24 pp. 573-583.
13. Mulders M. A. *Advances in the application of remote sensing and for surveying mountainous land*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2001. no 1 pp. 3-10.
14. Masoud A. A., Koike K. *Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt*. Journal of African Earth Sciences. 2006. no 45 pp. 467-477.
15. Masoud A. A., Koike K. *Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data*. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. no 65 pp. 457-467.
16. O'Leary D. W., Friedman J. D., Pohn H. A. *Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms*. Geological Society of America Bulletin. 1976. no 87 pp. 1463-1469.
17. Qureshy M. N. *Geophysical and Landsat lineament mapping – an approach illustrated from west-central and South India*. Photogrammetria. 1982. no 37 pp. 161-184.
18. Reddy R.K. T. *Digital analysis of lineaments – a test study on South India*. Computers & Geosciences. 1990. no 4 pp. 549-559.
19. Rowan L. C., Bowers T. L. *Analysis of linear features mapped in Landsat thematic mapper and side-looking airborne radar images of the Reno 1 degree by 2 degree Quadrangles, Nevada and California; implications for mineral resource studies*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1995. no 61 pp. 749-759.
20. Rowland J. V., Sibson R. H. *Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand*. Geofluids. 2004. no 4 pp. 259-283.
21. Roy A. *Significance of fold and lineament patterns in sulphide mineralization in the northeastern part of the Jabalpur (India) mineralized belt – a photogeological interpretation*. Photogrammetria. 1975. no 31 pp. 53-64.
22. Smith M. J. Wise S. M. *Problems of bias in mapping linear landforms from satellite imagery*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2007. no 9 pp. 65-78.
23. Solomon S., Ghebream W. *Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea*. Journal of African Earth Sciences. 2006. no 46 pp. 371-378.
24. Song G. S., Ma C. P., Yu H. S. *Fault-controlled genesis of the Chilung Sea Valley (northern Taiwan) revealed by topographic lineaments*. Marine Geology. 2000. no 169 pp. 305-325.
25. Suess E. *The face of the Earth*. Oxford, 1904. 604 p.
26. van der Meer F., van der Werff H., van Ruitenbeek F., Hecker C. A., Bakker W. H., Noomen M. F., van der Meijde M., Carranza E., de Smeth J., Woldai T. *Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: a review*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2012. no 14 pp. 112-128.

М. Д. Сидоров

НАХОЖДЕНИЕ ФОРМЫ И ОБЪЕМА НИКЕЛЕНОСНЫХ ИНТРУЗИЙ ПО ПЛОТНОСТНЫМ МОДЕЛЯМ

Для Камчатской никеленосной провинции создана плотностная модель с объемным изображением блоков земной коры, содержащих интрузии базитов никеленосного комплекса, в том числе не выходящих на дневную поверхность. Определена форма крупных интрузий, местоположение и занимаемый ими объем. Интрузии могут служить рудогенерирующими системами в самой верхней части земной коры.

Ключевые слова: плотность, модель, интрузия, изоденса, никель, провинция.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-145-156

Введение

В южной части Срединного хребта Камчатки находится Камчатская никеленосная провинция (КНП) [9]. Пространственно провинция соответствует структуре срединного массива, расположенного в этой части полуострова. Срединный массив известен в опубликованных работах как Срединный Камчатский массив, Срединный Камчатский выступ или Центрально-Камчатский кристаллический массив. Источником никеля являются магмы, из которых образовались интрузии мелэоценового дукукского габбро-норит-кортландитового плутонического комплекса, развитого в пределах массива. Рудные тела, представляющие промышленный интерес, приурочены к небольшим интрузиями — апофизам крупных массивов в их надинтрузивной зоне. Примером такого сульфидного медно-никелевого оруденения является месторождение Шануч, относящееся к типу регенерированных месторождений, сформированных в процессе магматического и гидротермального переотложения рудного вещества [1, 10], которое выделилось в промежуточных магматических камерах и каналах-проводниках. В провинции выделяется два рудных района: Шанучский на севере и Дукукский на юге [9]. Кроме того, исследования петрофизических свойств и анализ региональных геологических и геофизических съемок на территории массива позволил прогнозировать потенциально никеленосный район в его центральной части – бассейне р. Колпакова [2, 3]. Были

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 145–156.

© М. Д. Сидоров, 2017.

установлены геофизические критерии выявления незродированных интрузий комплекса, что в свою очередь позволило выделить участки, где возможно наличие рудогенерирующих магматических систем подобных месторождению Шануч (рис. 1). В КНП интрузии никеленосного комплекса представлены двумя типами массивов. Один тип – крупные тела площадью до 20–30 км², мощностью более 1 км (Кувалорог, Дукук, Пеницкий). Другой тип интрузивных тел это небольшие штоки, дайки и пластовые тела амфиболовых габбро, пироксенитов, перидотитов, горнблендитов, кортландитов, диоритов мощностью от нескольких до 200 м и протяженностью до 1200 м [8]. Малые интрузии являются апофизами или проводниками между крупными массивами [10]. На севере провинции обнажены только малые интрузии, а на юге известны интрузивы обоих типов.

Для определения пространственного положения блоков, содержащих интрузии, их формы и объема проведена интерпретация аномалий силы тяжести, создана воксельная 3D модель плотности срединного массива.

Исходные данные и методика определения объемов. Породы никеленосного магматического комплекса обладают повышенной плотностью по отношению к вмещающей среде в верхней части земной коры. Форму интрузий и занимаемый ими объем можно определить, если построить замкнутую поверхность, внутри которой плотность геологической среды будет превышать 2,9 г/см³. Такая и большая плотность соответствует породам базит-ультрабазитового ряда. Для этой цели применима методика плотностного моделирования с объемным изображением результатов в виде модели, состоящей из совокупности кубических ячеек определенной плотности.

Создание такой модели состоит из двух этапов. На начальном этапе рассчитываются теоретические глубинные геолого-геофизические разрезы в 2D или 3/4D варианте, пересекающие исследуемый участок коры. В плоскости разрезов определяется плотность в пересекаемых блоках геологических тел. Для моделирования на этой стадии используются геологические карты, стратиграфическая колонка, данные сейсморазведки (если имеются), результаты количественной интерпретации геофизических аномалий, данные бурения скважин и иная априорная информация о строении района.

На следующем этапе из отдельных разрезов синтезируется база данных плотности (БДП), содержащая плановые координаты X, Y, Z точек на глубинных разрезах и подобранную в них модельную плотность D. Точки на разрезах расположены в узлах квадратной сетки. Шаг выбирается в зависимости от детальности (масштаба) подобранных разрезов и может изменяться от десятков до сотен метров.

БДП служит исходным материалом для вычисления 3-х мерной матрицы плотности, для интерполяции изоплотностных поверхностей по заданной величине и вычисления объема. Размер элементарной ячейки воксельного изображения различен для разных участков (групп аномалий) и зависит от густоты сети разрезов. Так, для аномалий в Шанучском районе размер изменялся от 2 до 0,8 км, в Колпаковском – 2 и 0,5 км, в северной части Дукукского района – 2, 1 и 0,5 км.

Подробно методика и анализ плотностных моделей по районам КНП были изложены в публикациях [4, 5, 7]. Примеры подобранного глубинного разреза и воксельной модели плотности приведены на рис. 2 и 3.

Определение формы и объема интрузий никеленосного комплекса. Вычисление объема магмы, из которой сформированы интрузии, проведено по плотностным моделям, составленным для наиболее перспективных аномалий в каждом из рудных районов провинции (кроме аномалий Квинум-Кувалорогской зоны). Интерпретация проведена с помощью программ Geosoft (Oasis Montaj, GM-SYS, Euler 3D). Воксельная 3D-модель составлена до глубины 10 км, так как в этом слое на фоне геосреды срединного массива хорошо выражены плотные блоки с базитовыми интрузиями [6]. Форма блоков с интрузиями характеризуется морфологией изоповерхности $2,9 \text{ г/см}^3$. Внутри эти блоки состоят преимущественно из габбро и норитов а также в незначительном количестве из основных ультрамафитов с плотностью $3,0$ и более г/см^3 . Кроме того, известно, что внутри крупных массивов содержится большое количество ксенолитов вмещающих пород, даек и небольших штоков других более поздних магматических комплексов. Все это уменьшает объем, занятый дукукской магмой. Оценить величину, на которую нужно уменьшить объем блоков, можно по данным бурения глубоких скважин в массиве Кувалорог. Эта интрузия наиболее изучена как с поверхности, так и на глубину. В бассейне ручья Медвежий пробурено несколько вертикальных скважин глубиной от 500 до 900 м. Анализ разрезов этих скважин показал, что около 11 % разреза не принадлежит базитам дукукского комплекса. Так, в наиболее глубокой скважине № 3 из 900 м разреза 135 м слагают сланцы и андезиты, что составляет 15 % от общей мощности. В скважине № 2 из 700 м разреза не принадлежат дукукскому комплексу пород 90 м (13 %), в скважине № 5 эти цифры составляют 502 и 25 (5 %) м соответственно. В обнаженной части интрузии также встречаются участки, занятые иными породами (ксенолиты сланцев, метаалевролитов, окварцованных пород и др.). Понижающий коэффициент в 11 % применен в расчетах ко всем крупным, в т.ч. неэродированным прогнозируемым интрузивам провинции.

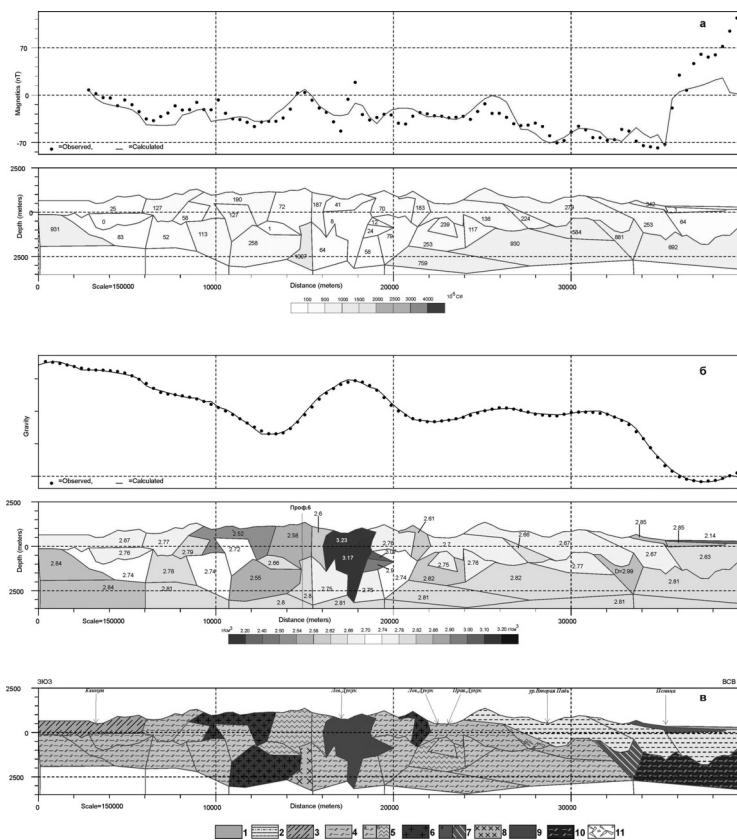


Рис. 2. Профиль р.Квинум–р.Дукук–р.Пеница–р.Быстрая. Магнитная (а), плотностная (б) и геологическая (в) модели: 1 – рыхлые четвертичные отложения; 2 – терригенные отложения хозгонской свиты: алевролиты, песчаники; 3 – хейванская свита: метаалевролиты, метапесчаники, кварц-серицитовые сланцы; 4 – камчатская метаморфическая серия, преимущественно кристаллические сланцы; 5 – колпаковская метаморфическая серия, преимущественно кристаллические сланцы (а), преимущественно гнейсы (б); 6 – кольский комплекс плагиигранит-гранодиоритовый. Интрузии сложного состава граниты, диориты, гранодиориты; 7 – алисторский комплекс пикрит-базальтовый покровные (а) субвулканические (б) образования; 8–9 – дукукский? плутонический комплекс габбро-норит-кортландитовый. Интрузии сложного состава преимущественно диориты (8), преимущественно габбро (9); 10 – ганальская зона, стеновая серия? Преимущественно кристаллические сланцы; 11 – зоны интенсивного дробления пород. Сплошными линиями показаны графики теоретических аномалий: красной магнитного (ΔT), черной Δg , точками – графики наблюдаемых аномалий. Цифрами на моделях показаны расчетная величина магнитной восприимчивости в 10^{-5} СИ и плотность блоков в $г/см^3$

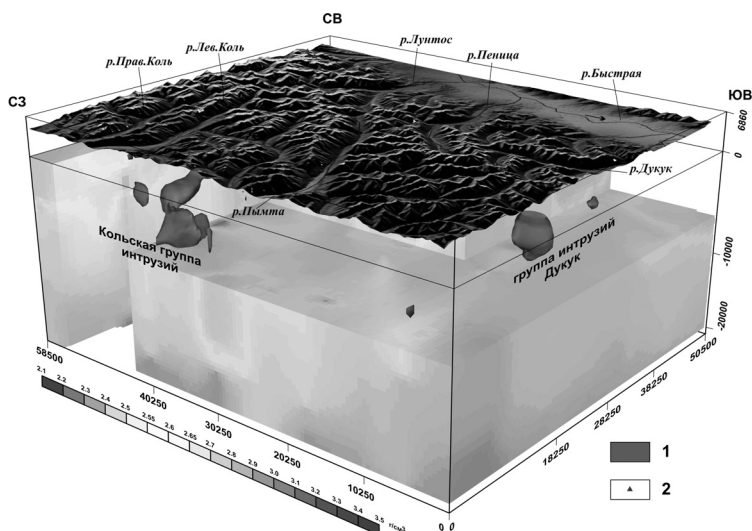


Рис. 3. Воксельная (объемная) плотностная модель земной коры северной части Дукукского рудного района, вид с юго-запада. Часть ячеек погашена, чтобы показать изоповерхности, масштаб рельефа увеличен в два раза и его поверхность поднята на 3 км: 1 – изоповерхность с плотностью 2,9 г/см³; 2 – проявления и пункты минерализации никеля

Крупные интрузии в Шанучском районе не имеют выходов на дневную поверхность. Обнажены только небольшие интрузивные тела. Верхние кромки крупных интрузивов залегают на глубине от 0 до 6 км. Наиболее глубоко (5,5–6,5 км) расположена интрузия аномалии 3 (руч.Рыбный). Гипсометрически выше всех расположен интрузив под г. Верхняя Тхонжа, с которым связано формирование рудно-магматической системы месторождения Шануч и рудопроявлений одноименного рудного поля. Форма интрузий руч. Рыбный и г. В. Тхонжа сферическая, в бассейнах рек Химка и Облуковина в виде вертикальных эллипсоидов.

Всего суммарный объем незродированных интрузийникеленосного комплекса в районе составляет 10,81 куб.км.

Таблица 1

Объем интрузивных блоков в Шанучском рудном районе

Объем магматической системы, куб. км			
Шанучское рудное поле. Аномалии №7,8	р. Облуковина. Аномалия №2	Верхнее течение р. Химка. Аномалия №1	Руч. Рыбный. Аномалия №3
1,11	1,65	4,13	3,91

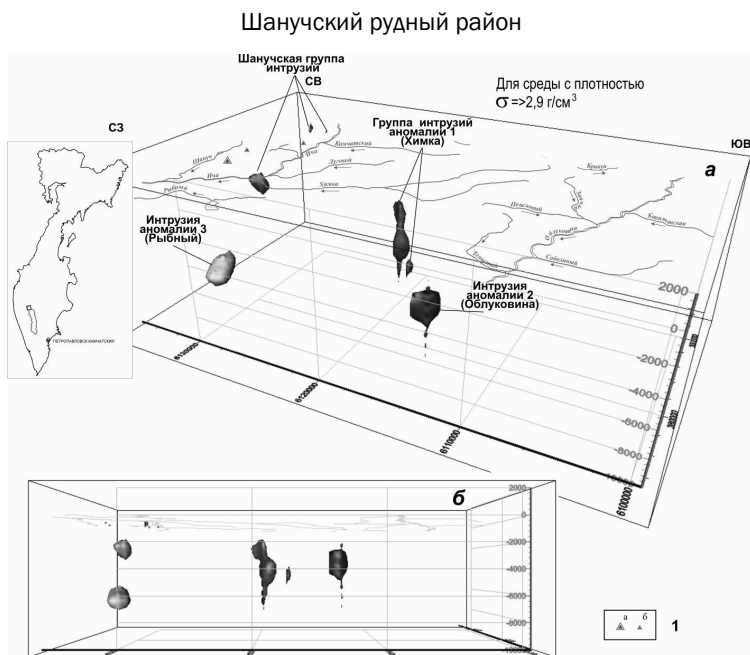


Рис. 4. Интрузии базитов в Шанучском рудном районе, выделенные по плотностной модели в верхней части земной коры. Вид с юго-запада (а) и фронтальная проекция (б) с юга. Предполагаемые интрузии оконтуренные по изоденсе $2,9 \text{ г/см}^3$: 1 – месторождение (а) и рудопроявления (б) никеля

Колпаковский прогнозируемый рудный район

В Колпаковском районе нет обнажений интрузий никеленосного комплекса, но есть прямые и косвенные признаки наличия интрузивов на относительно небольших глубинах. Интерпретация перспективных аномалий силы тяжести показывает, что донные части предполагаемых интрузий находятся на глубине не более -4 км , а их верхние кромки залегают на уровне моря и выше, приближаясь к дневной поверхности. В этих местах и наблюдаются прямые признаки никеленосности [4]. Форма интрузий сферическая (аномалии №№11,13,14) и эллипсоидная (№№10, 6), вытянутая в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Таблица 2

Объем интрузивных блоков в Колпаковском рудном районе

Объем магматической системы, куб. км				
Аномалия №6	Аномалия №12	Аномалии №13, 14	Аномалия №10	Аномалия №11
4,30	1,31	0,89	1,12	0,22

Всего суммарный объем неэродированных дукукских интрузий в Колпаковском районе составляет 7,84 куб.км

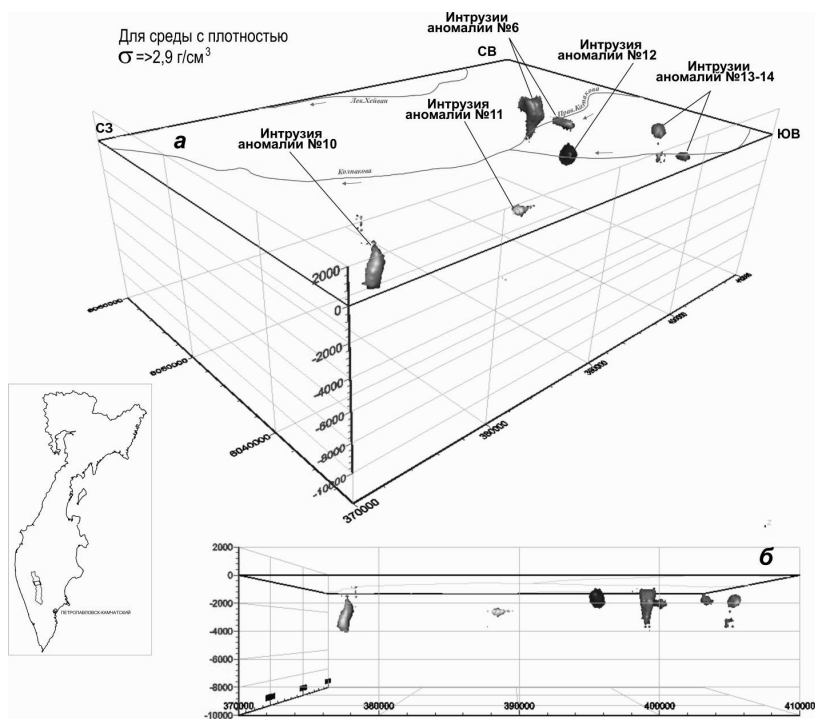


Рис. 5. Интрузии базитов в Колпаковском прогнозируемом рудном районе, выделенные по плотностной модели в верхней части земной коры. Вид с юго-запада (а) и фронтальная проекция (б) с юга. Предполагаемые интрузии, оконтуренные по изоденсе 2,9 г/см³

Дукукский рудный район (северная часть)

Наиболее крупные интрузии находятся в Дукукском рудном районе. Часть из них обнажается (Дукукский, Кувалорогский, Пеницкий массивы), но значительная по массе часть не имеет выходов на дневную поверхность. Самое глубокое дно в интрузии в бассейне р. Сунтук расположено на глубине около 5 км ниже уровня моря. Большинство же интрузивов сосредоточены в интервале от 0 до -4 км, имеют разнообразные сложные формы и занимают значительный объем. Большое количество малых интрузивов сосредоточено на юго-западе района – в Квинум-Кувалорогской зоне. В зону входит и наиболее изученный массив Кувалорог. Интрузии этой части района в подсчет объемов не включены.

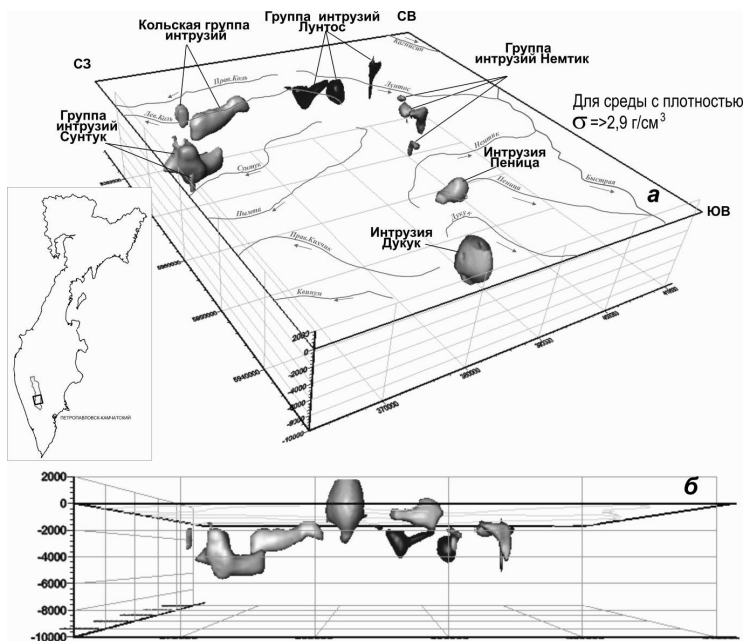


Рис. 6. Интрузии базитов на севере Дукукского рудного района, выделенные по плотностной модели в верхней части земной коры. Вид с юго-запада (а) и фронтальная проекция (б) с юга. Предполагаемые интрузии, оконтуренные по изоденсе 2,9 г/см³

Таблица 3

Объем интрузивных блоков в северной части Дукукского рудного района

Объем магматической системы, куб. км					
Кольская группа интрузий, Аномалия №15	Группа интрузий Лунтос, Аномалия №16	Группа интрузий Немтик, Аномалия №17	Интрузия Пеница, Аномалия №18	Интрузия Дукук, Аномалия №19	Группа интрузий Сунтук, Аномалия №20
37,38	27,59	12,46	10,68	27,59	44,5

Таблица 4

Объем интрузивных блоков в КСМ (без Квинум-Кувалорогской зоны)

Участок, рудный район, узел, рудное поле	Объем интрузивных блоков, куб. км
Дукукский рудный район, северная часть (без Квинум-Кувалорогской зоны)	160,20
Колпаковский рудный район (прогнозируемый)	7,84
Шанучский рудный район	10,81
ВСЕГО:	178,85

Всего объем интрузий никеленосного комплекса в северной части Дукукского района составляет 160,2 куб.км, в том числе не выходящих на поверхность 121,93 куб.км.

Заключение

Низкая плотность среды срединного массива позволяет по аномалиям силы тяжести выявить внутри его массивные блоки, содержащие массивные базитовые интрузии никеленосного комплекса. Методами количественной интерпретации геофизических данных определяются пространственное положение, форма и объем занимаемый интрузиями комплекса. Интрузии могут служить рудогенерирующими системами, а в над- и около интрузивных участках формироваться промышленные месторождения Шанучского типа.

Расчеты показали, что наиболее крупные интрузии сосредоточены на юге КНП, их объем на порядок больше, чем в других районах провинции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан. 2006. 496 с.

2. Сидоров М. Д., Степанов В. А. Геофизические поля и никеленосность Камчатского срединного массива // Вестник КРАУНЦ, серия науки о Земле. Петропавловск-Камчатский, 2006. №2, вып. №8, С.140-150.

3. Сидоров М. Д. Геофизические критерии прогнозирования никеленосных интрузий в Камчатском срединном массиве. Чтения памяти академика К. В. Симакова: Материалы Всероссийской конференции, 25-27 ноября 2009 г., Магадан. 2009.

4. Сидоров М. Д. Плотностное моделирование магматических структур в Колпаковском перспективном никеленосном районе (срединный массив, Камчатка) // 2015. – Тихоокеанская геология. – Том.34. – №3. – С.31-41

5. Сидоров М. Д., Таскин В.В., Вешняков Н. А. Плотностные неоднородности в верхней коре Шанучского рудного района и проблема выявления невоскрытых никеленосных интрузий (срединный массив, Камчатка) // Региональная геология и металлогения № 65/2016, с.104-115

6. Сидоров М. Д. Плотностная модель Камчатского срединного массива // Камчатка-3: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Специальный выпуск 31. 2016. № 11. с.83-87 М.: Издательство «Горная книга».

7. Сидоров М. Д. Воксельная модель плотности и прогнозирование никеленосных интрузий в Дукукском рудном районе (срединный массив, Камчатка) // Региональная геология и металлогения № 70/2017, с.86-97.

8. Сляднев Б. И., Шаповаленко В. Н., Крикун Н.Ф., Полетаева А. А., Ротман В. К., Сидоренко В. И., Сидоров Е. Г., Суриков С. Н., Хасанов Ш. Г. Государст-

венная геологическая карта Российской федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист N-57 Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2007. 206 с.

9. Трухин Ю. П., Степанов В. А. Сидоров М. Д. Камчатская никеленосная провинция // ДАН, Т.418, №6, 2008, с 802-805.

10. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы, 2009. №5. С.75-81. **ИЗДАНИЕ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Сидоров Михаил Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, smd52@mail.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 145–156.

M. D. Sidorov

THE DEFINITION OF THE RESOURCE POTENTIAL OF METALS ACCORDING TO DENSITY MODELS OF INTRUSIONS

For the Kamchatka Nickel province created density model a three-dimensional view of the crustal blocks containing intrusions of basic rocks Nickel complex, including not coming to the surface. Define the form of large intrusions, the location, and they occupy volume. Intrusions can serve redenerative systems in the uppermost part of the crust.

Key words: density model, intrusion, isodense, nickel, province.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-145-156

AUTHORS

Sidorov M. D., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Lihachev A. P. *Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorojdenya* (Platinum-copper-nickel and platinum deposits). Moscow: Aslan. 2006. 496 p.

2. Sidorov M. D., Stepanov V. A. *Geofizicheskie polya i nikelenosnost' Kamchatskogo sredinnogo massiva* (Geophysical fields and nickel content of Sredinny massif, Kamchatka). Bulletin of Kamchatka regional association»Educational-Scientific centre» Earth sciences. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2006. no 2. Vol. 8. pp.140-150.

3. Sidorov M. D. *Geofizicheskiye kriteriyi prognozirovanya nikelenosnyh intruzii v Kamchatskom sredinnom massive* (Geophysic criteria forecasting of nickeliferous intrusions in Kamchatka medium massif). In memory of academician K. V. Simakov: Materials of All-Russian conference. 25-27 November 2009. Magadan 2009.
4. Sidorov M. D. *Tihookeanskaja geologija*. 2015, vol. 34, no 3, pp. 31-41.
5. Sidorov M. D., Taskin V. V., Veshnyakov N. A. *Regional'naja geologija i metallogenija*. 2016, no 65, pp. 104-115.
6. Sidorov M. D. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten'* No 11, Special'nyj vypusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 83–87.
7. Sidorov M.D. *Regional'naja geologija i metallogenija*. 2017, no 70, pp.86-97
8. Sljadnev B. I., Shapovalenko V. N., Krikun N.F, Poletaeva A. A., Rotman V. K., Sidorenko V. I., Sidorov E. G., Surikov S. N., Hasanov Sh. G. *Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj federacii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie)* (State geological map of Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation)). List N-57 Petropavlovsk-Kamchatskij. Objasnitel'naja zapiska. Saint Petersburg: Izd-vo SPb kartfabriki VSEGEI, 2007. 206 p.
9. Truhin Ju. P., Stepanov V. A. Sidorov M. D. *DAN*, T.418, no6, 2008, pp. 802-805.
10. Truhin Ju. P., Stepanov V. A., Sidorov M.D., Kungurova V. E. *Rudy i metally*, 2009. no 5 pp.75-81.



СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАМЧАТСКОЙ И СТАНОВОЙ НИКЕЛЕНОСНЫХ ПРОВИНЦИЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Дана сравнительная характеристика геологического строения и рудоносности Камчатской и Становой никеленосных провинций. Приведено описание платиноидно-медно-никелевых месторождений Шануч, Кун-Манье и ряда рудопроявлений. Определен изотопный возраст медно-никелевого оруденения.

Ключевые слова: провинция, никель, медь, платиноиды, месторождение, изотопный возраст.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-157-167

В пределах Дальнего Востока России известны две сравнительно мало изученные никеленосные провинции – Камчатская и Становая. В них расположены сульфидные платиносодержащие медно-никелевые месторождения Шануч, Кун-Манье и ряд перспективных рудопроявлений. Сравнительная характеристика провинций поможет не только поискам в их пределах новых медно-никелевых месторождений, но и прогнозной оценке потенциала никеля, меди и платиноидов этого региона.

Камчатская никеленосная провинция

Камчатская никеленосная провинция принадлежит к Камчатскому срединному массиву (КСМ). Камчатский срединный массив, площадью около 15 тыс. кв. км и вытянутый в меридиональном направлении, располагается в южной части Камчатского полуострова. Он является тектонотипом срединных массивов островодужных систем Востока Азии [9]. Наиболее древние метаморфические образования колпаковской и камчатской серий позднепротерозойского возраста приурочены к центральной части массива, а перекрывающие их терригенные и сланцевые толщи хейванской, андриановской и химкинской свит раннего и позднего мела – к его южной, северной и западной окраинам. Стратифицированные образования прорваны интрузиями гранитоидов преимущественно мелового возраста, развитыми главным образом в центральной, осевой части КСМ. На пе-

риферии массива, наряду с ними расположены многочисленные небольшие интрузии, дайки и силлы роговообманковых базитов и гипербазитов дукукского комплекса палеоцен-эоценового возраста. Они содержат сульфидное медно-никелевое оруденение.

Для КСМ характерно плавное слабо отрицательное или близкое к нулевому магнитное поле, что обусловлено преобладанием в его составе немагнитных пород. На этом фоне контрастными локальными положительными аномалиями (1000—3000 нТл) отмечаются интрузии среднего, основного и ультраосновного состава, а также эффузивы и пирокластические отложения вулкана Хангар. Породы никеленосных интрузий дукукского габбро-кортландитового комплекса слабо магнитны, заметных аномальных эффектов не создают, в силу чего не находят четкого отражения в аномальном магнитном поле [4].

В пределах Камчатской провинции проявлено, главным образом, сульфидное медно-никелевое оруденение (месторождение Шануч, рудопроявления Геофизическое, Квинум, Дукук, Тундровое, Олень и многие другие), в меньшей степени золотое, золото-серебряное и медно-порфировое.

Сульфидное медно-никелевое оруденение провинции одноактное и приурочено к интрузиям дукукского габбро-кортландитового комплекса эоценового возраста. По составу интрузии отвечают выделенной С. С. Зиминим формации роговообманковых базитов [2]. В пределах провинции выделены три рудных района с медно-никелевым оруденением – Шанучский, Дукукский и потенциально никеленосный Колпаковский. Они приурочены, соответственно, к северной, южной и западной окраинам КСМ. В геолого-структурном плане рудным районам отвечают относительно опущенные блоки массива, выполненные терригенными углеродсодержащими толщами, прорванными многочисленными интрузиями никеленосного дукукского комплекса. Рудные районы имеют изометричные очертания, что характерно для рудных районов срединных массивов.

В пределах провинции наиболее изучено Шанучское месторождение, находящееся в одноименном рудном районе. Площадь месторождения сложена кристаллическими сланцами и гнейсами камчатской серии. На флангах месторождения они перекрыты метатерригенными образованиями хейванской свиты. Метаморфические толщи прорваны интрузиями дорудного кругогоровского комплекса гнейсовидных плагиогранитов и гнейсогранитов, а также пострудными интрузиями кольского гранит-плагиогранитного комплекса. Никеленосными являются малые интрузии, дайки и силлы амфиболовых, биотит-амфиболовых меладiorитов, габбро, пироксенитов, горблен-

дитов и кортландитов дукукского комплекса. На месторождении наблюдается серия сближенных интрузий, вытянутых в субширотном направлении. Мощность отдельных интрузий – от первых метров до 150–200 м. Падение их преимущественно в южных румбах под углами 45–70°, нередко встречаются участки вертикального или крутого наклона на север.

Месторождение Шануч представлено пучком субвертикально ориентированных рудных тел, сопряженных с небольшими интрузиями неправильной формы и дайками дукукского комплекса, размещение которых контролируется разрывными нарушениями. Наблюдается сложная жилообразная, штокообразная и линзовидная форма рудных тел, сложенных сульфидными медно-никелевыми рудами. Контуры рудных тел определяются по данным опробования. Наиболее изученным является рудное тело 1. В плане оно имеет сложную, серповидную форму, размером 120x50 м. Оно прослежено на глубину около 320 м. В вертикальном разрезе рудное тело линзовидное, с расширением в центральной части. В состав рудных минералов входят, главным образом, пирротин, пентландит и халькопирит. Руды характеризуются высокими содержаниями никеля (первые проценты), меди и кобальта (десятые доли процента). Содержания золота, палладия и платины достигают 0,1 г/т.

В пределах рудного тела 1 месторождения выделены следующие типы руд: массивные, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные и вкрапленные. Массивные руды состоят на 75–95 % из сульфидов, из которых главными являются пирротин, пентландит и халькопирит. Они содержат обломки вмещающих пород (меладiorиты, амфиболовые габбро, пироксениты, гнейсовидные граниты, кристаллические сланцы) удлиненной или изометричной формы. Текстура руд массивная, структура – аллотриоморфнозернистая или распада твердого раствора.

Брекчиевидные руды состоят из обломков вмещающих пород, сцементированных сульфидным материалом. Текстура руд брекчиевая, брекчиевидная, реже пятнистая. Структура аллотриоморфнозернистая, сидеронитовая, реже гипидиоморфнозернистая. Содержание сульфидных минералов достигает 40–80 %.

Прожилково-вкрапленные руды объединяют руды с прожилковыми, прожилково-вкрапленными и вкрапленно-прожилковыми текстурами. Структура руд аллотриоморфнозернистая, интерстициальная, петьельчатая. Они содержат 10 – 30 % сульфидов.

Вкрапленные руды содержат наименьшее количество сульфидов – 3–10 %. Они состоят из меладiorитов, габбро, кортландитов с вкрапленностью сульфидных минералов. Текстура руд вкрапленная, реже

прожилково-вкрапленная; структура аллотриоморфнозернистая, интестициальная.

Наблюдается зональное размещение отдельных типов руд как в поперечном разрезе рудного тела, так и по вертикали. Центральная часть рудного тела 1 обычно выполнена массивными рудами, образующими одиночные или сближенные жилы, мощностью от 0.2 до 3.0 м. Жилы окружены зонами брекчиевидных, либо прожилково-вкрапленных руд, мощностью от 0.2 до 6.9 м. В периферической части рудного тела располагаются вкрапленные руды.

Среднее содержание полезных компонентов по рудному телу 1 составляет (в %): никель – 5.41, медь – 0.85, кобальт – 0.13, благородных металлов (в г/т): золото – 0.24, палладий – 0.40, платина – 0.13. Выявлена наиболее тесная корреляционная связь между содержаниями никеля и кобальта, несколько менее тесная между содержаниями никеля и меди, а также между медью и кобальтом. Отмечается также устойчивая корреляционная связь палладия и золота с никелем, медью и кобальтом; у платины корреляционные связи с этими элементами отсутствуют.

Данные минераграфического изучения руд позволяют предположить их первично магматическое происхождение. На это указывают как последовательность отложения минеральных ассоциаций руд, так и состав продуктивных на никель и медь ассоциаций. Руды изученного месторождения характеризуются однотипными минеральными ассоциациями, среди которых можно выделить: пентландит-пирротиновую, магнетит-халькопирит-пирротиновую и пирит-марказитовую. Две первые ассоциации являются продуктивными на медно-никелевое оруденение.

О возрасте никеленосных интрузивов Камчатки имеются противоречивые сведения [3, 10]. Поэтому нами произведено определение абсолютного возраста рудоносных интрузий месторождения Шануч и рудопроявления Геофизического Шанучского рудного поля, а также никеленосной Кувалорогской интрузии. Оно выполнено Rb-Sr методом в центре изотопных исследований ВСЕГЕИ на термоионизационном масс-спектрометре Triton (Германия). Для исследований отбирались монофракции флогопита, роговой обманки и биотита или сростки слюд с роговой обманкой, как минералов, наиболее обогащенных калием. В результате анализа для интрузий месторождения Шануч получена изохрона – 49.2 ± 2.7 млн лет, для Геофизического рудопроявления – 53.3 ± 1.8 млн лет [8], а для Кувалорогской интрузии – $55,2 \pm 2,2$ млн лет. Это свидетельствует об одной эоценовой эпохе формировании медно-никелевого оруденения в пределах про-

винции. Возраст оруденения меняется от раннеэоценового на месторождении Шануч одноименного рудного района до позднепалеоэоценового для рудопроявлений Кувалорогской никеленосной интрузии Дукукского рудного района и о некотором омоложении возраста медно-никелевого оруденения провинции с севера на юг.

Таким образом, в Камчатской никеленосной провинции известны среднее по запасам сульфидное медно-никелевое месторождение Шануч и ряд перспективных рудопроявлений того же типа (Геофизическое, Квинум, Тундровое, Оленье и многие другие). Они сосредоточены в Шанучском и Дукукском рудных районах. Для данной провинции характерны следующие особенности: приуроченность к срединному массиву, принадлежность никеленосных интрузий к формации роговообманковых базитов, высокая никеленосность руд и раннепалеоэоценовый возраст медно-никелевого оруденения.

Становая никеленосная провинция

Становая никеленосная провинция гораздо крупнее по площади, она протягивается вдоль юго-восточной окраины Северо-Азиатского кратона на 1300 км при ширине порядка 250–300 км. Никеленосной провинции отвечает восточная часть Становой складчатой области или Станового мегаблока, ограниченная с севера Становым, а с юга – Монголо-Охотским глубинными разломами. Мегаблок представляет собой обрамление Алданского щита – гранит-зеленокаменную область, подвергнутую тектоно-магматической активизации в мезозойское время. В пределах Становой провинции располагается месторождение Кун-Манье и ряд перспективных рудопроявлений сульфидной медно-никелевой формации.

Медно-никелевое оруденение генетически связано с разновозрастными базит-гипербазитовыми комплексами: позднеархейским анортозитовым и габбро-анортозитовым, раннепротерозойскими дунит-троктолит-габбровым и габбро-норит-пироксенит-перидотитовым, а также кортландит-пироксенит-габбровым раннего мела. То есть сформировано в течение трех металлогенических эпох: позднеархейской, раннепротерозойской и раннемеловой.

Наиболее перспективной на выявление сульфидных медно-никелевых месторождений с богатыми рудами является ассоциация оруденения с малыми интрузиями, дайками и силами раннепротерозойского габбро-норит-пироксенит-перидотитового кун-маньенского и раннемелового кортландит-пироксенит-габбрового джалтинского комплексов. Этот тип оруденения установлен в бассейне рр. Мая (Удская) и Кун-манье в пределах Курумканского рудного поля [1], а также в бассейне рр. Джалта и Ульдегит в Джалтинском никеленосном узле [5, 6].

Курумканское рудное поле расположено в восточной части Становой провинции в междуречье Май (Удской) и Кун-Манье. Оно приурочено к одноименному интрузиву метагабброидов и метаанортозитов архейского возраста. Породы массива, а также вмещающие их плагиогнейсы джанинской серии и гранито-гнейсы марагайского комплекса пронизаны серией линзовидных и силлообразных мафит-ультрамафитовых тел никеленосного кун-маньенского комплекса. Комплекс представлен вебстеритами, плагиовестеритами, габброноритами, лерцолитами, клино- и орториоксенитами. Изотопный возраст комплекса, полученный в ЦИИ ИСГЕИ U-Pb методом по цирконам, составляет 1700 ± 12 млн лет, а Sm-Nd изохронна по пироксенам, плагиоклазам и слюдам показывает 1812 ± 66 млн лет [1].

Силлообразные тела кун-маньенского комплекса в центральной части Курумканского рудного поля нередко содержат вкрапленную сульфидную медно-никелевую минерализацию. Мощность тел меняется от 0,1 до 90 м и протяженность по простиранию от 100 до 3000 м. Они располагаются в зонах многоярусных пологонаклонных ($10-25^\circ$) на север-северо-восток разрывных нарушений. В пределах рудного поля выявлено месторождение Кун-Манье и ряд рудопроявлений сульфидных медно-никелевых руд. Рудные тела представляют собой пластообразные залежи вкрапленных сульфидных руд. В составе руд преобладают рядовые вкрапленные, богатые густовкрапленные руды локализованы в висячем и лежачем боку интрузий. Редко встречающиеся брекчиевые и сплошные руды располагаются на контактах интрузий с вмещающим породами, иногда выходя за их пределы.

Основными минералами руд являются пирротин, пентландит, халькопирит и пирит. Реже встречаются магнетит, ильменит, борнит, халькозин, бравоит, виоларит, никелин. Во вкрапленных рудах содержание никеля и меди составляет, соответственно, 0,46–0,9 % и 0,11–0,2 %, в брекчиевых оно увеличивается до 5,48 % никеля и 0,36 % меди, а в сплошных рудах достигает 8,8 % никеля и 0,75 % меди [1].

Джалтинский никеленосный узел расположен в юго-западной части Становой провинции в бассейне р. Джалты. Он сложен раннеархейскими метаморфическими образованиями дамбукинской серии. В ее составе преобладают гнейсы, нередко графитсодержащие, а также кристалосланцы с прослоями и линзами амфиболитов, железистых кварцитов и кальцифиров. Они прорваны интрузиями гранитоидов позднеархейского возраста, субщелочных лейкогранитов и гранодиоритов раннепротерозойского позднестанового комплекса, а также джалтинским комплексом габброидов, пироксенитов, горнблендитов, кортландитов и дунитов раннемелового возраста.

Породы раннемелового джалтинского интрузивного комплекса слагают многочисленные мелкие (до 5 км²) массивы, дайки и силлы, ранее рассматриваемые в качестве раннеархейских и раннепротерозойских образований. Протяженность даек и силлов достигает 1-2 км, при мощности в первые десятки метров. Комплекс сложен преимущественно мезократовыми и меланократовыми роговообманковыми и гранат-роговообманковыми габброидами, плагиоклазовыми и пироксеновыми горнблендитами, пироксенитами, кортландитами, реже дунитами. Для пород комплекса, кроме дунитов, характерно присутствие флогопита и роговой обманки – паргасита для кортландитов и буровато-зеленой роговой обманки для габброидов. Габброиды, пироксениты и горнблендиты нередко отмечаются в составе единых интрузивных тел. К силлам и дайкам кортландитов и пироксенитов приурочено платиносодержащее медно-никелевое оруденение.

Породы комплекса относятся к известково-щелочной серии нормального ряда и характеризуются преимущественно умеренной и низкой калиевоcтью. Содержания MgO в кортландитах составляет 19-29 мас.%, в пироксенитах – 8.4 мас.%, что, наряду с низкими содержаниями Cr, высокими TiO₂, суммы P3Э, La, Sm отличает их от типичных мантийных перидотитов и пироксенитов, сближая с аналогичными по составу коровыми образованиями.

Для определения возраста комплекса произведено изотопное датирование U-Pb методом из цирконов, извлеченных из пород указанного комплекса. Изотопное датирование осуществлялось на микрозонде SHRIMP-II в центре изотопных исследований ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского. Цирконы из кортландитов представлены прозрачными и полупрозрачными кристаллами желтоватого цвета. Кристаллы субидиоморфные и идиоморфные. Облик зерен коротко и длинно-призматический. Католюминесцентное изображение цирконов демонстрирует концентрическую и секториальную зональность роста, которые свидетельствуют о магматическом происхождении цирконов. В результате изотопного датирования установлен абсолютный возраст кортландитов в 121.2±1.8 млн лет [7].

В пределах узла наиболее изучены рудопроявления Стрелка и Никелевое. Рудопроявление Стрелка расположено в верховьях р. Ульдегит. Оно представлено дайками роговообманковых пироксенитов и горнблендитов с сульфидной медно-никелевой минерализацией. Мощность даек достигает 40м, они прослежены по простиранию канавами на 1000м и скважинами колонкового бурения на глубину 200м. Сульфиды образуют в дайках рассеянную вкрапленность, а также прожилки и жилы массивных медно-никелевых руд, иногда вы-

ходящие за пределы даек во вмещающие графитсодержащие гнейсы. Состав сульфидов постоянный – пирротин (90-95 %), халькопирит (до 5 %), пентландит (до 1-2 %), пирит. Реже встречаются сфалерит, арсенопирит, галенит, молибденит и самородное золото. Содержание никеля, по данным штучного опробования керн скважин, достигает 1 %, меди 6 %. По сульфидным рудам развита линейная кора выветривания до глубины 100м. По нашим данным, основным новообразованным минералом коры выветривания является ярозит, в качестве примесей отмечаются смектит, кварц и кристобалит.

Рудопроявление Никелевое расположено в бассейне руч. Горациевского. Здесь были выявлены обломки массивных сульфидных медно-никелевых руд. По содержанию полезных компонентов их можно разделить на два типа: существенно никелевые мелкокристаллические и медно-никелевые крупнокристаллические. Первые из них содержат, по данным химического анализа, 4.08 – 6.55 % никеля и 0.25 – 0.28 % меди, а вторые – 2.95 – 3.02 % никеля и 0.94 – 2.88 % меди. Атомно-абсорбционным анализом в рудах установлены существенные примеси благородных металлов (в г/т): Au – 0.23-0.41, Ag – до 6.0, Pt – 1.38–8.29, Pd – 2.25–4.52, Rh – 0.2–2.9. Руды состоят, главным образом, из пирротина (75–90 %), пентландита (5–10 %) и халькопирита (1–10 %). Реже отмечаются магнетит, пирит, виоларит, куприт, ковеллин и котульскит.

По текстурно-структурным особенностям медно-никелевые руды изученных рудопроявлений Джалтинского рудного узла делятся на вкрапленные, густо-, гнездово- и прожилково-вкрапленные, прожилковые, брекчиевые и массивные. Вкрапленные руды представлены магматическими породами – пироксенитами, кортландитами, горнблендитами, реже дунитами или габбро, содержащими рассеянную вкрапленность сульфидов. Среди сульфидов преобладает пирротин, в меньшей мере встречаются халькопирит и пентландит. Количество сульфидов меняется от 1-2 до 25 %. Сульфиды кристаллизуются после основных породообразующих минералов – пироксена и амфибола. Они выполняют интерстиции или развиваются по границам зерен нерудных минералов, в отдельных случаях замещая их. Участками сульфиды образуют грубопелетчатые структуры. В густо- и гнездово-вкрапленных рудах идиоморфные кристаллы пироксена и амфибола и их сростания местами как бы погружены в сульфидную матрицу с возникновением сидеронитовой структуры. Нередко встречаются брекчиевидные руды, состоящие из обломков магматических пород, сцементированных сульфидным материалом. Прожилковые и массивные руды преимущественно развиты в зальбандах интрузий, в

том числе и во вмещающих их гнейсах и кристаллосланцах. Рудовмещающие гнейсы и кристаллосланцы часто обогащены графитом.

Сульфидные медно-никелевые руды имеют однотипный минеральный состав. Они состоят, главным образом, из моноклинного и гексагонального пирротина, халькопирита и пентландита. В качестве примесей отмечаются виоларит, миллерит, мелонит, куприт, пирит, галенит, сфалерит, герсдорфит, ковеллин, молибденит, котульскит (теллурид палладия), самородное золото, марказит, мельниковит и лимонит. Нерудные минералы представлены пироксеном, роговой обманкой, оливином, хлоритом, серпентином, карбонатом, биотитом и мусковитом. Реже встречаются кварц, полевые шпаты, сфен и апатит.

Формирование сульфидного медно-никелевого оруденения Джалтинского рудного узла генетически связано с внедрением, кристаллизацией и постмагматической гидротермальной деятельностью джалтинского комплекса малых интрузий, силлов и даек пироксенит-кортландитовой ассоциации [5]. Вкрапленные халькопирит-пентландит-пирротиновые руды сингенетичны кристаллизации этих интрузий. Рудные минералы заполняют интерстиции между породообразующими минералами – пироксеном и амфиболом, реже образуют округлые нодулы. Прожилковые, брекчиевые и массивные руды образованы инъекцией остаточного, обогащенного летучими компонентами сульфидного расплава как в интрузии, так и во вмещающие их гнейсы и кристаллические сланцы. Конечная стадия рудообразования протекала под воздействием постмагматических флюидов. Она привела к появлению в рудах кварца, карбонатов и мусковита.

Таким образом, Становой провинции отвечает восточная часть Становой складчатой зоны (геоблока) юго-восточного обрамления Северо-Азиатского кратона, ограниченная с севера Становым, а с юга – Монголо-Охотским глубинными разломами. В строении провинции принимают участие метаморфические образования ранне-, позднеархейского и раннепротерозойского возраста. Они прорваны интрузивными комплексами широкого возрастного диапазона от раннего архея до мезозоя. Никелевое оруденение представлено сульфидной платиноидно-медно-никелевой формацией. Оруденение генетически связано с разновозрастными интрузивными базит-гипербазитовыми комплексами: позднеархейским анортозитовым и габбро-анортозитовым, раннепротерозойскими дунит-троктолит-габбровым и габбро-норит-пироксенит-перидотитовым, а также ранне-меловым коротландит-пироксенит-габбровым. Никелевое оруденение обнаружено во всех комплексах, но наиболее перспективным на поиски медно-никелевых месторождений являются кун-маньенский и джалтинский комплексы малых интрузий, даек и силлов.

Проведенный анализ закономерностей локализации сульфидного платиноидно-медно-никелевого оруденения Камчатской и Становой провинций показал следующее. Эти две провинции объединяет относительно древний возраст вмещающих пород, представленных гнейсами и кристаллосланцами, нередко с высоким содержанием углерода, приуроченность медно-никелевого оруденения к интрузиям широкого возрастного диапазона – от архея до раннего мела (Становая провинция) и до эоцена (Камчатская провинция), принадлежность оруденения к сульфидной платиноидно-медно-никелевой формации, а также генетическая связь промышленного оруденения с комплексами малых интрузий, силлов и даек базит-ультрабазитового состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьянов В. А., Приходько В. С., Пересторонин А. Н. и др. Новый тип медно-никелевых месторождений юго-востока Алдано-Станового щита // ДАН. 2009. Т. 425. № 4. С. 505-508.
2. Зимин С. С. Формация никеленосных роговообманковых базитов Дальнего Востока. – Новосибирск: Наука СО. 1973. 90с.
3. Полетаев В. А. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения и рудопроявления перидотит-пироксенит-норитовой формации центральной Камчатки // Платина России. Т. 3. Кн. 2. –М.: ЗАО «Геоинформмарк». 1999. С. 191-199.
4. Сидоров М. Д., Степанов В. А. Геофизические поля и никеленосность Камчатского срединного массива // Вестник КРАУНЦ. 2006. № 8. С. 140-150.
5. Степанов В. А., Октябрьский Р. А., Гвоздев В. И. Малые интрузии гипербазитов и медно-никелевое оруденение Дамбукинского рудно-россыпного узла Верхнего Приамурья // ДАН. 2006. Т. 409. № 4. С. 514-517.
6. Степанов В. А., Мельников А. В., Стриха В. Е. Становая никеленосная провинция Дальнего Востока // Вестник СВНЦ. 2008. № 2. С. 13-21.
7. Стриха В. Е., Степанов В. А., Родионов Н. И. Раннемеловая кортландит-пироксенит-габбровая ассоциация Верхнего Приамурья: геохронологические и геохимические данные // ДАН. 2006. Т. 407, № 5. С. 664-668.
8. Трухин Ю. П., Степанов В. А. Сидоров М. Д. Камчатская никеленосная провинция // ДАН. 2008. Т. 418. № 6. С. 802-805.
9. Ханчук А. И. Геология и происхождение Срединнокамчатского кристаллического массива // Тихоокеанская геология. 1983. № 4, с. 45-53.
10. Щека С. А. Чубаров В. М. Никеленосные кортландиты Камчатки // Известия АН СССР. Сер. геол. 1987. № 12, с. 50-61. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, профессор, vitstepanov@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

V. A. Stepanov

COMPARATIVE CHARACTERISTIC OF THE KAMCHATSKY AND STANOVOY NICKELEFEROUS PROVINCES OF THE FAR EAST

The comparative characteristics of the geological structure and ore content of the Kamchatka and Stanovoi nickel-bearing provinces are given. A description is given of the platinum-copper-nickel deposits of Shanuch, Kun-mane and of a number of ore occurrences. The isotopic age of copper-nickel mineralization is determined.

Key words: province, nickel, copper, platinoids, deposit, isotope age.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-157-167

AUTHORS

Stepanov V. A., Doctor of Geological-mineralogical Sciences, senior researcher, professor, vitstepanov@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Gur'yanov V. A., Prihod'ko V. S., Perestoronin A. N. i dr. *DAN*. 2009. T. 425. no 4. pp. 505-508.
2. Zimin S. S. *Formatsiya nikelenosnyh rogoobmankovykh bazitov Dal'nego Vostoka* (Formation of Nickel of hornblende rocks in the Far East). Novosibirsk: Nauka SO. 1973. 90 p.
3. Poletaev V. A. *Platina Rossii*. T. 3. Kn. 2. Moscow: «Geoinformmark». 1999. pp. 191-199.
4. Sidorov M. D., Stepanov V. A. *Vestnik KRAUNC*. 2006. no 8. pp. 140-150.
5. Stepanov V. A., Oktyabr'skij R. A., Gvozdev V. I. *DAN*. 2006. T. 409. no 4. pp. 514-517.
6. Stepanov V. A., Mel'nikov A. V., Striha V. E. *Vestnik SVNC*. 2008. no 2. pp. 13-21.
7. Striha V. E., Stepanov V. A., Rodionov N. I. *DAN*. 2006. T. 407, no 5. pp. 664-668.
8. Truhin YU.P., Stepanov V. A. Sidorov M. D. *DAN*. 2008. T. 418. no 6. pp. 802-805.
9. Hanchuk A. I. *Tihookeanskaya geologiya*. 1983. no 4, pp. 45-53.
10. SHCHeka S. A. CHubarov V. M. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geol.* 1987. no 12, pp. 50-61.



ПЛАТИНО-ЗОЛОТО-РТУТНАЯ И МЕДНО-НИКЕЛЕВАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ КАМЧАТКИ

Показано, что в пределах Камчатки наиболее полно развито оруденение триады элементов № 78, 79 и 80 — платины, золота и ртути, соседних по таблице Д. И. Менделеева, а также их аналогов по подгруппам (никель, медь). Приведено описание месторождений этих металлов. Произведен анализ природного изотопного состава элементов триады. Наибольший интерес представляет нестабильный изотоп ^{197}Hg , который по реакции электронного захвата превращается в стабильный изотоп ^{197}Au . Наличие комплексных месторождений (медно-никелевых, золото-ртутных, золото-серебряных), а также примесей элементов одних подгрупп в рудах других, указывают на геохимическую близость месторождений рассматриваемых металлов. Возрастной диапазон формирования оруденения Камчатки от позднего мела до неогена длительный с определенной очередностью от более раннего платинового до более поздних медного, медно-никелевого, золото-серебряного и ртутного.

Ключевые слова: платина, золото, ртуть, никель, медь, изотопы, месторождения, металлогения.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-168-179

На Дальнем Востоке России известны металлогенические провинции разной геохимической специализации. Например, Центральная-Колымская и Приамурская провинции существенно золотоносные с преобладанием россыпного золота над рудным, Приморскую провинцию отличает золотое, полиметаллическое и борное оруденение, а Омолонскую золото-серебряное. В отличие от них металлогенический потенциал Камчатской провинции определяет триада металлов – платина, золото и ртуть, соседней по шестому периоду периодической системы элементов (элементы №№ 78, 79 и 80), а также их аналогов по подгруппам. Наиболее проявлены аналоги подгрупп платины (палладий и никель) и золота (серебро и медь).

Изотопы элементов триады

Свойства элементов триады (Pt, Au, Hg) отличаются между собой, так как электронные конфигурации валентных электронов их атомов различ-

ны. Различия заключаются в наличии у следующего в ряду элемента одного лишнего протона в ядре и электрона на внешней s-орбитали.

Природная платина встречается в виде смеси из шести изотопов: ^{190}Pt (0,014 %), ^{192}Pt (0,782 %), ^{194}Pt (32,967 %), ^{195}Pt (33,832 %), ^{196}Pt (25,242 %), ^{198}Pt (7,163 %). Один из них слабо радиоактивен (^{190}Pt , альфа-распад в ^{186}Os , период полураспада $6,5 \cdot 10^{11}$ лет). Отмечается существование очень слабой радиоактивности ещё двух природных изотопов платины: альфа-распад $^{192}\text{Pt} \rightarrow ^{188}\text{Os}$ и двойной бета-распад $^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{198}\text{Hg}$ [15].

Золото, как нечетный элемент, имеет один стабильный природный изотоп ^{197}Au , искусственно полученных радиоактивных изотопов около 30 [5].

Природная ртуть состоит из семи стабильных и небольшого количества радиоактивных изотопов. Стабильными являются семь изотопов (встречаемость в %): ^{196}Hg (0,146), ^{198}Hg (10,02), ^{199}Hg (16,84), ^{200}Hg (23,13), ^{201}Hg (13,22), ^{202}Hg (29,80), ^{204}Hg (6,85) [21]. Из радиоактивных наиболее интересен изотоп ^{197}Hg , хотя содержание его в природной смеси невелико – 0,1 % [1], по другим данным 0,0037 % [14]. Он нестабилен и по реакции электронного захвата превращается в стабильный изотоп золото-197. Реакция происходит изомерически с двумя периодами полураспада – 24 и 65 ч [8].

Два первых элемента триады относятся к благородным металлам, близка к благородным металлам по ряду свойств и ртуть. А. А. Сауков писал, что если бы в природе не было бы наряду с процессами образования самородной ртути также и процессов ее испарения, то самородное состояние ртути в природе было бы более обычным, чем для золота и серебра [13]. Среди элементов-аналогов триады к благородным металлам относятся также палладий (подгруппа платины) и серебро (подгруппа золота). Совместное нахождение исследуемой группы металлов в месторождениях во многом определяется принадлежностью почти половины из них к благородным металлам.

Месторождения триады элементов и их аналогов по подгруппам

Месторождения лидеров триады – платины, золота и ртути широко распространены и преобладают в пределах провинции (рис. 1).

Рассмотрим месторождения каждого из элементов триады, а также их аналогов по подгруппам – никеля и меди отдельно.

Месторождения платины

Россыпные месторождения и россыпепроявления платины расположены главным образом в северной части Камчатской платиноносной провинции в пределах Сейнав-Гальмознанского и Эпильчикского россыпных узлов [11, 4]. В пределах Сейнав-Гальмознанского

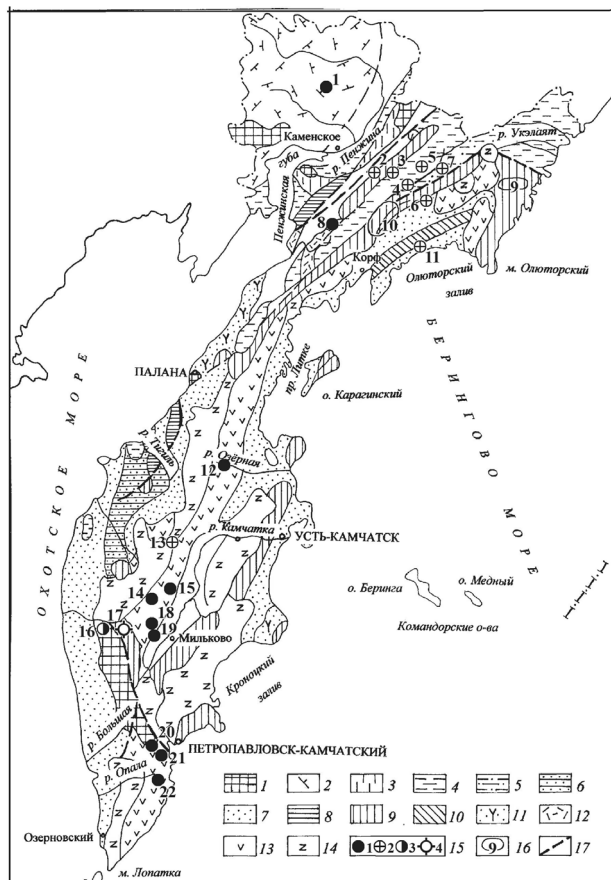


Рис. 1. Схема метамогении Камчатки, геологическое строение по [6]: 1 – метаморфические образования докембрия и палеозоя, 2 – меловые вулканы и интрузии Охотско-Чукотского пояса, 3–7 – терригенные отложения: 3 – нижнемеловые, 4 – верхнемеловые, 5 – верхнемеловые-палеогеновые, 6 – палеогеновые, 7 – олигоцен-миоценовые, 8–11 – подводно-вулканогенные отложения: 8 – нижнемеловые, 9 – верхнемеловые, 10 – палеогеновые, 11 – олигоцен-нижнемиоценовые, 12–14 – наземные вулканы: 12 – олигоцен-нижнемиоценовые риолит-дацитового состава, 13 – неогеновые андезитового состава, 14 – четвертичные базальтового состава, 15 – рудные месторождения и их номера: 1 – золоторудные (1 Сергеевское, 8 – Аметистовое, 12 – Озерновское, 14 – Агинское, 15 – Сухариковские Гребни, 18 – Бараньевское, 19 – Золотое, 20 – Родниковое, 21 – Мутновское, 22 – Асачинское), 2 – ртутные (2 – Ясное, 3 – Озерное, 4 – Ляпнагайское, 5 – Нептун, 6 – Тавена, 7 – Красная Горка, 11 – Олюторское, 13 – Чемпуринское), медно-никелевые (16 – Шануч), медные (17 – Кирганикское), 16 – платинометалльные россыпные узлы (9 – Эпильчикский, 10 – Сейнав-Гальмознанский), 17 – разломы

узла находится десять россыпей платины, две из которых относятся к крупным, остальные – к средним и мелким. Общая прогнозная оценка ресурсов шлиховой платины узла позволяет отнести его к уникальным объектам [4]. Россыпи аллювиального и делювиального генезиса образовались за счет размыва платиновой минерализации, рассеянной в зональных дунит-клинопироксенит-габбровых массивах позднемелового возраста. В россыпях Сейнав-Гальмознанского узла из минералов платиновой группы преобладает изоферроплатина – Pt₃Fe (97,5 % от «шлиховой платины») [7]. В пределах Гальмознанского массива проведены работы по выявлению крупнообъемных платиносодержащих дунитовых руд с относительно низкими содержаниями полезных компонентов [2]. Установлено, что повышенные содержания платины приурочены к полям развития средне и крупнозернистых дунитов. В качестве наиболее перспективных объектов для локализации платинометалльного оруденения выделены площади распространения дунитов с порфиорокластическим типом микроструктур и участками развития рудных хромититов [12]. Содержания платины от 0,7 до 3,5 г/т, в отдельных точках до ураганных значений в 380 г/т. Содержания прочих ЭПГ значительно ниже. Например, при содержании (г/т) Pt – 50,2 концентрация прочих не превышает 1,5 г/т, из них Pd – 0,15–0,5. Платина в рудах массива содержится в виде платино-железистых сплавов (изоферроплатина, тетраферроплатина и туламинит), что отвечает составу «шлиховой платины» в россыпях узла.

В расположенном севернее Эпильчикском платиноносном россыпном узле известны три россыпепроявления платины. Так же, как и в Сейнав-Гальмознанском узле, они образовались за счет размыва платиновой минерализации, развитой в зональных базит-ультрабазитовых интрузиях. Среди платиновых минералов преобладает изоферроплатина. Южнее Сейнав-Гальмознанского узла, в пределах Северо-Камчатского участка выявлен ряд россыпепроявлений платины. В них МПГ встречается совместно и самородным золотом. В составе МПГ преобладают самородная платина, изоферроплатина и железистая платина. Предполагается, что россыпепроявления образовались за счет размыва зональных массивов дунит-клинопироксенит-габбровой формации со слабой степенью эродированности [4].

Месторождения золота

Месторождения золота широко распространены на территории Камчатки, слагая Корьякско-Камчатский рудный пояс. Они приурочены к Центрально-Камчатскому вулканическому поясу и относятся к вулканогенной золото-серебряной формации [10]. Вулканический пояс сложен верхнемеловыми и кайнозойскими вулканическими образованиями и представляет собой пологий антиклинорий, прибли-

жающийся к сводовому поднятию, осложненному горстовыми выступлениями. Общая вулканическая специфика пояса андезитовая, что существенно отличает его от других вулканоплутонических поясов Востока Азии. Вулканиты объединены в олигоцен-миоценовую андезитовую и миоцен-плиоценовые андезит-дацитовую и риолит-дацитовую формации. В пределах пояса выделяются Северо-, Центральное- и Южно-Камчатский золоторудные районы.

Наиболее крупными месторождениями являются Сергеевское, Аметистовое, Озерновское, Агинское, Сухариковские Гребни, Бараньевское, Золотое, Родниковское, Мутновское и Асачинское. Месторождения генетически связаны с формированием вулканоструктур центрального типа и приурочены к отдельным элементам их строения. Рудные тела обычно представлены адуляр-кварцевыми жилами и зонами прожилково-вкрапленной убогосульфидной минерализации. Они часто ассоциируют с субвулканическими и экструзивными телами кислого, реже среднего состава. Руды имеют типичные для близповерхностного оруденения коломорфно-полосчатые, кокардовые, крустификационные структуры. Околорудные изменения представлены пропилитизацией, адуляризацией, окварцеванием, кварц-гидрослюдистыми метасоматитами, иногда вторичными кварцитами. Содержание золота в рудах меняется от 1–5 до десятков грамм на тонну, серебра – десятки и сотни грамм на тонну.

В составе рудных минералов присутствуют самородное золото, электрум, теллуриды золота и серебра, сульфиды полиметаллов (в том числе меди и цинка), мышьяка и сурьмы. В ряде золото-серебряных месторождений отмечается ртутная минерализация, представленная киноварью или метациннабаритом (Оганчинское, Бараньевское, Апапель, Агличик, Озерновское, Агинское). На Сергеевском и Чемпуринском месторождениях содержания ртути достигают промышленных величин, поэтому они являются комплексными золото-серебряно-ртутными [17]. В рудных телах наиболее глубоких горизонтов месторождения Аметистовое обнаружены наряду с золотом минералы никеля и кобальта [9].

Золото отличается разнообразием минеральных форм: от почти 100 % самородного золота до электрума и теллуридов золота. Среди примесей в золоте преобладают серебро (0-60 %) и ртуть (0–20 %).

По данным [9], изотопный возраст золото-серебряных месторождений Камчатки меняется от эоцена до плейстоцена. Возраст конкретных месторождений составляет (млн лет): Аметистовое – 41,4-38,3, Золотое – 17,1, Агинское – 6,9–7,48, Порожистое – 7,4, Вилючинское – 5,3, Больше-Банное – 3,4, Асачинское – 4,0–4,5, Родниковое – 0,9–1,1, Мутновское – 0,7–3,3.

Эпитермальные золото-серебряные месторождения были сформированы при $T = 150\text{--}270^\circ\text{C}$ из гидротермальных растворов – продуктов смешения ювенильных и метеорных вод, сера, свинец и стронций которых имеет глубинную, предположительно мантийную природу [3].

Месторождения ртути

Месторождения и рудопроявления ртути наиболее широко развиты в северной части Камчатки. Здесь выделяется Корякско-Камчатская ртутоносная провинция [6]. Размещение в ней ртутного оруденения определяется разрывными нарушениями. В отличие от других ртутоносных провинций Дальнего Востока (Колымо-Чукотской, Охотско-Чукотской, Приморской) в ней широко распространены ультраосновные интрузии, расположенные вдоль зон глубинных разломов и надвигов. Преобладают ртутнорудные тела типа оруденелых зон дробления и кварц-карбонатных жил. Линейные тела нередко сопровождаются пластообразными, представляющими собой горизонты песчаников с обильной вкрапленностью киновари. В пределах провинции выделены вытянутые в субмеридиональном направлении следующие ртутоносные зоны: Таловская, Найвал-Ванетаткая, Энычаваямская, Верхнее-Пахачинская, Олюторская, Карагинская, Тигильская, Срединно-Камчаткая, Северо-Камчатская и Валангинская. В них известны средние и мелкие по масштабам месторождения ртути (Ясное, Озерное, Ляпнагай, Удача, Нептун, Тавена, Красная Горка, Олюторское, Чемпуринское) и серия рудопроявлений.

Согласно классификации В. П. Федорчука [20], ртутное оруденение относится к вулканогенному и телетермальному классам месторождений гидротермальной группы. Ртутное оруденение вулканогенного класса развито в пределах Валангинской, Северо-Камчатской и южной части Центрально-Камчатской ртутоносных зон. Наиболее ярким представителем является Чемпуринское месторождение, расположенное среди вулканитов плиоценового возраста. Рудные тела приурочены к силлу диорит-порфиритового состава. Они представлены монокварцитовыми линзами. В остальных зонах развито ртутное оруденение телетермального класса преимущественно кварц-диккитового типа. Оно расположено преимущественно среди терригенных пород корякской серии позднего мела (месторождения Озерное, Ясное, Удача, Тавена, Ляпнагай), вальэнской свиты палеоцена (Нептун) реже ильпинской серии олигоцен-миоценового возраста (Олюторское). Рудные тела представлены зонами дробления, состоящими из обломков минерализованных пород, сцементированных кварц-карбонат-диккитовым цементом. Основным рудным минералом является киноварь, реже встречаются метациннабарит, антимонит, реальгар, аурипигмент, пирит и халькопирит.

Ртутное оруденение листовитового типа выявлено в Таловской, Карагинской и Найвал-Ванетатской зонах. Рудные тела представлены зонами литственитизации с кварцевыми и кварц-карбонатными прожилками, иногда монокварцитами. Из рудных минералов преобладает киноварь, реже встречаются метациннабарит, самородная ртуть, пирит и халькопирит.

Возраст ртутного оруденения вулканогенного класса – плиоценовый. Оруденение телетермального происхождения, судя по возрасту вмещающих пород, моложе позднего мела или палеоцена, а наличие ртутных минералов в термальных источниках указывает на то, что ртутная минерализация продолжает формироваться и в современное время.

Месторождения элементов-аналогов по подгруппам

Из месторождений элементов-аналогов рассматриваемой триады в пределах Камчатки значительную роль играют месторождения никеля и меди, среди них отметим сульфидные медно-никелевые и медно-порфиоровые. Остальные элементы – аналоги (серебро, палладий, цинк) встречаются в виде примесей в месторождениях триады и других металлов.

Медно-никелевые месторождения

Медно-никелевое оруденение сконцентрировано в пределах Камчатской никеленосной провинции, которой отвечает одноименный срединный массив [19]. Срединный массив, площадью около 15 тыс. кв. км, расположен в южной части Камчатского полуострова. Здесь находится сульфидное медно-никелевое месторождение Шануч и ряд перспективных рудопроявлений.

Медно-никелевое оруденение сосредоточено, главным образом, в пределах северной и южной оконечностей срединного массива, где располагаются Шанучский и Дукукский рудные районы, в меньшей степени на западной окраине массива, в Колпаковском потенциально никеленосном районе. В геолого-структурном плане рудным районам отвечают относительно опущенные блоки массива, выполненные метатерригенными углеродсодержащими толщами. Они прорваны многочисленными небольшими интрузиями и дайками дукукского комплекса эоценового возраста, с которыми генетически связано медно-никелевое оруденение.

Наиболее изучено месторождение Шануч, представлено пучком субвертикально ориентированных рудных тел, сопряженных с небольшими интрузиями неправильной формы и дайками дукукского комплекса. Наблюдается сложная жилообразная, штокообразная и линзовидная форма рудных тел, сложенных сульфидными медно-никелевыми рудами. Выделены следующие типы руд: массивные, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные и вкрапленные. Массив-

ные руды состоят на 75 – 95 % из сульфидов. Они содержат обломки вмещающих пород (меладiorиты, амфиболовые габбро, пироксени-ты, гнейсовидные граниты, кристаллические сланцы) удлиненной или изометричной формы. Текстура руд массивная, структура – аллотриоморфнозернистая или распада твердого раствора.

Среди рудных минералов преобладают пирротин, пентландит и халькопирит. Часто встречаются виоларит и пирит. Реже отмечаются минералы благородных металлов: самородное золото, изоферроплатина, сперрилит, котульскит.

Среднее содержание полезных компонентов составляет (в %): никель – 5,41, медь – 0,85, кобальт – 0,13, благородных металлов (в г/т): золото – 0,24, палладий – 0,40, платина – 0,13. Выявлена наиболее тесная корреляционная связь между содержаниями никеля и кобальта, никеля и меди, а также между медью и кобальтом (0,75). Отмечается также устойчивая корреляционная связь палладия и золота с никелем, медью и кобальтом. Изотопный возраст медно-никелевого оруденения оценивается как эоценовый [18].

Месторождения меди

В пределах Камчатки находятся небольшие месторождения и рудопроявления молибден-меднопорфировой формации. Наиболее типичным является месторождение Кирганик.

Кирганикское рудное поле приурочено к сложно построенному кольцевому шонкинитовому массиву позднемелового-палеоценового возраста, локализованному в центральной, наиболее эродированной части Кирганикской вулканокупольной структуры. Рудовмещающие биотит-калишпатсодержащие метасоматиты локализованы в телах порфировидных шонкинитов. В метасоматитах выявлены крутонаклонные залежи вкрапленных и прожилково-вкрапленных сульфидных руд. В плане совокупность рудных тел образует полукольцевую минерализованную зону в центре Кирганикской вулканоструктуры. Всего установлено пять крутопадающих залежей средней мощностью от 15 до 130 м и протяженностью от 200 до 1 250 м. Наиболее крупные из них прослежены на глубину до 300 м.

Главные рудные минералы представлены борнитом и халькопиритом нескольких генераций. Кроме них в рудах присутствуют титаномагнетит, пирит, халькозин, гематит и самородное золото. Среднее содержание меди составляет 0,5–0,7 %. Промышленные медные руды содержат также золото (в среднем 0,5–0,7 г/т), серебро (6–7 г/т), платину (0,8 г/т), палладий (1 г/т), ванадий, кобальт и фосфор.

Обсуждение результатов

В пределах Камчатки наиболее полно развиты месторождения платины, золота и ртути, элементов-соседей по таблице Д. И. Менделеева, а

также их аналогов по подгруппам. Из элементов рассматриваемой триады два элемента – платина и ртуть являются нечетными и состоят из смеси изотопов, некоторые из которых являются радиоактивными. Эти элементы не закончили свою эволюцию. С течением времени часть их изотопов превращается в стабильные изотопы других элементов. В отличие от них золото состоит из одного изотопа. Эволюция его как элемента закончена. Предполагается, что золото или часть его может являться продуктом эволюции ртути, как элемента. Такое превращение элементов в природе не является уникальным. Например, подобная же реакция электронного захвата привела к образованию всего аргона воздуха за счет распада радиоактивного изотопа ^{40}K [16].

Разберем геохимические связи указанных элементов как внутри подгрупп, так и между ними. Платина образует промышленные россыпи, образованные за счет размыва зональных ультрабазитовых интрузий позднемелового возраста. Аналог платины – палладий является основной примесью в платиновых минералах из россыпей и зональных массивов. Другой аналог группы платины – никель преобладает в сульфидных медно-никелевых рудах месторождения Шануч и ряда рудопроявлений эоценового возраста в пределах Камчатского срединного массива. Существенную роль в составе руд кроме никеля играет медь – аналог из группы золота. Кроме того, в медно-никелевых рудах встречаются минералы платины и палладия.

Золото совместно со своим аналогом – серебром формирует ряд месторождений и рудопроявлений, приуроченных к вулканитам. Несмотря на то, что наиболее ценным элементом руд является золото, концентрация серебра обычно значительно выше. Для золото-серебряных руд типична примесь минералов ртути. Кроме того, на глубоких горизонтах Аметистового золото-серебряного месторождения отмечается примесь минералов никеля, элемента из группы платины. Возраст золото-серебряных месторождений меняется в пределах от позднего эоцена до плейстоцена.

Месторождения ртути типичны для северной части Камчатки. В качестве примесей в рудах нередко отмечается золото, свидетельствуя о геохимической общности формирования этих двух элементов рассматриваемой триады. Возраст ртутного оруденения, вероятно, наиболее молодой, так как значительные содержания ртути отмечаются и в современных термальных источниках Камчатки (Апаль и др.).

Изотопный возраст оруденения рассматриваемых металлов меняется в диапазоне: от позднего мела для платины в гипербазитах до эоцена для никеля и меди, а также палеоцена-неогена для золота, серебра и ртути. Ртуть отлагается и в современных термальных источниках (Апаль и др.).

Заключение

Проведенное исследование показало, что в пределах Камчатки наиболее полно развито оруденение платины, золота и ртути – соседних элементов по таблице Д. И. Менделеева, а также некоторых из их аналогов по подгруппам (никель, медь).

Анализ природного изотопного состава элементов триады показал, что в отличие от золота, платина и ртуть состоят из ряда как стабильных, так и радиоактивных изотопов. Наибольший интерес представляет нестабильный изотоп ^{197}Hg , который по реакции электронного захвата превращается в стабильный изотоп золото-197. Это свидетельствует о том, что какая-то часть золота земной коры образовалась за счет преобразования этого изотопа ртути.

Геохимическая близость формирования месторождений рассматриваемых элементов определяется наличием комплексных месторождений (медно-никелевых золото-ртутных, золото-серебряных), а также примесей элементов одних подгрупп в рудах элементов других.

Возрастной диапазон рассматриваемых месторождений меняется от позднего мела для платины в гипербазитах до эоцена для никеля и меди, а также палеоцена-неогена для золота, серебра и ртути. Это указывает на длительный период формирования месторождений и определенную очередность от более раннего платинового оруденения до более поздних медного, медно-никелевого, золото-серебряного и ртутного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладышев В. П., Левицкая С. А., Филиппова Л. М. Аналитическая химия ртути. М.: Наука. 1974. – 116 с.
2. Козлов А. П., Чантурия В. А. Платиносодержащие дунитовые руды и их обогатимость. М.: УРАН ИПКОН РАН. 2009. – 148с.
3. Константинов М. М. Золоторудные провинции мира. М.: Научный мир. 2006. – 358 с.
4. Корякско-Камчатский регион – новая платиноносная провинция России / под ред. В. П. Зайцева, А. Ф. Литвинова, Э. А. Ланды. СПб: ВСГЕИ. 2002. – 383 с.
5. Малышев В. М., Румянцев Д. В. Золото. М.: Металлургия. 1979. – 288 с.
6. Металлогения ртути / под ред. В. И. Смирнова, В. А. Кузнецова, В. П. Федорчука. М.: Недра. 1976. – 255 с.
7. Мочалов А. Г., Зайцев В. П., Перцев А. Н., Власов Е. А. Минералогия и генезис «шлиховой платины» россыпных месторождений южной части Корякского нагорья России // Геология рудных месторождений. 2002. № 3, С. 212–238.
8. Некрасов Б. В. Основы общей химии: в 2-х томах. М.: Химия. 1974. Т.2. – 688 с.
9. Округин В. М. Новые данные о возрасте и генезисе эпitherмальных месторождений зоны перехода континент – океан // Геодинамика, магматизм и

минерализации континентальных окраин Севера Пацифики. Магадан. 2002. – Т.3. – С. 36–40.

10. Петренко И. Д. Золото-серебряная формация Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 1999. – 116 с.

11. Полетаев А. В. Камчатско-Каряжский платиноносный пояс // Платина России. Т. 3, кн. 1. М.: ЗАО «Геоинформмарк». 1999. – С. 76–87.

12. Полянин В. С., Ведерников Н. Н., Полянина Т. А., Козлов А. П. Геологическое строение и история формирования Гальмознанского мафит-ультрамафитового массива // Отечественная геология. 2000. № 1, С. 44–52.

13. Сауков А. А. Геохимия ртути. Труды ИГН АН СССР. 1946. Вып. 76. – 128 с.

14. Селинов И. П. Изотопы. М.: Наука. 1970. Т. 1-2. – 1232 с.

15. Справочник химика. Т. 1 // Под ред. Б. П. Никольского. Л: Химия, 1966. – 1071 с.

16. Степанов В. А. Золото – побочный продукт эволюции ртути как элемента // Международный симпозиум по прикладной геохимии стран СНГ. – М., 1997. – С. 264–265.

17. Степанов В. А. Перспективы выявления золото-ртутных месторождений на Камчатке // Известия вузов. Геол. и разв. 2008. № 1, С. 29–34.

18. Степанов В. А., Трухин Ю. П. О возрасте Шанучского медно-никелевого месторождения Камчатки // ДАН, 2007, Т. 417, № 1, С. 84–86.

19. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д. Камчатская никеленосная провинция // ДАН. 2008. Т. 418, № 6, С. 802–805.

20. Федорчук В. П. Геология ртути. М.: Недра, 1983. – 240 с.

21. Bainbridge K. T., Nier A. O. Relative isotopic abundances of the elements // Prelim Report Nuclear Ser. / Washington, 1950, № 9. **ТАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, профессор, vitstepanov@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 168–179.

V. A. Stepanov

PLATINO-GOLD-MERCURY AND COPPER-NICKEL METALLOGENIC SPECIALIZATION OF KAMCHATKA

It is shown that the mineralization of the triad of elements No. 78, 79 and 80 – platinum, gold and mercury, neighboring according to the table by D. I. Mendeleev, as well as their analogues by subgroups (nickel, copper). A description of the deposits of these metals is given. An analysis of the natural isotopic composition of the triad elements is carried out. The most interesting is the unstable isotope ^{197}Hg , which, by the electron capture reaction, turns into a stable ^{197}Au isotope. The presence of complex deposits (copper-nickel, gold-mercury, gold-silver), as well as impurities of elements of some subgroups in the ores of others, indicate the geochemical proximity of the deposits of the metals in question. The age range of the formation of Kamchatka

mineralization from the Late Cretaceous to the Neogene is long with a certain order from the earlier platinum to the later copper, copper-nickel, gold-silver and mercury.
Key words: platinum, gold, mercury, nickel, copper, isotopes, deposits, metallogeny.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-168-179

AUTHOR

Stepanov V. A., Doctor of Geological-mineralogical Sciences, Senior Researcher, Professor, vitstepanov@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Gladyshev V. P., Levickaya S. A., Filippova L. M. *Analiticheskaya himiya rtuti* (Analytical chemistry of mercury). Moscow: Nauka. 1974. 116 p.
2. Kozlov A. P., Chanturiya V. A. *Platinosoderzhashchie dunitovye rudy i ih obogatimost'* (Chanturia and Platinum ore dunite and their obogatimost). Moscow: URAN IPKON RAN. 2009. 148 p.
3. Konstantinov M. M. *Zolotorudnye provincii mira* (Gold provinces of the world). Moscow: Nauchnyj mir. 2006. 358 p.
4. *Koryaksko-Kamchatskij region – novaya platinonosnaya provinciya Rossii* (The Koryak-Kamchatka region – a new platinum province of Russia). pod red. V. P. Zajceva, A. F. Litvinova, E.H.A. Landy. SPb: VSGEI. 2002. 383 p.
5. Malyshev V. M., Rummyanov D. V. *Zoloto* (Gold). Moscow: Metallurgiya. 1979. 288 p.
6. *Metallogeniya rtuti* (Metallogeny of mercury). pod red. V. I. Smirnova, V. A. Kuznecova, V. P. Fedorchuka. Moscow: Nedra. 1976. 255 p.
7. Mochalov A. G., Zajcev V. P., Percev A. N., Vlasov E. A. *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*. 2002. no 3, pp. 212–238.
8. Nekrasov B. V. *Osnovy obshchej himii* (Principles of general chemistry): v 2-h tomah. Moscow: Himiya. 1974. T.2. 688 p.
9. Okrugin V. M. *Novye dannye o vozraste i genezise ehptermal'nyh mestorozhdenij zony perekhoda kontinent – okean* (New data on age and Genesis of epithermal deposits in the transition zone continent – ocean). Geodinamika, magmatizm i minerageniya kontinental'nyh okrain Severa Pacifiki. Magadan. 2002. T. 3. pp. 36–40.
10. Petrenko I. D. *Zoloto-serebryanaya formaciya Kamchatki* (Gold-silver formation of Kamchatka). Petropavlovsk-Kamchatskij. 1999. 116 p.
11. Poletaev A. V. *Kamchatsko-Karyakskij platinonosnyj pojas* (Kamchatka-Caracci platinum-bearing belt). Platina Rossii. T. 3, kn. 1. Moscow: «Geoinformmark». 1999. pp. 76–87.
12. Polyani V. S., Vedernikov N. N., Polyani T. A., Kozlov A. P. *Otechestvennaya geologiya*. 2000. no 1, pp. 44–52.
13. Saukov A. A. *Trudy IGAN AN SSSR*. 1946. Vyp. 76. 128 p.
14. Selin I. P. *Izotopy* (Isotopes). Moscow: Nauka. 1970. T. 1-2. 1232 p.
15. *Spravochnik himika* (The chemist's Handbook), tom 1. Pod red. B. P. Nikol'skogo. Leningrad: Himiya, 1966. 1071 p.
16. Stepanov V. A. *Zoloto – pobochnyj produkt ehvolucii rtuti kak ehlementa* (Gold is a byproduct of the evolution of mercury as an element). Mezhdunarodnyj simpozium po prikladnoj geohimii stran SNG. Moscow, 1997. pp. 264–265.
17. Stepanov V. A. *Perspektivy vyyavleniya zolotortutnyh mestorozhdenij na Kamchatke* (Prospects of the gold-mercury deposits on the Kamchatka Peninsula). Izvestiya vuzov. Geol. i razv. 2008. no 1, pp. 29–34.
18. Stepanov V. A., Truhin Yu.P. *DAN*, 2007, t. 417, no 1, pp. 84–86.
19. Truhin YU.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D. *DAN*. 2008. T. 418, no 6, pp. 802–805.
20. Fedorchuk V. P. *Geologiya rtuti* (Geology of mercury). Moscow: Nedra, 1983. 240 p.
21. Bainbridg K. T., Nier A. O. *Relative isotopic abundances of the elements*. Prelim Report Nuclear Ser. Washington, 1950, no 9.

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАМЧАТКИ И ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ

Приведено описание сульфидных медно-никелевых месторождений, расположенных на Камчатке и западном побережье Северной Америки. Своеобразие месторождений заключается в приуроченности к небольшим интрузиям, дайкам и силам базит-ультрабазитового состава. Рудные тела представляют собой трубообразные (pipe-like), столбообразные, линзовидной, пластообразной или жиллообразной формы тела вкрапленных, прожилковых и массивных сульфидных руд. В составе руд преобладают пирротин, халькопирит, пентландит и минералы благородных металлов. Содержания никеля в рудах нередко высокое и достигает 5–7 %. Ni/Cu отношение меняется от 1 до 7,0. Палладий и платина отмечаются в количестве от десятых долей до первых грамм на тонну, отношение Pt/Pd от 0,3 до 0,9.

Ключевые слова: медно-никелевое месторождение, рудное тело, сульфиды, платина, палладий.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-180-190

В пределах Камчатки находится в эксплуатации месторождение Шануч с богатыми по содержанию никеля сульфидными рудами. Оно принадлежит платиноидно-медно-никелевой формации, являющейся главным мировым источником никеля, меди и платиноидов [2, 4]. Для целей прогнозирования и поисков медно-никелевых месторождений в пределах Камчатки, необходимо знание основных геолого-структурных особенностей и состава руд не только месторождения Шануч, но и зарубежных месторождений, расположенных в сходных геолого-структурных условиях на западном побережье Северной Америки (рис. 1).

Месторождение Шануч расположено в северной части Камчатской никеленосной провинции на склоне горы Верхняя Тхонжа, служащей водоразделом между р. Ича и ее притоком р. Шануч [6, 7]. Это среднее по запасам никеля и меди месторождение, отличающееся богатыми по содержанию никеля массивными сульфидными медно-никелевыми рудами с относительно бедными содержаниями элементов платиновой группы.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 180–190.

© В. А. Степанов, 2017.

Район месторождения сложен кристаллическими сланцами и гнейсами камчатской серии. На флангах месторождения они перекрыты метатерригенными образованиями хейванской свиты. Метаморфические толщи прорваны интрузиями дорудного кругогоровского комплекса гнейсовидных плагиогранитов и гнейсогранитов, а также пострудными интрузиями кольского гранит-плагиогранитного комплекса.

Никеленосными являются малые интрузии, дайки и силлы амфиболовых, биотит-амфиболовых меладiorитов, габбро, пироксенитов, горблендитов и кортландитов дукукского комплекса, возраст которого по данным абсолютного возраста оценивается как эоценовый [5]. Ряд сближенных интрузий этого комплекса вытянут в субширотном направлении. Мощность отдельных интрузий – от первых метров до 150–200 м. Падение их преимущественно в южных румбах под углами 45–70°, нередко встречаются участки вертикального или крутого наклона на север.

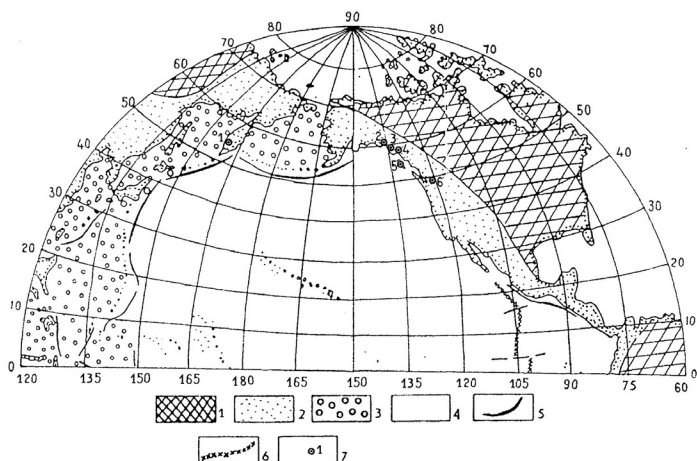


Рис. 1. Месторождения никеля в северном сегменте Тихоокеанского рудного пояса, тектоническая основа по [1]: 1 – древние платформы, 2 – складчатые и складчато-глыбовые структуры Тихоокеанского подвижного пояса, 3 – окраинные моря, 4 – котловины океанов, 5 – глубоководные желоба, 6 – осевая зона срединно-океанических хребтов, 7 – сульфидные медно-никелевые месторождения и их номера (1 – Шануч, 2 – Брэди Глейсер, 3 – Богемия Базин и Мирроу Харбор, 4 – Фунтер Бей, 5 – Снайп Бей, 6 – Прайд оф Эмори)

Месторождение представлено пучком субвертикально ориентированных рудных тел, сопряженных с интрузиями неправильной формы и дайками дукукского комплекса, размещение которых контролируется разрывными нарушениями. Наблюдается сложная жиллообразная, штокообразная и линзовидная форма рудных тел, сложенных сульфид-

ными медно-никелевыми рудами. Характерной особенностью рудных тел является зональное строение. Центральная их часть, как правило, сложена массивными сульфидными рудами или состоит из серии сближенных зон с прожилковым, пятнистым или брекчиевидным оруденением. Жилы массивной текстуры нередко оконтурены зонами брекчиевидных и брекчиевидно-прожилковых руд, которые сменяются к периферии прожилковыми и вкрапленными.

На месторождении наиболее изучено рудное тело № 1. Оно имеет сложную, серповидную форму в горизонтальном сечении с размерами 120x50 м и прослежено на глубину около 320 м. В вертикальном разрезе рудное тело линзовидное, с раздувом в центральной части. В состав рудных минералов входят, главным образом, пирротин, пентландит и халькопирит. Менее развиты виоларит, пирит, сфалерит, магнетит, а также редкие – борнит, халькозин, ковеллин, линнеит, зигенит, маккинавит, полидимит, миллерит, молибденит, леллингит, кобальтин, брейгауптит, ульманит и мелонит. Из минералов благородных элементов отмечаются самородное золото, сперриллит, котульскит, майченерит и изоферроплатина. Руды содержат высокие содержания никеля (первые проценты), меди и кобальта (десятые доли процента). Содержания золота, палладия и платины достигают десятых долей грамма на тонну.

Наибольшие содержания промышленно ценных компонентов наблюдаются в массивных рудах. Среднее содержание в них (вес. %): никеля – 7,58, меди – 1,1, кобальта – 0,19, золота – 0,32 г/т, сумма платиноидов составляет 0,73 г/т при преобладании палладия (0,53 г/т). Отношение никеля к меди равно 7, палладия к платине – 3,3.

Месторождения Северной Америки

Месторождение Брэди Глейсер расположено в Якутатском рудном районе в пределах Национального парка Брэди Глейсер (Аляска). Оно было открыто в 1958 г. компанией Фремонт Майнинг. Месторождение локализовано в основании одноименного ледника, выступая на поверхность в виде нескольких скал. Вмещающими породами служат обнажающиеся в нунатаках перидотиты и габбро массива Криллион-Лапероуз третичного возраста. Массив внедрен в амфиболовые и биотитовые метаморфические сланцы. Интрузия и вмещающие породы рассечены дайками и неправильной формы телами габбро, диоритов и аплитов. Сульфидное медно-никелевое оруденение расположено среди перидотитов, состоящих из форстерита и энстатита. Вторичные минералы представлены тремолитом, серпентинитом и эпидотом. Перидотиты вмещают линзы крупнозернистых габбро и габбро-пегматитов, которые также содержат сульфидное медно-никелевое оруденение. Дай-

ки габбро, диоритов и аплитов, мощностью до 1,5 м являются секущими по отношению к слоям перидотитов.

Месторождение состоит из стратифицированных протяженных зон со штокверковым и вкрапленным сульфидным оруденением. Зоны до 120 м мощности содержат до 10 % сульфидов. Зоны с массивными сульфидными рудами мощностью до 3 м расположены локально, особенно около контакта габброидов и ультрабазитовых кумулатов. Основное рудное тело имеет трубкообразную форму. Оно прослежено на глубину около 550 м при диаметре около 240 м.

Рудные минералы встречаются среди всех пород, исключая аплиты, но преобладают в измененных перидотитах и габбро. Они образуют вкрапленность, прожилки и лентообразные массы мощностью до 4,5 м в диаметре и 10 м длиной. Массивные сульфидные ленты составляют около 15 % оруденения. Преобладающими сульфидами являются гексагональный и моноклинный пирротин, пентландит и халькопирит. Алтаит, кубанит и никелин встречаются в меньших количествах. Борнит, маккинавит и виоларит сформированы в результате вторичных реакций между первичными сульфидными фазами. Из редких минералов отмечаются грейгит, кобальтин, иридарсенид, роарсит, осарсит, ирарсит, никель-висмут-палладиевый теллурид, палладий-висмутовый теллурид и палладивый теллурид.

Возраст месторождения, определенный Ar-Ar методом, олигоценный и составляет 30 млн лет [13].

Запасы руды (measured class) на 1983г. составляют 90 млн т с содержанием 0,5 % никеля и 0,3 % меди. То есть 450 тыс. т никеля и 270 тыс. т меди. Отношение Ni/Cu = 1,7 [9]. Руды содержат низкие концентрации Pd – 0.20г/т, Pt – 0.11г/т, Pt/ Pd = 0,55 [12, 13].

Месторождение Богемиа Базин расположено на острове Якоби, в 130 милях к западу от г. Джуно (Аляска). Оно было открыто в 1920 г. Район месторождения сложен интрузиями основного состава формации Лапероуз третичного возраста, состоящими из норитов, габбро, диоритов и кварцевых диоритов, переходящих друг в друга. Они прорывают меловые метавулканические и метаосадочные породы, а также амфиболиты и гнейсы палеозоя.

Месторождение состоит из рудных тел с вкрапленными и прожилково-вкрапленными рудами, содержащими пирротин, пентландит и халькопирит. Из них 48 % приходится на пирротин, 35 % на пентландит и 17 % на халькопирит. Кроме перечисленных сульфидов отмечаются бравоит, марказит и магнетит. Рудные тела располагаются в нерасслоенных (массивных) штоках норитового состава или залегают на контакте их с вмещающими породами параллельно этому контакту [15, 20, 22].

Наиболее изучены три рудных тела: Базин, Таканис и Флэпджек. Рудное тело Базин залегает в мафических и ультрамафических породах и имеет эллипсоидальную в плане воронкообразную форму. Рудные тела Таканис и Флэпджек крутонаклонные и имеют неправильную пластинчатую форму [16].

Согласно [16] месторождение содержит 20,1 млн. т руды категории «indicated» и «inferred» с содержанием 0,31 % никеля, 0,18 % меди и 0,04 % кобальта. То есть 62,3 тыс. т никеля, 36,2 тыс. т меди и 8 тыс. т кобальта. Суммарное содержание палладия, платины и родия в базитах формации Лапероуз составляет 0,18 г/т, в сульфидах и сульфидных концентратах медно-никелевых руд достигает 1,2-1,5 г/т [12].

Месторождение Миррор Харбор расположено на острове Чичагов (Аляска). Оно открыто в 1911г. Месторождение приурочено северной части интрузива габбро-норитового состава, вытянутого в северо-западном направлении на 1,5 км при ширине от 300 до 600 м. Интрузив расположен внутри крупного штока диоритов третичного (?) возраста, прорывающего зеленокаменные породы и метаморфизованные граувакки мелового возраста.

В габбро-норитах располагаются три рудных тела. В двух из них выявлены массивные сульфидные руды, в третьем – вкрапленные. Среди сульфидов преобладают пирротин, пентландит и халькопирит. В первом трубкоподобном рудном теле запасы богатой руды составляют 7,3 тыс. т с содержанием никеля 1,6 % и меди 0,90 % [9, 16]. Во втором плитообразном рудном теле запасы руды составляют несколько тонн с меньшими содержаниями никеля и меди. Третье рудное тело содержит 900 тыс. т бедной руды с содержанием никеля 0,172 % и меди 0,049 %.

Месторождение Фунтер Бей открыто в 1886г, эксплуатировалось в период с 1895 по 1939г. Оно расположено на северной оконечности острове Адмиралти (Аляска) в 18 милях к западу от г. Джуно. Рудовмещающим является силл базитов, мощностью около 40м. Он погружается в восточном направлении под углом в 38°. Вмещающими породами служат мрамора, филлиты, графитистые филлиты и зеленосланцевые породы различного состава. Возраст вмещающих пород палеозойский. Силл представлен оливинным габбро, состоящим из лабрадора, оливина и пироксена. Они частично замещены серицитом, карбонатами, бурой роговой обманкой, серпентинитом, тальком, биотитом и хлоритом. Количество вторичных минералов – 12 %. Рудных минералов менее 2 %. Они представлены магнетитом, а также сульфидами – пирротинном, пентландитом, халькопиритом с примесью виоларита и пирита. Примерное соотношение рудных мине-

ралов следующее: пирротин – 66,2 %, магнетит – 17,1 %, халькопирит – 11,4 %, пентландит – 5,3 %. Из гипергенных минералов отмечается лимонит.

По данным [14], месторождение представлено вкрапленностью сульфидов (пирротина, пентландита и халькопирита) в оливин-горнблендитовом габбро вблизи основания габбро-норитовой трубки позднего мезозоя. Остаток трубки содержит намного меньше сульфидов. Трубка сечет кварц-сланцевые сланцы палеозойского или триасового возраста.

В руде содержится 0,34 % никеля, 0,35 % меди и 0,14 % кобальта. Содержание золота достигает 1г/т, элементы платиновой группы не установлены [14, 19]. Месторождение мелкое. Запасы руды составляют 560 тыс. т, никеля и меди по 2 тыс. т.

Месторождение Прайд оф Эмори, называемое также **Джиант Никель**, **Джиант Маскот**, **Пацифик Никель** и **Вестерн Никель** расположено в юго-западной части Британской Колумбии (Аляска). Оно было открыто в 1923г.

Район месторождения сложен метаосадочными и метавулканическими породами раннекарбонového или пермского возраста. Их прорывает ряд интрузивов базит-гипербазитового состава, слагающих Никелевый пояс, вытянутый в северо-западном направлении. Среди них выделяется крупный батолит Опоссум диоритового состава, внутри которого располагается ряд штокообразных тел ультрабазитов. Они представлены пироксенитами и роговообманковыми перидотитами (кортландитами, дуниты редки. Ультраосновные тела подвержены дроблению и вторичным изменениям, выраженным в появлении талька, магнетита и роговой обманки. Рудные тела располагаются внутри штоков базит-ультрабазитового состава и имеют крутонаклонную трубкообразную форму. Штоки с сечением до 0.5 мили в диаметре состоят из пироксенитов с ядерной частью, выполненной перидотитами и краевой фацией пегматитовых горнблендитов [10]. Внутри штоков отмечаются блоки метаморфических пород палеозойского возраста. Возраст диоритового массива Спруссум составляет 80 млн. лет (поздний мел). Ультрабазитовые интрузивные породы, несущие медно-никелевую сульфидную минерализацию, имеют K-Ar возраст от 95 до 120 млн. лет (ранний мел) и являются ранней фазой диоритового плутона.

Трубкаподобные рудные тела имеют протяженность по вертикали от 30 до 360 м при сечении от 75 на 40 м до 6 на 8 м. Они делятся на два типа: зоны с рассеянными сульфидами и градиационными границами и тела массивных сульфидов с резкими контактами, приуроченные к разломам или контактовым зонам.

Медно-никелевая минерализация встречается в виде рассеянных, прожилковых и массивных скоплений сульфидов. Среди сульфи-

дов преобладают пирротин, пентландит и халькопирит, в меньшем количестве находятся пирит и сфалерита. Пирротин встречается как в магнитной моноклиальной, так и в немагнитной гексагональной форме. Пирротин и пентландит являются первыми сульфидными минералами, кристаллизовавшимися из сульфидного расплава. Халькопирит и пирит следуют за ними при понижении температур расплава. В небольшом количестве находятся троилит, магнетит, аргентопентландит, маккиनावит, кубанит, кобальтит, герсдорфит и никелин. Из минералов элементов платиновой группы обнаружены меренскит, мончеит, палладиевый мелонит и фрудит [17]. Среди гипергенных минералов отмечаются лимонит, халькозин, ковеллин, виоларит, мелантерит и моренозит.

В 1958–74 гг. на месторождении из 26 рудных тел добыто 4,7 млн т руды, содержащей 26,8 тыс. т никеля и 12,7 тыс. т меди [11]. Кроме того, в 1971–73 гг. добыто 140 т кобальта, 16,5 кг серебра и 1,0 кг золота [18]. Среднее содержание никеля в руде составляет 0,77 %, меди – 0,34 %, кобальта до 0,1 %. Концентрация благородных металлов составляет (в г/т): платина – 0,713, палладий – 0,893, золото – 0,379.

Месторождение Снайп Бей расположено на западном побережье острова Баранов, Аляска в 46 милях к юго-западу от г. Ситка. Оно было открыто в 1922 г. Район месторождения сложен биотитовыми кварцитами и биотит-кварцевыми сланцами раннемелового возраста. Они прорваны различными интрузивами мелового или третичного возраста. Рудоносными являются габбро-нориты, состоящие из коричневой роговой обманки и плагиоклаза с примесью магнетита и апатита. Сульфидные минералы образуют рассеянную вкрапленность, шпирь, тонкие прожилки, иногда массивные выделения. Содержания их колеблются от 1 % до почти 100 %. Они представлены пирротинном, в меньшей степени пентландитом и халькопиритом, реже встречается пирит [21].

Массивные сульфиды слагают небольшое тело, длиной 3,6 м и шириной 1,2 м. Оно прослежено на глубину 1,8 м и вмещает около 30 т богатой руды с содержанием 3,67 % никеля и 2,87 % меди. Данные о содержании платиноидов отсутствуют. В целом прогнозные ресурсы месторождения оцениваются в 390 млн т руды с содержанием 0,3 % никеля, 0,3 % меди, 4,5 г/т серебра, то есть по 1,17 млн т никеля и меди [9].

Обсуждение результатов

В пределах северного сегмента Тихоокеанского рудного пояса располагается ряд сульфидных медно-никелевых месторождений. В настоящее время разрабатывается среднее по запасам месторождение Шануч (Камчатка). Месторождения западного побережья Се-

верной Америки были открыты, главным образом, в начале XX века и в большинстве своем отработаны или законсервированы. Исключение составляет не отработанное месторождение Брэди Глейсер, находящееся в пределах Национального парка Аляски. Своеобразие этой группы месторождений заключается в том, что они приурочены к нерасслоенным малым интрузиям, дайкам и sillам базит-ультрабазитового состава, в отличие от большинства медно-никелевых сульфидных месторождений, располагающихся в крупных расслоенных ультрабазитовых плутонах. Рудовмещающие интрузии сложены, главным образом, оливиновыми габбро, норитами, пироксенитами, горнblendитами и амфиболовыми перидотитами (кортландитами). Дуниты в составе этих интрузий редки. Рудные тела представляют собой трубообразные (pipelike), столбообразные, линзовидной, пластообразной или жиллообразной формы тела вкрапленных, прожилковых и массивных сульфидных руд. В составе руд преобладают пирротин, пентландит и халькопирит, менее развиты линнеит, виоларит, пирит, магнетит и группа минералов благородных металлов. Содержания никеля в рудах нередко высокое и достигает 5-7 % на месторождении Шануч. Концентрация меди обычно ниже, отношение Ni/Cu меняется от 1 до 7,0. Среди благородных металлов преобладают палладий и платина в количестве от десятых долей до первых грамм на тонну. Отношение Pt/Pd колеблется от 0,3 до 0,9.

Интрузии и синхронное с ними медно-никелевое оруденение имеют возрастной диапазон от мезозоя до кайнозоя. К мезозою относится месторождение Прайд оф Эмори мелового возраста. Самые молодые – третичные месторождения палеоцен-олигоценового возраста (Шануч, Брэди Глейсер, Богемия Базин, Мирроу Харбор). Месторождения от мелких с запасами от первых тысяч до десятков тысяч тонн (Богемия Базин, Мирроу Харбор, Прайд оф Эмори) до средних, запасы которых составляют сотни тысяч тонн (Брэди Глейсер).

В работах [2, 3] отмечается, что исследуемые месторождения связаны с массивами норит-кортландитовой формации, развитыми в мобильной зоне перехода Тихий океан – Азиатский континент. Норит-кортландитовая глубинная формация отличается стабильным парагенезисом – оливин-магматический амфибол. Приближенные оценки температуры кристаллизации кортландитовых магм оцениваются в интервале 925-1150°, а давление в 6,3-8 кбар. В формационном отношении кортландиты вместе с ассоциирующими с ними габброидами относятся к группе никеленосных габбро-перидотитовых массивов, отличаясь от них несовершенной стратификацией, обусловленной более мобильными тектоническими условиями магмоконтролирующих структур.

Заключение

Для сульфидных медно-никелевых месторождений, расположенных в пределах Камчатки и западного побережья Северной Америки, характерна приуроченность к небольшим интрузиям, дайкам и силам норит-кортландитовой формации. Рудные тела представляют собой трубообразные, столбообразные, линзовидной, пластообразной или жиллообразной формы тела вкрапленных, прожилковых и массивных сульфидных руд. В составе руд преобладают пирротин, пентландит и халькопирит, менее развиты линнеит, виоларит, пирит, магнетит и группа минералов благородных металлов. Содержания никеля в рудах нередко высокое и достигает 5-7 %. Ni/Cu отношение меняется от 1 до 7,0. Паладий и платина отмечаются в количестве от десятых долей до первых грамм на тонну, отношение Pt/Pd от 0,3 до 0,9.

На выявление новых медно-никелевых месторождений в пределах Камчатки наиболее перспективны территории Шанучского и Кувалорогского рудных районов Камчатской никеленосной провинции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев Б. И.* Геологическое строение и происхождение Тихого океана. Владивосток: Дальнаука. 2009. 560 с.
2. *Додин Д. А., Чернышев Н. М., Яцкевич Б. А.* Платинометалльные месторождения России. – СПб: Наука. 2000. – 755с.
3. *Зимин С. С.* Формация никеленосных роговообманковых базитов Дальнего Востока. – Новосибирск: Наука СО. 1973. – 90с
4. *Лихачев А. П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
5. *Степанов В. А., Трухин Ю. П.* О возрасте Шанучского медно-никелевого месторождения // ДАН. 2007. Т. 417, № 1, с.84-86.
6. *Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д.* Камчатская никеленосная провинция // ДАН. 2008. Т. 418, №6, с. 802-805.
7. *Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е.* Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5, с. 75-81.
8. *Aho A. E.* Geology and Genesis of ultrabasic nickel-cobalt-pirrotite Deposits at the Pacific Nickel Property, southwestern British Columbia // Econ. Geol. 1956. № 51, pp. 444-481.
9. *Baggs D. W., Northam M. J., Meyer M. P., Maas K. M.* Selected Significant Mineral Deposits in Alaska. United States Department of the Interior. Information Circular 9177. 1988. 129p.
10. *Clark W. E.* Giant Maskot Mines Ltd., geology and ore control // Western Miner. 1969, v. 42, pp. 40-46.
11. *Christopher P. A.* Giant Maskot Mine (92H/6), British Columbia // Fieldwork, British Columbia Department of Mines and Petroleum Resources, 1974, pp. 17-21.

12. *Czamanske G. K., Haffy J. and Nabbs S. W.* Pd, Pt and Rh analysis and beneficiation of mineralized mafic rocks from the LaPerous layered gabbro, Alaska. *Economic Geology*, 1981, v. 76, p. 2001-2011.

13. *Himmelberg G. R., Loney R. A.* Petrology of the ultramafic and gabbroic rocks of the Brady Glacier nickel-copper deposit, Fairweather range, southeastern Alaska. U. S. Geological Survey Professional Paper. 1981, № 1195. 26p.

14. *Holt S. P., Moss J. M.* Exploration of nickel-copper-cobalt deposit at Funter Bay Admiralty Island, Alaska // US department of the interior, Bureau of mints. 1946. 15p.

15. *Kennedy G. C., Walton M. S.* Nickel Investigations in Southeastern Alaska. U. S. Geol. Survey Bull. 947-C, 1946, pp. 39-64.

16. *Kimball A. L.* Mineral Land Assessment of Yakobi Island and Adjacent Parts of Chichagoff Island, Southeastern Alaska. BuMines MLA 97-82, 1982, 199pp.

17. *Manor M. J., Scoats J. S., Nixon G. T., Ames D. E.* Platinum-group mineralogy of the Giant Maskot Ni-Cu-PGE deposit // British Columbia Geological Survey Paper, 2014, pp. 141-156.

18. *Pincent R. H.* Ni-Cu-PGE Potential of the Giant Maskot and Codburn Ultramafic-Mafic Bodies, Harrison-Hope Area, Southwestern British Columbia // British Columbia Geological Survey Paper, 2002, pp. 211-236.

19. *Reed J. C.* Nickel-copper Deposit at Funter Bay Admiralty Island, Alaska // US Department of the Interior. Geol. Surv. 1942. Bul. 936-O, pp. 349-361.

20. *Reed J. C., Dorr J. van N.* Nickel Deposits of Bohemia Basin and Vicinity, Yakobi Island, Alaska. U. S. Geol. Survey Bull. 931-F. 1942, pp. 105-138.

21. *Reed J. C., Gates G. O.* Nickel-copper deposit at Snipe Bay Baranov Island, Alaska. United States Department of Interior. Bulletin 936-M. Washington, 1942. 16p.

22. *Walton M. S., Kennedy G. C.* Magnetic exploration of the nickel-copper deposits of Bohemia Basin, southeastern Alaska // *Econ. Geol.* 1945, v. 40, no 7, pp. 496-50. **VIAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, vitstepanov@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 180–190.

V. A. Stepanov

CHARACTERISTIC FEATURES OF COPPER AND NICKEL DEPOSITS OF KAMCHATKA AND WESTERN COAST OF NORTH AMERICA

A description is given of sulfide copper-nickel deposits located on Kamchatka and the west coast of North America The peculiarity of the deposits is in the confinement to non-stratified

small intrusions, dikes and sills of basite-ultrabasic composition. Ore bodies are pipelike, pillarike, lenticular, plate-like or vein-shaped body of interspersed, vein-bearing and massive sulphide ores. In the composition of ores, pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite and minerals of noble metals. The content of nickel in ores is often high and reaches 5-7 %. The Ni / Cu ratio varies from 1 to 7.0. Palladium and platinum are noted in amounts ranging from tenths to the first gram per tonne, the ratio of Pt / Pd from 0.3 to 0.9.

Key words: copper-nickel deposit, ore body, sulphides, platinum, palladium.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-180-190

AUTHOR

Stepanov V. A., Doctor of Geological-mineralogical Sciences, Senior Researcher, professor, vitstepanov@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Vasil'ev B. I. *Geologicheskoe stroenie i proiskhozhdenie Tihogo okeana* (Geological structure and origin of the Pacific ocean). Vladivostok: Dal'nauka. 2009. 560 p.
2. Dodin D. A., Chernyshev N. M., Yackevich B. A. *Platinometal'nye mestorozhdeniya Rossii* (Platinum metal deposits of Russia). Saint Petersburg: Nauka. 2000. 755 p.
3. Zimin S. S. *Formatsiya nikelenosnyh rogoobmankovykh bazitov Dal'nego Vostoka* (Formation of Nickel of hornblende rocks in the Far East). Novosibirsk: Nauka SO. 1973. 90 p.
4. Lihachev A. P. *Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorozhdeniya* (Platinum-copper-Nickel and platinum deposits). Moscow: EHslan, 2006. 496 p.
5. Stepanov V. A., Truhin YU.P. *DAN*. 2007. T. 417, no 1, pp. 84-86.
6. Truhin YU.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D. *DAN*. 2008. T. 418, no 6, pp. 802-805.
7. Truhin YU.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D., Kungurova V. E. *Rudy i metally*. 2009. no 5, pp. 75-81.



СОСТАВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ФУНДАМЕНТА КОЛПАКОВСКОГО ПОТЕНЦИАЛЬНО НИКЕЛЕНОСНОГО РАЙОНА

Приведены результаты петрографических исследований, выполненных в среднем течении бассейна р. Колпакова в Колпаковском потенциально никеленосном районе Камчатской никеленосной провинции. Объектом исследования явились метаморфические породы, отобранные из колпаковской и камчатской серий в коренных обнажениях.

Ключевые слова: потенциально никеленосный район, провинция, фундамент, метаморфическая серия, изотопный возраст.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-191-203

Метаморфические породы колпаковской и камчатской серий широко развиты в пределах Камчатской никеленосной провинции, слагая фундамент Шанучского, Дукукского и Колпаковского никеленосных районов. Более древняя колпаковская серия обнажается в ядерной части структур, а породы камчатской серии ее обрамляют. Петрография, минералогия, геохимия, условия формирования метаморфических комплексов и их возраст ранее изучались многими исследователями [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. При этом установлено следующее.

Колпаковская метаморфическая серия. По составу серия делится на две метаформации – слюдяных и амфиболовых плагиогнейсов. Метаформация слюдяных плагиогнейсов представлена мигматизированными биотитовыми, гранат-биотитовыми, двуслюдяными, гранат-кианит-биотитовыми, гранат-кианит-силлиманит-двуслюдяными плагиогнейсами, мигматитами, линзами будинированных амфиболитов. Мощность около 2000 м.

Метаформация амфиболовых плагиогнейсов представлена амфиболовыми, гранат-силлиманит-биотитовыми, гранат-кианит-биотитовыми мигматизированными плагиогнейсами, амфиболитами, мигматитами. Мощность – 700 м.

С образованиями камчатской метаморфической серии контакты тектонические. По возрасту формирования протолита единого мнe-

ния нет. Разными методами получено большое количество различных датировок. К настоящему времени имеются U-Pb датировки (млн. лет) по цирконам из плагиогнейсов: архей (2800–2500), ранний протерозой (2100–1700), поздний протерозой (моложе 1000), юра–ранний мел (150–120). Самые молодые обломочные цирконы раннемеловые (120–96 млн лет). Возраст метаморфизма определяется в 77 и 47–53 млн лет, Rb–Sr-вые изохронные определения [9, 10] дают раннемеловой возраст метаморфизма – 140–127 млн лет, возраст протолита – позднепротерозойский.

Камчатская метаморфическая серия разделена на две формации – микрогнейсов и высокоглиноземистых кристаллических сланцев. Первая сложена гранат-биотитовыми, биотитовыми, двуслюдяными микрогнейсами, вторая – ставролит-гранат-биотитовыми, мусковит-биотитовыми мигматизированными кристаллическими сланцами. Граница между метаформациями проводится по смене состава. Мощность образований метаформации микрогнейсов около 1600, кристаллических сланцев – 1700 м.

Sm-Nd датировки определяют возраст протолита в интервале от 0,95 до 1,17 млрд лет, что соответствует позднему протерозою. По Rb–Sr изохронным определениям время главного этапа метаморфизма – 136–127 млн лет [10].

Фактический материал и методика проведения работ

Нами изучены метаморфические породы колпаковской и камчатской серий, развитые в бассейне среднего течения р. Колпакова и являющиеся фундаментом Колпаковского потенциально никеленосного района.

В среднем течении р. Колпакова, в районе устья ее левого притока р. Поперечной ранее были закартированы метаформация слюдяных плагиогнейсов колпаковской серии, а также метаформации микрогнейсов и высокоглиноземистых кристаллических сланцев камчатской серии [12]. Породы смяты в серию складов северо-восточной ориентировки с преимущественно крутым падением крыльев складов. Они прорваны небольшими интрузиями гранитоидов крутогоровского комплекса раннемелового возраста. Контакты блока метаморфических пород с более молодыми терригенными образованиями мелового возраста, а также зеленокаменными породами алисторского комплекса того же возраста тектонические.

Из коренных обнажений осенью 2008 г. нами были отобраны образцы и пробы неизмененных метаморфических пород из колпаковской серии в верховьях р. Поперечной, левого притока р. Колпаковой (К-35-1, К-36-1), метаформации высокоглиноземистых сланцев камчатской серии (К-38-1, К-39-1, К-39-2) и метаформации микро-

гнейсов камчатской серии (К-30-1, К-31-1, К-32-1) на правом и левом борту р. Колпакова (рис. 1). Из образцов изготовлены шлифы для просмотра под микроскопом. Пробы были издроблены до фракции <1 мм, часть их истерта, другая часть промыта на лотке для получения искусственного шлиха. Шлих был разделен на магнитную, электромагнитную, тяжелую и легкую фракции. Из тяжелой немагнитной фракции под биноклем отобраны монофракции цирконов. Истертая часть проб использована для изучения силикатного состава пород.

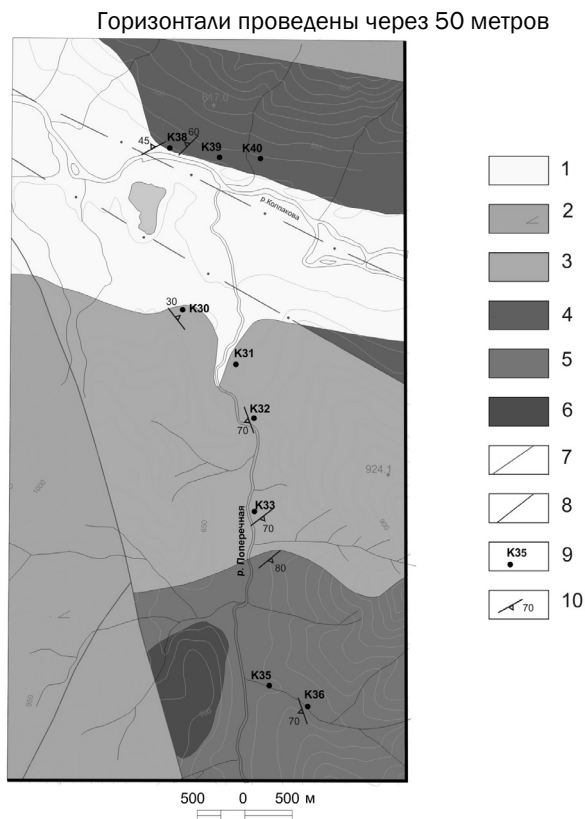


Рис. 1 Схематическая геологическая карта (на основе материалов ГГК-200 000, Сидоренко В. И., 1999 [12]): 1 – четвертичные отложения; 2 – алисторская свита; 3 – камчатская метаморфическая серия: метаформация микрогнейсов; 4 – камчатская метаморфическая серия: метаформация высокоглиноземистых кристаллических сланцев; 5 – колпаковская метаморфическая серия: метаформация слюдяных плагиогнейсов; 6 – крутогорский комплекс гнейсоплагиогранитовый; 7 – разломы; 8 – геологические границы; 9 – место и номер отбора проб; 10 – элементы залегания

Результаты петрографических исследований Колпаковская серия

По результатам петрографического изучения в составе метаморфических образований колпаковской серии выделены гранат-двуслюдяные плагиогнейсы, гранат-силлиманит-биотитовые и силлиманит-гранат-биотитовые кристаллические сланцы.

Гранат-двуслюдяной плагиогнейс представляет собой серую или темносерую породу с ясно выраженной кристаллизационной сланцеватостью. Он состоит (шл. К-34-1, К-35-1, К-37-1) из резко неравномернозернистых (0,02–1 мм) кристаллов плагиоклаза (50 %), кварца (35 %), биотита, мусковита (в сумме 10 %), мелких зерен граната, скоплений рудного минерала. Структура лепидогранобластовая, обусловленная тем, что наряду с большим количеством слюды, дающей пластинчатые формы, присутствуют изометричные зерна полевого шпата и кварца с зубчатыми ограничениями. Большая часть пластинок слюды ориентирована субпараллельно, но встречаются отдельные пластинки, ориентировка которых не совпадает с общим направлением. Гранат почти бесцветный, с обилием микроскопических включений рудной сыпи.

Силлиманит-гранат-биотитовый плагиогнейс (шл. К-36-1) представляет собой темно-серую сланцеватую породу. Она состоит из порфиробласт олигоклаза размером до 6 мм, мелких индивидов альбит-олигоклаза (в сумме 60 %), резко неравномернозернистого (0,02–1 мм) кварца (25 %), яркого красновато-коричневого биотита (10 %), сноповидных агрегатов силлиманита (фибrolита), рудной сыпи и единичных зерен граната.

Структура пойкилопорфиробластовая и лепидогранобластовая, обусловленная тем, что наряду с большим количеством слюды, дающей пластинчатые формы, присутствуют изометричные зерна полевого шпата и кварца с зубчатыми ограничениями. Большая часть пластинок слюды ориентирована субпараллельно, но встречаются отдельные пластинки, ориентировка которых не совпадает с общим направлением. Гранат почти бесцветный, с обилием микроскопических включений рудной сыпи, образует скелетные зерна. Фибролит тесно ассоциирует со слюдой.

Гранат-силлиманит-биотитовый плагиогнейс (шл. К-36-2) – это серая и темно-серая сланцеватая порода, состоящая из следующих минералов – порфиробласт олигоклаза размером до 6 мм, мелких индивидов альбит-олигоклаза, почти не содержащих включений (в сумме 60 %), резко неравномернозернистого (0,02–1 мм) кварца (15 %), яркого красновато-коричневого биотита (20 %), сноповидных агрегатов игольчатого силлиманита, рудной сыпи и единичных зерен граната.

Структура лепидогранобластовая, обусловленная тем, что наряду с большим количеством слюды, дающей пластинчатые формы, присутствуют изометричные зерна полевого шпата и кварца с зубчатыми ограничениями. Большая часть пластинок слюды ориентирована субпараллельно, но встречаются отдельные пластинки, ориентировка которых не совпадает с общим направлением. Текстура полосчатая вследствие перемежаемости полос мощностью до 3 мм, сложенных преимущественно салических минералами и слоев, обогащенных слюдой и фибролитом.

Гранат почти бесцветный, образует изометричные ксеноморфные зерна размером до 5 мм. Характерно обилие включений рудной сыпи и кварца по периферии зерен.

Камчатская серия

В камчатской серии, главным образом, развиты ставролитсодержащие кристаллосланцы и микрогнейсы. В метаморфации микрогнейсов это гранат-ставролит-биотитовые кристаллические сланцы, гранат-ставролитовые двуслюдяные и ставролит-биотит-плагиоклазовые микрогнейсы. Метаморфация высокоглиноземистых сланцев представлена гранат-биотит-ставролитсодержащими и гранат-ставролитовыми кристаллическими сланцами, а также гранат-ставролитовыми двуслюдяными кварцито-гнейсами. В породах присутствует большое количество прожилков, линз, обособлений кварца.

Гранат-биотитовый ставролитсодержащий кристаллический сланец представляет собой темно-серую сланцеватую породу. Она состоит (шл. К-38-1) из первичных минералов: олигоклаза (35 %), кварца (20 %), биотита (7 %), единичных зерен граната, ставролита, турмалина, рудного и более поздних: альбита (15 %), кварца (20 %), калиевого полевого шпата (менее 1 %), мусковита (2 %), серицита, хлорита, рудного и единичных зерен турмалина.

Структура лепидогранобластовая, гетеробластовая обусловленная тем, что наряду с ориентированными зернами слюды присутствуют изометричные зерна плагиоклаза и кварца. Более поздние калиевый полевой шпат и кварц разъедают зерна первичных минералов, создавая элементы коррозионной структуры.

Размеры салических минералов варьируют в широких пределах: от микроскопических до первых мм. Плагиоклаз мутный, содержит многочисленные включения биотита, мусковита, кварца. Намечаются признаки первичной зональности. Слабо сосюритизирован, альбитизирован.

Кварц имеет зубчатые границы и волнистое погасание.

Биотит оранжево-бурый. Замещается мусковитом и хлоритом с выделением рудного минерала.

Гранат розовый. Образует плохо ограненные зерна. Содержит включения биотита и кварца. У отдельных зерен наблюдаются каймы, обогащенные включениями кварца и рудного вещества.

Гранат-ставролит-двуслюдяной кристаллический сланец – сланцеватая порода темного цвета, сложенная (шл. К-39-1) крупными (до 1,5 мм) изометричными ксеноморфными индивидами полевого шпата (60 %), мозаичными скоплениями кварца (30 %), единичными зернами апатита. Среди них присутствуют реликты (от 0,05 до 1мм) мелкозернистых скоплений кварца, плагиоклаза, биотита, которые представляют собой биотитовый плагиогнейс и фрагменты полос, сложенных крупночешуйчатым биотитом и мусковитом, к которым тяготеют крупные (до 1 мм) зерна граната, ставролита и рудная сыпь.

Оранжево-бурый биотит частично или полностью хлоритизирован. Гранат розовый, ксеноморфный, интенсивно трещиноватый. Содержит включения кварца. Центральные части зерен чистые, краевые насыщены рудной сыпью. Ставролит золотисто-желтый, свежий, с единичными включениями кварца.

Реликты таких полос, размером до 3 мм по длинной оси, почти нацело замещенные минералами основной ткани, наблюдаются повсеместно по всей массе породы. Изогнутость полос отражает первичную складчатость метапелитов.

Структура лепидогранобластовая, гетеробластовая, текстура полосчатая.

Гранат-ставролитовый двуслюдяной кварцитогнейс – это плотная, серого цвета порода (шл. К-40-1). Она сложена крупными (до 1,5 мм) изометричными ксеноморфными индивидами полевого шпата (40 %), мозаичными скоплениями кварца с зубчатыми краями (40 %), единичными зернами граната и ставролита. Зерна полевых шпатов и кварца окаймлены агрегатами средне- и мелкочешуйчатого бурого биотита, мусковита, кварца и альбита. К ним тяготеют скопления мелких зерен розового граната, золотисто-желтого ставролита и рудная сыпь.

Структура лепидогранобластовая, гетеробластовая, метасоматическая. Текстура линзовидно-полосчатая.

Гранат-ставролит-биотитовый кристаллический сланец состоит (шл. К-32-1) из пойкилопорфиروبластовой основной массы, на фоне которой располагаются порфиробласты (около 40 % породы) размером до 0,3 мм. Они представлены, в основном, разноориентированным бурым биотитом, переполненным микроскопическими включениями углисто-глинистого вещества. По периферии зерен биотита сохраняются реликты хлорита. В качестве порфиробласт наблюдаются также изометричные зерна почти бесцветного, слабо розоватого граната. Основная ткань сложена микроскопическими индивидами

кварца, бурого биотита, углисто-глинистого и рудного вещества. Присутствуют единичные кристаллы силлиманита и турмалина.

Гранат характеризуется наличием реакционных кайм и неоднородностью состава. Каймы шириной до 0,08 мм состоят из сростаний розового граната альмандинового ряда, кварца и углисто-глинистого вещества. Центральные части зерен имеют менее интенсивную окраску (почти бесцветные) и более высокий рельеф, свидетельствующие о более высокой железистости минерала центральных частей зерен по сравнению с периферическими.

Ставролит золотисто-желтый, содержит многочисленные микроскопические включения углисто-глинистого материала основной ткани и, в меньшей степени, кварца. Образует зерна размером до 0,2 мм и их сростания.

Ставролит-биотит-плаггиоклазовый микрогнейс (шл. К-31-1). Основная ткань сложена мелкими (до 0,3 мм) изометричными зернами плаггиоклаза (60 %), кварца (30 %) и субпараллельно ориентированными чешуйками оранжево-бурого биотита (10 %), которые создают лепидогранобластовую структуру породы. На фоне основной ткани выделяются полосы шириной 1,5–2 мм, сложенные удлиненными индивидами крупночешуйчатого оранжево-бурого биотита и мусковита при подчиненной роли последнего, зернами граната и ставролита, скоплениями углисто-глинистого вещества и рудного минерала.

Чередование прослоев различного состава отражает первичную слоистость породы, состоявшей из песчаных и глинистых прослоев. Все слои изогнуты в складку. На ее крыльях отмечаются параллельные трещины, заполненные среднечешуйчатым биотитом, указывающие на наличие кливажа. В одном из крыльев складки гранат-ставролит-двуслюдяные прослои постепенно сближаются и соединяются с крупным (до 2 мм) кумулобластом, образуя фигуру вращения. Кумулобласт, включающий крупночешуйчатый биотит, мусковит, гранат и ставролит, расположен внутри зоны шириной до 1,5 мм, сложенной значительно более крупными, чем в основной ткани, зернами плаггиоклаза, кварца, граната и ставролита. В межзерновых промежутках формируется нерешетчатый микрокин. Границы зоны нечеткие. Структура породы здесь лепидогранобластовая с элементами мирмекитовой.

В шлифе отчетливо наблюдаются по две генерации основных пороодообразующих минералов:

- розовый гранат альмандинового ряда + золотисто-желтый ставролит + биотит + мусковит + плаггиоклаз + кварц;
- бесцветный гранат альмандин-гроссулярового ряда + золотисто-желтый ставролит + биотит + мусковит + плаггиоклаз + кварц.

Гранат первой генерации образует плохо ограненные зерна и их скопления. Характерно обилие включений рудного и углистого вещества основной ткани, которые сохраняют первичное полосовое расположение, создавая фрагменты гелицитовой структуры. Типична дуговая и кольцевая форма зерен с гломеробластами биотита основной ткани внутри дуг и колец, свидетельствующая о начале формирования скрученного граната.

Гранат второй генерации присутствует внутри кумулобласти в центральных частях кольцевых зерен граната первой генерации и характеризуется почти полным отсутствием включений и изометричной формой зерен.

Ставролит первой генерации образует плохо ограненные зерна и их скопления в прослоях, сложенных слюдами. Индивиды часто вытянуты и изогнуты согласно изгибам слоев. Характерно обилие включений рудного и углистого вещества основной ткани, которые сохраняют первичное полосовое расположение, создавая фрагменты гелицитовой структуры.

Ставролит второй генерации как и гранат второй генерации входит в состав кумулобласти. Характеризуется почти полным отсутствием включений и хорошей огранкой.

Гранат-ставролит-двуслюдяной микрогнейс (шл. К-30-1) состоит из плагиоклаза (45–50 %), кварца (25–30 %), биотита, мусковита, граната и ставролита в примерно равных соотношениях (в сумме 8–10 %), незначительного количества калиевого полевого шпата, турмалина, апатита и рудного минерала (< 3 % каждого).

Изометричные зерна первичных олигоклаза № 20 (до 0,5 мм) и кварца (до 0,4 мм) вместе с пластинками слюд (до 0,5 мм) определяют лепидогранобластовую структуру породы. В интерстициях между первичными индивидами с зубчатыми краями расположены новообразования кварца, альбит-олигоклаза и решетчатого калиевого полевого шпата.

Гранат (размером до 1 мм) розовый, альмандинового ряда. Содержит единичные включения минералов основной ткани (плагиоклаз, кварц, биотит). Характерны реакционные каймы шириной до 0,08 мм, обогащенные минералами основной ткани с примесью рудного.

Ставролит золотисто-желтый, образует хорошо ограненные крупные (до 1,1 мм) кристаллы или скопления мелких (0,05–0,3 мм) зерен. Трещиноват, по трещинам замещен слюдой.

Оранжево-бурый биотит и мусковит равновесны. В незначительной степени замещаются, соответственно, агрегатами хлорита и эпидота с выделением рудного минерала и серицитом.

Кварц обеих генераций имеет волнистое погасание.

Таблица 1

Минералогический состав шлихов из протоколов шлуффных проб

Серия	№№ обр.	Содержание минералов (%)																										
		скпан	mt	il	gn	py	gr	a	sl	st	di	t	mz	ks	bi-m	bi	m	amf	gf	lm	c	ap	zr	r	q	f	au	
m gk	K-30-1	0,2	зн.	8,8	зн	30,0			25,5	зн.		1,4			7,0			зн.	зн.	зн.		2,5	зн.			25,8	зн.	
	K-31-1	1,1	0,2	35,0		32,3			18,3					1,1				зн.	зн.	зн.		0,6	зн.			10,0	зн.	
	K-32-1	0,1	зн.	5,0		26,0	зн		28,0					8,3				зн.	зн.	зн.		3,6	зн.			29,0	зн.	
s km	K-38-1	0,5		4,0		38,0			31,0		0,5				4,0	зн.		зн.	зн.	зн.		1,0	зн.			22,0		
	K-39-1	0,5	зн.	7,0		43,0			25,0	зн.					6,0			зн.	зн.	зн.		1,0	зн.			15,5	2,0	
	K-40-1	1,0	зн.	0,5		56,0			6,0		0,5				5,0	1,0		зн.	зн.	зн.		зн.	зн.			30,0	зн.	
g kl	K-35-1	зн.	зн.	зн.		87,4			1,8	зн.					зн.	зн.		зн.	зн.	зн.		зн.	зн.	0,2	9,5	зн.		
	K-36-1	0,2	зн.	2,1	зн	5,5			3,0	зн.					15,7					зн.		5,4	0,2			67,8		13н.

Примечание: метаморфиты камчатской серии mg km – микрогнейсы; s km – высокоглиноземистые кристаллические сланцы; колаковской серии: g kl – слюдяные плагиогнейсы; минералы: mt- магнетит; gn- галенит; py- пирит; gr- гранат; a- анатаз; sl- силлиманит; st- ставролит; di- диастен; t- турмалин; mz- монацит; ks-ксенотим; bi- биотит; m- мусковит; amf- амфибол; gf- графит; lm- лимонит; c- хлорит; ap- апатит; zr- циркон; r- рутил; q- кварц; f- полевой шпат; au- золото.

Таблица 2

**Содержание петрогенных (масс.%) и редких элементов (ppm)
в метаморфических породах**

Компоненты	mg km			s km			g kl	
	K-30-1	K-31-1	K-32-1	K-38-1	K-39-1	K-40-1	K-35-1	K-36-1
SiO ₂	66,5	65,2	66,8	65,4	66,5	71,1	65,6	58,2
TiO ₂	0,905	0,874	0,809	1,28	0,845	0,572	0,856	1,31
Al ₂ O ₃	15,8	14,8	16,5	13,3	16,2	11,9	15,4	16,9
Fe ₂ O ₃	0,074	<0,01	<0,01	1,18	0,079	<0,01	2,1	<0,01
FeO	5,76	7,9	6,77	6,16	6,34	6,77	4,64	8,7
MnO	0,136	0,082	0,162	0,116	0,108	0,761	1,01	0,11
CaO	1,61	1,1	0,667	1,49	1,22	0,954	1,39	2,14
MgO	1,83	2	2,38	2,33	2,33	2,13	2,12	3,02
Na ₂ O	2,67	1,97	1,38	2,63	2,56	1,95	2,33	3,01
K ₂ O	1,8	2,12	1,63	2,78	1,87	1,67	2,21	2,83
P ₂ O ₅	0,239	0,2	0,287	0,258	0,125	0,155	0,0878	0,317
nnn	2,58	3,59	2,6	2,97	1,77	1,82	2,02	3,39
Sum	99,9	99,84	99,985	99,894	99,95	99,782	99,764	99,93
S	0,021	0,047	0,0348	0,00574	0,021	<0,005	<0,005	0,003
F	0,065	0,047	0,0734	0,113	0,047	0,237	0,262	0,067
Rb	91	88	85	97	91	100	88	137
Ba	490	505	415	591	426	414	579	523
Sr	262	210	179	248	281	162	196	255
V	154	161	171	169	184	108	144	190
Cr	327	413	357	352	348	447	454	234
Ni	34	28	30	44	44	96	72	48
Zr	226	234	219	247	229	176	173	372
Sc	16	18	15	23	16	15	18	22
Cu	38	44	70	58	57	41	25	53
Y	38	40	32	42	36	44	24	44
Yb	4	5	6	11	4	8	9	4
Co	61	108	21	48	58	34	35	30
Zn	129	105	97	182	142	124	134	179
Pb	18	17	15	21	18	21	21	18
Mo	0	0	0	0	0	1	1	0
Sn	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ga	23	31	27	26	37	19	23	31
Nb	11	15	13	15	15	13	8	17
Ge	3	2	1	1	1	2	1	1
As	0	2	0	0	0	0	0	0
La	21	24	15	28	19	21	25	22
Ce	71	75	52	60	61	74	78	80
Th	11	8	8	8	8	10	8	10

Примечание: Анализы проведены в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН на рентгенофлуоресцентном спектрометре «S4 PIONEER» (исполнитель А. О. Садовникова)

Минералогический состав шлихов из протолок штучных проб приведен в табл. 1. Основными породообразующими минералами являются кварц, гранат, биотит, мусковит, полевые шпаты.

В результате петрографического и минералогического анализа выявлено, что в метаморфитах камчатской серии типоморфным минералом является ставролит, наиболее низкотемпературный из высокоглиноземистых минералов, а в колпаковской – силлиманит, гораздо более высокотемпературный.

Силикатный состав исследованных пород камчатской и колпаковской серий приведен в табл. 2. По химическому составу существенных различий между ними не выявлено. О геохимическом единстве источников сноса, за счет которых формировались рассматриваемые образования, свидетельствуют и Sm-Nd изотопно-геохимические исследования [13]. Это отложения, формировавшиеся в едином окраинно-континентальном осадочном бассейне за счет размыва восточной окраины Азиатского континента, метаморфизованные в различных P-T условиях [1, 3, 4, 8, 14].

Цирконы, отобранные сотрудниками ГЕОХИ РАН и нами из пород колпаковской и камчатской серий на этой площади, проанализированы в лаборатории изотопного анализа ГЕОХИ РАН методом лазерной абляции для U-Pb изотопного датирования. Кроме того, для представительной коллекции проб был изучен изотопный состав неодима и стронция пород в целом [8]. Циркон из метаморфических пород колпаковской и камчатской серии (180 зерен из 6 проб) показал сложную картину распределения по возрасту. Большая часть значений U-Pb возраста заполнила диапазон от 72 до 100 млн лет, с постепенным убыванием плотности точек вплоть до 1 млрд лет. 16 зерен показали признаки более древнего возраста. Восемь точек тяготеют к линии с верхним пересечением ~1,8 млрд лет, ещё восемь – к линии с верхним пересечением 2,7 млрд лет. Эти тренды нельзя назвать дискордиями по причине большого разброса данных. Но, кроме молодых цирконов имеются две популяции более древних, с возрастом порядка 1,8 млрд лет и 2,7 млрд лет. Очевидно, что в составе колпаковской и камчатской серий присутствует вещество протерозойского и позднеархейского возраста, которое было в значительной мере преобразовано в ходе более молодых метаморфических событий [8]. Результаты исследования Rb-Sr и Sm-Nd систем показали, что породы древнего фундамента не вносят заметного вклада в источники островодужных расплавов Камчатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев М. М., Бондаренко В. Н. К вопросу о возрасте и генезисе метаморфических пород Центральной Камчатки // Советская геология. 1962. № 11. С. 98–105.

2. Ханчук А. И. Эволюция древней сиалической коры в островодужных системах восточной Азии. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1985. 138 с.

3. Тарарин И. А., Бадрединов З. Г., Чубаров В. М. Петрология и рудоносность метаморфических и магматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки. Владивосток: Дальнаука. 2015. 302 с.

4. Лучицкая М. В., Соловьев А. В., Хоуриган Дж.К. Два этапа формирования гранитоидов Срединного хребта Камчатки: их тектоническая и геодинамическая позиция // Геотектоника. 2008. № 4. С. 49–69.

5. Маракушев А. А., Мишкин М. А., Тарарин И. А. Метаморфизм Тихоокеанского пояса. М.: Наука. 1971. 134 с.

6. Тарарин И. А. Гранулиты колпаковской серии Срединного хребта Камчатки – миф или реальность? // Петрология. 2008. Т. 16. № 2. С. 227–224.

7. Тарарин И. А., Бадрединов З. Г. Геохимия и генезис метабазитов колпаковской серии Срединного хребта Камчатки // ДАН. 2014. Т. 456. № 2. С. 193–199.

8. Костицын Ю. А., Аносова М. О., Ревяко Н. М., Степанов В. А. Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов // Материалы V Российской конференции по изотопной геохронологии. 4–6 июня 2012 г., Москва ИГЕМ РАН С. 175–177.

9. Виноградов В. И., Григорьев В. С., Кастрыкина В. М. Возраст метаморфических пород фундамента Камчатки // Советская геология. 1991. № 7. С. 58–65.

10. Виноградов В. И., Григорьев В. С. Rb-Sr-возраст пород Срединного выступа Камчатки // ДАН. 1994. Т. 339. С. 645–649.

11. Сляднев Б. И., Шаповаленко В. Н., Крикун Н. Ф. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Камчатская. Лист N-57 – Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 187 с.

12. Сидоренко В. И., Селиванов М. Т., Лисович В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Хангарская. Лист N-57-XIV (г. Вершинная) Петропавловск-Камчатский, 1999.

13. Кузьмин В. К., Богомоллов Е. С. Источники метатерригенных толщ Срединно-Камчатского и Ганальского поднятий в свете новых Sm-Nd изотопных данных // Геотектоника. 2013. № 3. С. 87–96.

14. Hourigan J. K., Brandon M. T., Soloviev A. V. et al. Eocen arc-continent collision and crustal consolidation in Kamchatka, Russian Far East // Amer. J. Sci. 2009. V. 309/ n 5. P. 333–396. **ПТАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Степанов Виталий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, профессор, vitstepanov@yandex.ru,

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, kunwe@yandex.ru,

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 191–203.

V. A. Stepanov, V. Ye. Kungurova

THE COMPOSITION OF METAMORPHIC ROCKS OF BASAL COMPLEX OF THE KOLPAKOV POTENTIAL NICKELIFEROUS REGION

The results of petrographic studies carried out in a midstream basin of the Kolpakov river in the Kolpakov potential nickeliferous region of Kamchatka nickeliferous province are given. The exploration subject is the metamorphic rocks selected from Kolpakov and Kamchatka swarms in indigenous outcrops.

Key words: potential nickeliferous region, province, basal complex, metamorphic swarm, isotopic age.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-191-203

AUTHORS

Stepanov V. A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist, vitstepanov@yandex.ru,

Kungurova V. Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, kunwe@rambler.ru,

Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Lebedev M. M., Bondarenko V. N. *Sovetskaya geologiya*. 1962. no 11. pp. 98–105.
2. Hanchuk A. I. *Ehvolyciya drevnej sialicheskoj kory v ostrovoduzhnyh sistemah vostochnoj Azii* (Evolution of ancient sialic crust in island-arc systems of Eastern Asia). Vladivostok: DVNC AN SSSR. 1985. 138 p.
3. Tararin I. A., Badredinov Z. G., Chubarov V. M. *Petrologiya i rudonosnost' metamorficheskij i magmaticheskij kompleksov Central'noj i Vostochnoj Kamchatki* (Petrology and ore potential of magmatic and metamorphic complexes in Central and Eastern Kamchatka). Vladivostok: Dal'nauka. 2015. 302 p.
4. Luchickaya M. V., Solov'ev A. V., Hourigan Dzh.K. *Geotektonika*. 2008. no 4. pp. 49–69.
5. Marakushev A. A., Mishkin M. A., Tararin I. A. *Metamorfizm Tihookeanskogo poyasa* (Metamorphism of the Pacific rim). Moscow: Nauka. 1971. 134 p.
6. Tararin I. A. *Petrologiya*. 2008. T. 16. no 2. pp. 227–224.
7. Tararin I. A., Badredinov Z. G. *DAN*. 2014. T. 456. no 2. pp. 193–199.
8. Kosticyn YU.A., Anosova M. O., Revyako N. M., Stepanov V. A. *Geohronometricheskie izotopnye sistemy, metody ih izucheniya, hronologiya geologicheskijh processov* (Geochronometric isotope systems, methods of their study, the chronology of geological processes). Materialy V Rossijskoj konferencii po izotopnoj geohronologii. 4–6 iyunya 2012 g., Moscow IGEM RAN. pp. 175–177.
9. Vinogradov V. I., Grigor'ev V. S., Kastykina V. M. *Sovetskaya geologiya*. 1991. no 7. pp. 58–65.
10. Vinogradov V. I., Grigor'ev V. S. *DAN*. 1994. T. 339. pp. 645–649.
11. Slyadnev B. I., Shapovalenko V. N., Krikun N. F. i dr. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:1000 000 (tret'e pokolenie)* (State geological map Russian Federation, scale 1:1000 000 (third generation)). Seriya Koryaksko-Kamchatskaya. List N–57 – Petropavlovsk-Kamchatskij. Ob'yasnitel'naya zapiska. Saint Petersburg: VSEGEI, 2007. 187 p.
12. Sidorenko V. I., Selivanov M. T., Lisovich V. A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000* (State geological map Russian Federation, scale 1:200 000). Izdanie vtoroje. Seriya Hangarskaya. List N-57-XIV (g. Vershinnaya) Petropavlovsk-Kamchatskij, 1999.
13. Kuz'min V. K., Bogomolov E. S. *Geotektonika*. 2013. no 3. pp. 87–96.



ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ НИКЕЛЕНОСНОСТИ КАМЧАТКИ

Рассмотрены проблемы, возникающие при использовании электронных баз данных и геоинформационных систем в процессе исследований никеленосности Камчатки.

Ключевые слова: Камчатка, информационные технологии, методы, никеленосность, базы данных, ГИС.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-204-209

Введение

Более 20 лет в Научно-исследовательском геотехнологическом центре (НИГТЦ) ДВО РАН проводится комплекс исследований, направленных на изучение отдельных никеленосных объектов, разработку теоретических и научно-методических основ прогнозирования кобальт-медно-никелевых рудных районов, рудных полей и месторождений на территории Камчатки. На всех этапах работы вырабатывается подход к решению задач на основе использования современных информационных технологий, под которыми понимаются способы получения, переработки, передачи, хранения, отображения и представления справочно-аналитической информации, дальнейшей обработки и интерпретации с использованием компьютеров, специализированного программного обеспечения и сетей передачи данных. Одними из наиболее эффективных для обработки больших объемов геологической информации являются технологии геоинформационных систем (ГИС) и баз данных [2]. Их применение исключает избыточность и противоречивость информации, обеспечивает надежность ее хранения, а также возможности визуализации и анализа пространственных данных.

Этапы изучения никеленосных объектов

В процессе изучения отдельных никеленосных объектов Камчатки реализуются подходы, общепринятые для геологических исследований. Как правило, работа делится на несколько этапов:

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 204–209.

© С. В. Паламарь, Р. М. Новаков, 2017.

1. Подготовительный этап, на котором осуществляется сбор ретроспективных материалов и ознакомление с ними.

2. Полевые исследования, в ходе которых отбираются пробы пород и руд, проводятся необходимые измерения и формируется первичная документация.

3. Пополнение коллекции каменного материала.

4. Аналитические работы, обычно включающие в себя геохимические, минералогические, петрографические, минераграфические исследования.

5. Обработка информации, в процессе которой на основе полученных данных делаются научные выводы, обобщения и заключения, достигаются научные или практические результаты.

Формирование электронной базы первичных данных

При использовании информационных технологий первые четыре этапа исследований подразумевают создание базы первичных данных (БПД) и соответствующей ГИС. Вместе с тем, в настоящее время продолжается переходный период от «традиционных» приемов получения и обработки геологической информации, сложившихся еще до широкого применения вычислительной техники, к способам и методам, основанным на использовании информационных технологий. Такое сочетание неизбежно порождает ряд проблем, в основном касающихся перевода информации в электронную форму, так как значительная ее часть содержится на «бумажных» (не электронных) носителях. К ним относятся различные ретроспективные отчетные материалы, данные полевых наблюдений, и, в ряде случаев, результаты лабораторных исследований.

При документировании в процессе полевых работ обычно используются два подхода:

1. Вся документация ведется на бумажных носителях, а затем переводится в электронный вид для дальнейшей обработки.

2. Часть документации ведется на бумажных носителях, часть – в электронном виде, с использованием специализированных устройств и различных программ (например GPS-приемников).

Оба подхода подразумевают необходимость перевода всей первичной документации в электронную форму, что, как показывает практика, является достаточно трудоемким процессом. Это снижает ожидаемый эффект от использования БПД и ГИС и неизбежно приводит к накоплению ошибок. Кроме того, при проведении полевых геологических исследований по любой тематике трудности в использовании информационных технологий для ведения БПД часто возникают из-за неумения специалистов выстраивать технологический процесс, оптимальный с точки зрения возможностей современной техники и специализированного программного обеспечения. Это происходит как из-за недостаточного уровня подготовки в области специа-

лизированных информационных технологий у значительной части геологов [1], так и по причине отсутствия единого подхода к применению новых возможностей для ведения первичной документации.

В процессе полевых исследований никеленосных объектов специалистами НИГТЦ совершенствуются методы с применением сетевых технологий передачи информации и разделенным ведением БПД и ГИС первичных материалов, которые при наличии минимума необходимого оборудования (ноутбуки и электрогенератор) формируются уже в полевой период.

В целом, существенно экономить время при вводе полевой документации в БПД и ГИС может применение технологий, позволяющих регистрировать первичные данные непосредственно в электронной форме. Традиционные «бумажные» дневники полевых наблюдений, различные журналы опробования, листы топоосновы и т.д. необходимо заменить на планшетные компьютеры со специализированным программным обеспечением [3].

Проблемы другого рода возникают при вводе в БПД материалов уже существующих в цифровой форме, когда в рамках одного проекта используется большое количество разрозненных файлов различных форматов. Чаще всего это касается ретроспективных или вновь полученных аналитических данных из различных лабораторий. Как результат, значительное время тратится на подготовку и ввод этих данных, как, например, при создании в НИГТЦ базы данных Шанучского медно-никелевого месторождения [5] и ГИС «Квинум-Кувалорогская никеленосная зона [6].

Отчасти, вопросы совместимости файловых форматов решаются разработчиками программного обеспечения. Многие программы (ArcGIS, Global Mapper и др.) позволяют без применения каких-либо дополнительных операций экспорта-импорта использовать геоданные, созданные в самых различных программных продуктах и форматах.

Обработка полученных данных

Практика показывает, что результат использования баз данных и ГИС не всегда оправдывает ожидания, особенно в части обработки полученных данных. Нередко дальше формирования ГИС и применения ее справочно-демонстрационных возможностей дело не идет.

При изучении никеленосности применение аналитических возможностей геоинформационных систем прежде всего реализуется в процессе построения специализированных геологических карт и схем на основе содержащейся в ГИС первичной и ретроспективной информации. В качестве другого примера обработки пространственных геоданных с использованием ГИС можно привести линейный анализ и построение трехмерной модели территории с использованием геологических карт и космоснимков [6].

Применение ГИС возможно на различных уровнях организации вещества – как на уровне земной коры, так и на уровне пород и минералов. В последнем случае информационную систему следует рассматривать не как географическую, а как «микрографическую». При этом, для анализа вещественного состава пород и руд фотографии шлифов или аншлифов используются таким же образом, как космоснимки, топографические и геологические карты для исследований земной поверхности и недр.

В качестве примера можно привести использование в НИГТЦ метода определения объемного минерального состава и площади поверхности минералов и минеральных агрегатов в породах и рудах. При этом точечными анализами на микрозонде определены слагающие образцы руд и пород минералы и установлен их состав. В дальнейшем площадь каждого аншлифа была отсканирована на микрозонде «в лучах» отдельных элементов. С использованием программного комплекса ArcGIS полученные изображения были преобразованы в отдельные цветовые каналы. При этом, каждый минерал окрашивался своим псевдоцветом. Полученные растровые изображения в псевдоцветах были переведены в векторную форму. В итоге были сформированы цифровые «карты» аншлифов, где каждый полигональный объект оконтуривает отдельный минерал или минеральный агрегат. В полученных слоях этих карт содержится информация о соотношениях минералов и минеральных агрегатов, а в атрибутивных таблицах – сведения о площади и периметре каждого зерна минерала или минерального агрегата на поверхности аншлифа. Площадь характеризует объемный минеральный состав, а периметр – площадь поверхности минералов и минеральных агрегатов в породах и рудах. Близким примером применения возможностей ГИС для анализа на микроуровне могут служить исследования по изучению микроструктур и коллекторских свойств продуктивных пластов карбонатных пород, где для получения данных о распределении порового пространства применялись инструменты пространственной статистики ArcGIS [4].

Заключение

На всех этапах исследований как никеленосности территории Камчатки, так и отдельных объектов, в НИГТЦ вырабатывается и реализуется подход на основе использования баз данных и ГИС. Вместе с тем, в практике применения современных информационных технологий прослеживается ряд проблем, характерных для геологических исследований в целом:

– необходимость перевода первичной и ретроспективной документации в электронную форму, что, как показывает практика, является достаточно трудоемким процессом.

— недостаточный уровень подготовки геологов в области специализированных информационных технологий и, как следствие, неумение выстраивать технологический процесс, оптимальный с точки зрения возможностей современной техники и специализированного программного обеспечения

В основном эти трудности обусловлены затянувшимся переходным периодом от традиционных приемов получения и обработки геологической информации, сложившихся еще до широкого применения вычислительной техники, к способам и методам, основанным на использовании информационных технологий. Для решения этих проблем в НИГЦ совершенствуются алгоритмы документации первичной геологической информации, разрабатываются и используются методы обработки данных для решения научных и производственных задач с применением современных технических средств и специализированного программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блинов А. В., Паршин А. В.* Открытые геоинформационные технологии в системе подготовки специалистов-геологов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 1. № 1. С. 226–230.
2. *Девятова А. Ю.* // Представление геологических данных с помощью информационных технологий // Вычислительные технологии. Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН (Новосибирск). 2005. Т. 10. № 53. С. 32–38.
3. *Задорожный М. В., Лысов А. И.* АИС «Геобраз»: электронный дневник геолога // Информатизация и связь. М. 2013. № 5. С. 130–134.
4. *Кадыров Р. И., Чернова И. Ю.* Компьютерная обработка микрофотографий шлифов карбонатных пород с целью изучения микроструктур и коллекторских свойств продуктивных пластов // ArcReview Современные геоинформационные системы. М. ООО ДАТА+, 2010. № 3 (54) // Электронная версия онлайн. URL: http://www.dataplus.ru/Arcrev/Number_54/14_Shlif.html).
5. *Новаков Р. М., Таскин В. В., Сидоров М. Д., Паламарь С. В.* Разработка базы данных Шанучского месторождения (Камчатка) в среде Microsoft Access // Вестник Краунц. Серия: Науки о Земле. 2013. № 2 Выпуск № 22. С. 1–7.
6. *Таскин В. В., Новаков Р. М., Сидоров М. Д., Паламарь С. В.* ГИС-проект «Квинум-Кувалорогская никеленосная зона»: предпосылки разработки, структура, содержание никеленосная зона»: предпосылки, разработки, структура, содержание // Геоинформатика. 2013. № 3. С. 21–27.
7. *Таскин В. В., Сидоров М. Д., Паламарь С. В.* Оценка степени тектонической раздробленности земной коры на глубину по данным дешифрирования аэро- космоснимков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 9. С. 127–130. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Паламарь Сергей Владимирович – научный сотрудник, veterkam4@mail.ru,
Новаков Роман Михайлович – старший научный сотрудник, 6rom6@mail.ru,
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 204–209.

S. V. Palamar, R. M. Novakov

THE PROBLEMS OF INFORMATION TECHNOLOGIES APPLICATION IN RESEARCHES OF NICKELIFEROUS MINERALIZATION OF KAMCHATKA

The problems appearing with using database and geoinformation system in researches of nickeliferous mineralization of Kamchatka were considered in the article.

Key words: Kamchatka, information technologies, methodes, nickeliferous mineralization, databases, GIS.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-204-209

AUTHORS

Palamar S. V., Researcher, veterkam4@mail.ru,

Novakov R. M., Senior Researcher, 6rom6@mail.ru,

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Blinov A. V., Parshin A. V. *Interekspo Geo-Sibir*. 2016. T. 1. no 1. pp. 226–230.
2. Devyatova A. Yu. *Vychislitelnyye tekhnologii*. 2005. T. 10. № 53. S. 32–38.
3. Zadorozhnyy M. V., Lysov A. I. *Informatizatsiya i svyaz*. 2013. no 5. pp. 130–134.
4. Kadyrov R. I., Chernova I. Yu. *Kompyuternaya obrabotka mikrofotoGRAFIY shlifov karbonatnykh porod s tselyu izuchenii mikrostruktur i kollektorskiikh svoystv produktivnykh plastov* (Computer processing of micro-photographs of thin sections of carbonate rocks in order to study microstructures and collector properties of productive layers). *ArcReview Sovremennyye geoinformatsionnyye sistemy*. Moscow. OOO DATA+. 2010. № 3 (54) // *Elektronnaya versiya onlayn*. URL:http://www.dataplus.ru/Arcrev/Number_54/14_Shlif.html.
5. Novakov R. M., Taskin V. V., Sidorov M. D., Palamar S. V. *Vestnik KRAUNC. Nayki o Zemle*. 2013. no 2. Vyp. 22. pp. 91–97.
6. Taskin V. V., Novakov R. M., Sidorov M. D., Palamar S. V. *Geoinformatika*. 2013. no 3. pp. 21–27.
7. Taskin V. V., Sidorov M. D., Palamar S. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2014. no 9. pp. 127–130.



ОСАЖДЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАЯ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

На основании экспериментальных исследований показано, что при переработке продуктивных растворов сложного состава, полученных при бактериально-химическом выщелачивании кобальт-медно-никелевых руд осаждение железа может быть проведено карбонатом кальция. Установлено, что медь на $99,4 \pm 0,5$ % и железо на $84,5 \pm 2,5$ % уходят в осадок. После отделения осадка растворе остается $64,5 \pm 0,5$ % кобальта $68,0 \pm 3,0$ % никеля от исходного содержания. В промывные воды из осадка извлекается $35,5 \pm 0,1$ % кобальта и $32,0 \pm 3,0$ % никеля.

Ключевые слова: продуктивные растворы, железо, никель, карбонат кальция, кобальт-медно-никелевые руды, бактериально-химическое выщелачивание.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-210-215

В НИГТЦ ДВО РАН на укрупненной лабораторной установке чанового бактериально-химического выщелачивания (БХВ) руды месторождения Шануч, получены высококонцентрированные продуктивные растворы, которые, наряду с ионами цветных металлов никеля (II), кобальта (II), меди (II), содержат ионы железа (III), железа (II) и магния. Важным в вопросе переработки продуктивных растворов является отделение железа, содержание которого в 2–3 раза превышает содержание никеля. Ранее было показано, что осаждение железа целесообразно проводить при pH не более 4,0 [1, 2], чтобы предотвратить потери ценных компонентов с осадком основных солей железа. Как правило, осаждение трехвалентного железа из кислого продуктивного раствора производится путем нейтрализации раствора различными доступными и недорогими, нейтрализующими свободную кислоту материалами [5, 6]. Одним из общепринятых реагентов, применяемых для нейтрализации, является карбонат кальция. Главным условием является перевод всего имеющегося железа в трехвалентное состояние. Данная работа является продолжением комплексных исследований по извлечению ценных компонентов из про-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 210–215.

© Т. П. Белова, Л. С. Ершова, Т.И. Ратчина, 2017.

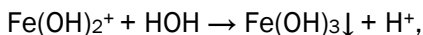
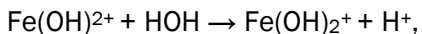
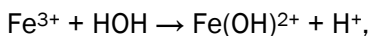
дуктивных растворов, промывных и сточных вод [1–4]. Целью настоящей работы является установление параметров осаждения железа из многокомпонентных продуктивных растворов БХВ кобальт-медно-никелевых руд с использованием карбоната кальция.

Для исследования были взяты реальные высококонцентрированные продуктивные растворы С–1 и С–2, имеющие $pH=2,0$, различающиеся по составу и детально описанные нами в [1, 2]. К растворам добавляли рассчитанное количество $CaCO_3$. Наблюдали выделение газа и формирование осадка. Значения pH фиксировали с помощью «Иономера–150 МИ» с точностью не хуже $\pm 0,02$. По истечении времени осадки отделяли фильтрованием через фильтр «синяя лента», двукратно промывали дистиллированной водой. В фильтрате и в осадках после отделения и растворения в $0,7$ М соляной кислоте, а так же в промывных водах определяли содержание ионов цветных металлов, железа, сульфат-ионов, ионов кальция и магния. Определение содержания меди, никеля, кобальта и магния проводили атомно-абсорбционным методом в ацетилено-воздушном пламени, на приборе ААС-6300 Shimadzu (Япония). Определение содержания кальция, железа (III) и железа (II) проводили трилометрически, содержание сульфат-ионов – гравиметрически с хлоридом бария.

Нейтрализация проходит по следующей схеме:



Далее при повышении pH раствора железо (III) гидролизует ступенчато:



Катионы $Fe(OH)^+$ и $Fe(OH)_2^+$, образующиеся на первой и второй стадиях гидролиза с присутствующими в растворе сульфат-ионами образуют нерастворимые основные соли, имеющие состав: $Fe(OH)SO_4$, $[Fe(OH)_2]_2SO_4$. Пока идет реакция гидролиза, и выделяются ионы водорода, необходимо добавлять новые порции карбоната кальция для их нейтрализации и стабилизации pH .

После добавления каждой порции реагента ($CaCO_3$), продуктивный раствор отстаивали в течение 30–100 мин и фиксировали фронт осаждения. При достижении необходимого значения pH наблюдали ярко выраженную границу между осветленной жидкостью и осадком. Скорость оседания осадка составила $8,3 \cdot 10^{-6}$ и $15,8 \cdot 10^{-6}$ м/с, для растворов С–1 и С–2, соответственно. Расход карбоната кальция в среднем составил $0,028 \pm 0,005$ кг на 1,0 кг продуктивного раствора.

При опробовании технологической схемы (рис. 1) отделения железа от продуктивного раствора методом регулирования pH с помощью карбоната кальция авторы проводили двукратное промывание осадков, при этом объем промывных вод на каждой стадии промывки был равен объему исходного продуктивного раствора. Таким образом, при переработке продуктивных растворов С-1 и С-2 после отделения осадка, получено по три раствора: А – основной раствор; Б – первые промывные воды; В – вторые промывные воды.

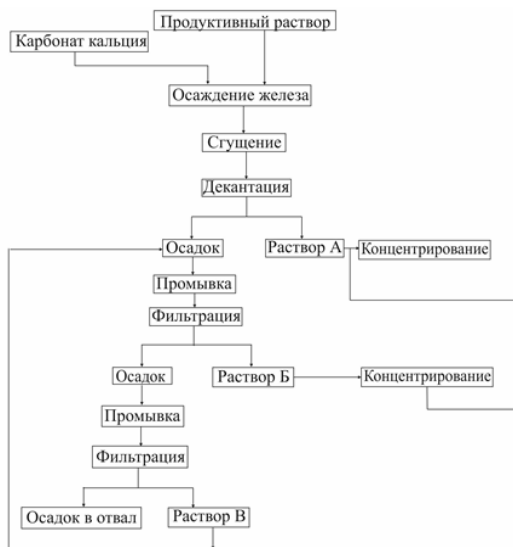


Рис. 1. Технологическая схема осаждение железа карбонатом кальция

Составы растворов А, Б и В для первого и второго продуктивных растворов приведены в таблице.

Анализ состава фильтрата и промывных вод и осадка показал, что в фильтрате остается $64,5 \pm 0,5$ % кобальта от исходного, $68,0 \pm 3,0$ % никеля, а $35,5 \pm 0,1$ % кобальта и $32,0 \pm 3,0$ % никеля теряется с промывными водами. При осаждении карбонатом кальция медь на $99,4 \pm 0,5$ % и железо в присутствии окислителя на $84,5 \pm 2,5$ % уходит в осадок.

Обращает на себя внимание тот факт, что при осаждении железа карбонатом кальция, продуктивные растворы существенно обогащаются кальцием. Так, содержание ионов кальция в исходном продуктивном растворе С-1 составляет 0,10 г/л, а в фильтрате после отделения осадка, образованного в результате осаждения карбонатом кальция трехвалентного железа, его содержание составило 0,51 г/л. Содержание

Состав растворов А, Б и В, полученных при переработке продуктивных растворов С-1 и С-2

Шифр раствора	Концентрация, мг/л						
	Ni ²⁺	Cu ²⁺	Co ²⁺	Fe _{общ.}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
С-1	4000	320	101	12000	100	470	43700
А-1	2840	2,32	64,5	1860	511	497	20560
Б-1	1022	0,42	32,4	1438	471	134	6340
В-1	138	0,06	3,8	149	450	26	1970
С-2	7430	340	210	13780	240	1410	54800
А-2	4996	6,92	137	2110	611	1540	35060
Б-2	2163	1,29	62,9	2228	513	481	11050
В-2	271	0,23	9,3	227	461	60	2450

ионов кальция в растворе С-2 до осаждения составляет 0,24 г/л и 0,61 г/л после осаждения ионов трехвалентного железа карбонатом кальция. Это может быть объяснено тем, что сульфат кальция, имея довольно высокое значение произведения растворимости ($PR = 2,5 \cdot 10^{-5}$), частично растворяется, кроме этого в многокомпонентных растворах на растворимость оказывает влияние солевой эффект. Содержание магния в исходном продуктивном растворе и в фильтрате не меняется и остается на уровне $0,47 \pm 0,05$ г/л в растворе С-1, и $1,41 \pm 0,14$ г/л в растворе С-2. Содержание сульфат ионов в растворе С-1 после осаждения снижается в 2 раза. Содержание сульфат-ионов в растворе С-2 снижается в 1,5 раза.

Таким образом, в результате применения карбоната кальция для нейтрализации продуктивных растворов БХВ получен осадок, состоящий из сульфата кальция и основных сульфатов железа, который может быть направлен в отвал после соответствующей промывки. Полученные растворы могут быть переработаны одним из известных способов. Растворы А-1 и А-2 подлежат дальнейшему концентрированию, например, с использованием сорбции или экстракции. Промывные воды Б-1 и Б-2, содержащие 1–2 г/л должны быть возвращены в технологический цикл для более полного извлечения ценных компонентов. Промывные воды В-1 и В-2 после соответствующей подготовки могут быть использованы для десорбции, или для первой промывки осадка или после сорбционной очистки могут быть сброшены в открытые водоемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова Т. П., Ершова Л. С., Ратчина Т. И. Гидролитическое осаждение их продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-

медно-никелевых руд. // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). Отдельный выпуск «Камчатка-5». – М.: Издательство «Горная книга». 2017. С. 216–221.

2. Белова Т. П., Ершова Л. С. К вопросу о переработке продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд // «Актуальные вопросы науки». М.: Издательство «Горная книга». 2017. – С. 177–179.

3. Белова Т. П., Гавриленко Ю. С., Ершова Л. С. // Адсорбция меди, никеля, кобальта и железа натуральным цеолитом из водных растворов в динамическом режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). Отдельный выпуск «Камчатка». – М.: Издательство «Горная книга», 2014. – С. 300–307.

4. Аленичев В. М., Уманский А. Б., Ключников А. М. Разработка технологии кучного выщелачивании окисленных никелевых руд уральских месторождений // Известия томского политехнического университета. 2013. – Т.322. – № 3. – С. 124–128.

5. Низов В. А., Машенко В. Н., Бакиров А. Р. Способ переработки медно-никелевого сернокислого раствора. Пат. 2449033 РФ. № 2010146023/02. Заявлено 11.11.2010. Опубликовано 27.04.2012. Бюл. № 12.

6. Нурми П. Каксонен А. Пухакка Я. Способ выделения железа из кислого раствора. Пат. 2493110 РФ. № 2011117096/05. Заявл. 13.10.2009. опубликовано 20.11.2012 Бюл. № 26. **ПАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Белова Татьяна Павловна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, trbel@yandex.ru,

Ершова Людмила Сергеевна – младший научный сотрудник, ludmila-ershova8@mail.ru,

Ратчина Татьяна Ивановна – ведущий инженер,
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 210–215.

T. P. Belova, L. S. Ershova, T. I. Ratchina

IRON PRECIPITATION FROM PRODUCTIVE SOLUTIONS OF BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING OF COBALT-COPPER- NICKEL ORES USING CALCIUM CARBONATE

On basis of experimental studies it was shown that during the processing of productive solutions of a complex composition, obtained during bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-nickel ores, iron precipitation can be carried out with calcium carbonate. It was found that

copper and iron are precipitated by $99.4 \pm 0.5 \%$ and $84.5 \pm 2.5 \%$, correspondingly. After precipitation separation, $64.5 \pm 0.5 \%$ of cobalt, $68.0 \pm 3.0 \%$ of nickel of the original content remain in the solution. $35.5 \pm 0.05 \%$ of cobalt and $32.0 \pm 3.0 \%$ of nickel are extracted from the precipitation into washings.

Key words: productive solutions, iron, nickel, cobalt-copper-nickel ores, bacterial-chemical leaching.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-210-215

AUTHORS

Belova T. P., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, tpbel@yandex.ru,
Ershova L. S., Junior Research Scientist, ludmila-ershova8@mail.ru,
Ratchina T. I., Lead Engineer,
Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Belova T. P., Ershova L. S., Ratchina T. I. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Otdelnyiy vyipusk «Kamchatka-5». 2017. pp. 216–221.
2. Belova T. P., Ershova L. S. *K voprosu o pererabotke produktivnykh rastvorov bakteri-alno-himicheskogo vyichelachivaniya kobalt-medno-nikelevykh rud* (To the question about the processing of productive solutions of bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-Nickel ores). «Aktualnyie voprosy nauki». Moscow. 2017. pp. 177–179.
3. Belova T. P., Gavrilenko Yu.S., Ershova L. S. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Otdelnyiy vyipusk «Kamchatka». 2014. pp. 300–307.
4. Alenichev V. M., Umanskij A. B., Klyushnikov A. M. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. T.322. no 3.pp. 124-128.
5. *Pat. 2449033 RF. № 2010146023/02*. Nizov V. A., Maschenko V. N., Bakirov A. R. Zayavleno 11.11.2010. Opublikovano 27.04.2012. Byul. № 12.
6. *Pat. 2493110 RF. № 2011117096/05*. Nurmi P. Kaksonen A. Puhakka Ya. Zayavl. 13.10.2009. Opublikovano 20.11.2012. Byul. № 26.



Т. П. Белова, Л. С. Ершова, Т.И. Ратчина

ГИДРОЛИТИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАЯ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

Приведены данные по экспериментальному изучению поведения цветных металлов и железа в растворах в зависимости от pH. Показано, что при переработке продуктивных растворов сложного состава, полученных при бактериально-химическом выщелачивании кобальт-медно-никелевых руд целесообразно осаждать железо при $\text{pH}=3,5\div 4,0$, после предварительного перевода всего железа в трехвалентное состояние.

Ключевые слова: продуктивные растворы, железо, никель, кобальт-медно-никелевые руды, бактериально-химическое выщелачивание.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-216-221

Камчатский край располагает значительными минерально-сырьевыми ресурсами для развития горнодобывающей промышленности. В настоящее время разрабатывается сульфидное кобальт-медно-никелевое месторождение Шануч. Однако, добытая руда перерабатывается за пределами региона. Развитие горно-перерабатывающей отрасли в регионе представляется актуальным. В НИГТЦ ДВО РАН ведутся исследования чанового бактериально-химического выщелачивания (БХВ) руды месторождения Шануч, получены высококонцентрированные продуктивные растворы, которые, наряду с ионами цветных металлов никеля (II), кобальта (II), меди (II), содержат ионы железа (III), железа (II) и магния. Остро стоит вопрос о переработке продуктивных растворов с целью получения готового продукта. Данная работа является продолжением комплексных исследований по извлечению ценных компонентов из продуктивных растворов, промывных и сточных вод [1, 2, 3]. Вопросы переработки кислых растворов, полученных различными способами обсуждается в литературе [4, 5]. Целью настоящей работы является установление параметров гидролитического осаждения железа из многокомпонентных продуктивных растворов БХВ кобальт-медно-никелевых руд.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 216–221.

© Т. П. Белова, Л. С. Ершова, Т.И. Ратчина, 2017.

Для исследования были взяты реальные высококонцентрированные продуктивные растворы, различающиеся по составу (табл. 1). Исследования проводили методом стандартных серий. К аликвотной части растворов из бюретки добавляли 1,0 н NaOH до требуемого значения pH: $\Delta pH=0,5$ ед., диапазон pH от 2,0 до 8,0. Значения pH фиксировали с помощью «Иономера–150 МИ» с точностью не хуже $\pm 0,02$. Наблюдали выпадение осадков гидроксидов металлов. По истечении времени осадки отделяли фильтрованием через фильтр «синяя лента», двукратно промывали дистиллированной водой. В фильтрате и в осадках после отделения и растворения в 0,7 М соляной кислоте определяли содержание ионов цветных металлов, железа, сульфат-ионов и ионов магния. Определение содержания меди, никеля, кобальта и магния проводили атомно-абсорбционным методом в ацетилено-воздушном пламени, на приборе AA-6300 Shimadzu (Япония). Определение содержания кальция, железа (III) и железа (II) проводили трилометрически, содержание сульфат-ионов – гравиметрически с хлоридом бария.

Таблица 1

Состав продуктивных растворов БХВ

№ раствора	pH	Концентрация, г/л							
		Ni ²⁺	Cu ²⁺	Co ²⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
№1	2,11	4,00	0,32	0,10	7,64	4,36	0,10	0,47	43,7
№2	2,18	7,43	0,34	0,21	11,6	2,18	0,24	1,41	54,8

Сопоставляя состав продуктивных растворов №1 и №2 видим, что они существенно отличаются по содержанию никеля и железа. Необходимо также отметить, что высокие содержания железа (II) свидетельствуют о замедлении реакции бактериально-химического выщелачивания (БХВ). Кинетика окисления железа (II) может быть обеспечена химическим либо бактериально-химическим методом. Кроме этого, для дальнейшей переработки продуктивных растворов требуется отделение железа от никеля, меди и кобальта. Известно, что наиболее распространенный метод отделения железа – это его осаждение в виде гидроксидов.



Известно также, что свежесаженный гидроксид железа обладает высокоразвитой поверхностью, благодаря чему вместе с ним соосаждаются и ионы цветных металлов. На рис. 1 показано изменение концентрации ионов металлов в растворе в зависимости от pH. Анализируя данные, представленные на рисунке, можно отметить, что вплоть до pH=4,0 не происходит значительного снижения концентраций ионов цветных металлов. Так концентрация ионов цветных

металлов снижается, %: никеля – на 5,1 и 5,3, кобальта – на 6,3 и 11,6, меди – на 10,7 и 20,2, соответственно, для первого и второго продуктивных растворов. В то время как содержание железа (III) снижается на 85 % в первом и 81 % во втором продуктивном растворе. Обращает на себя внимание тот факт, что содержание ионов железа(II) снижается всего лишь на 15–20 %.

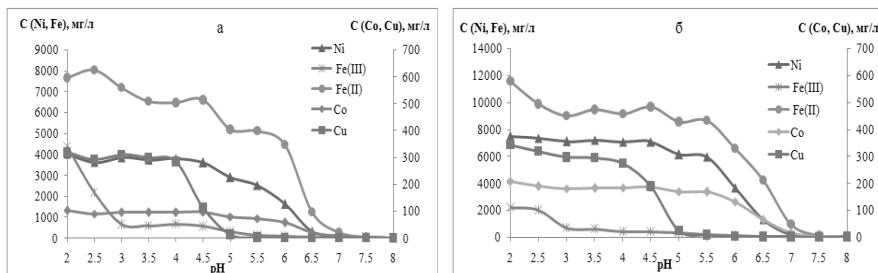


Рис. 1. Изменение концентраций ионов металлов в растворе в зависимости от pH: а – продуктивный раствор 1; б – продуктивный раствор 2

На рис. 2 изображено изменение концентраций ионов цветных металлов и железа в осадках, полученных из продуктивных растворов осаждением 1 и раствором гидроксида натрия и растворенных в соляной кислоте. Концентрация ионов цветных металлов и общего железа в осадке незначительно увеличивается до значения pH=4,0, далее наблюдается резкое увеличение концентраций ионов цветных металлов и общего железа. Увеличение концентраций ионов цветных металлов в осадке объясняется соосаждением их с основным сульфатом железа $Fe(OH)SO_4$, а также осаждением гидроксидов соответствующих металлов при достижении pH осаждения.

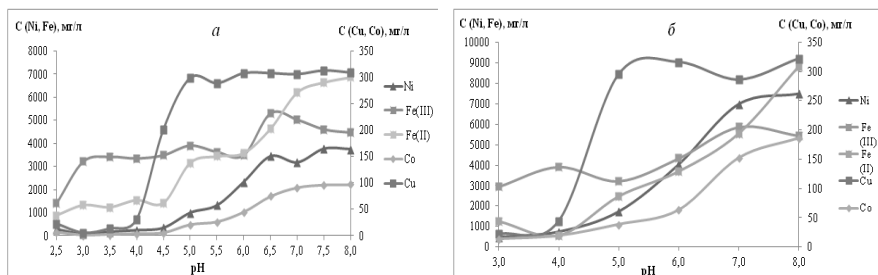
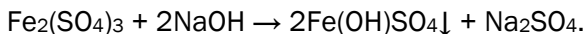


Рис. 2. Изменение концентраций ионов металлов в осадках после растворения в зависимости от pH: а – осадок, полученный при обработке продуктивного раствора 1; б – осадок, полученный при обработке продуктивного раствора 2

Снижается также количество сульфат-ионов, вероятно это происходит по схеме образования основной соли:



Практически полное осаждение для меди (II) происходит при достижении pH=6,0, остаточное содержание в растворе 1 составляет 0,7 мг/л, в растворе 2–2,8 мг/л. Осаждение кобальта заканчивается при pH=8,0, в растворе 1 его содержание < 0,3 мг/л, в растворе 2–1,65 мг/л. При pH=8,0 содержание никеля в растворе 1–6,67 мг/л, в растворе 2 – 12,4 мг/л.

Таблица 2

Изменение значений концентраций ионов магния и сульфат ионов в растворе в зависимости от pH осаждения

№ п/п	pH	Mg, г/л		SO ₄ ²⁻ , г/л	
		Раствор 1	Раствор 2	Раствор 1	Раствор 2
1	3,0	0,470	1,23	37,5	50,9
2	4,0	0,470	1,21	36,5	46,4
3	5,0	0,417	1,22	34,1	45,3
4	6,0	0,419	1,30	33,6	45,3
5	7,0	0,407	1,00	32,7	39,4
6	8,0	0,270	0,94	28,8	38,4

В таблице представлены изменения концентраций ионов магния и сульфат-ионов в растворе после гидролитического осаждения железа и цветных металлов. С повышением водородного показателя до pH=4,0 концентрация ионов магния в первом растворе не изменяется, во втором растворе снижается на 14,2 %. Снижение концентрации сульфат-ионов в этих условиях составляет 16,5 % в первом растворе и 15,3 % во втором растворе. Наиболее интенсивное снижение концентрации магния происходит при pH>8,0.

Таким образом, для удаления из продуктивных растворов БХВ железа рекомендуется сначала перевести все железо в трехвалентное состояние. Этого можно добиться либо химическим способом, используя сильные окислители, либо бактериально-химическим, используя дополнительную стадию после отделения продуктивного раствора от кека выщелачивания. Осаждение железа (III) для данного типа растворов необходимо проводить в диапазоне pH=3,5÷4,0 чтобы предотвратить потери ценных компонентов за счет соосаждения. После отделения железа растворы могут быть подвергнуты переработке одним из известных способов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова Т. П., Ершова Л. С. К вопросу о переработке продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд // «Актуальные вопросы науки». М.: ЗАО Горная книга. 2017. – С. 177–179.
2. Белова Т. П., Гавриленко Ю. С., Ершова Л. С. // Адсорбция меди, никеля, кобальта и железа натуральным цеолитом из водных растворов в динамическом режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). Отдельный выпуск «Камчатка». – М.: Издательство «Горная книга». 2014. – С. 300–307.
3. Belova T. P., Selivanova O. N. Adsorption of metal ions by sorbents composed of marine alga saccharina bongardiana and poriferous aluminosilicates // Journal of Environmental Science and Engineering. 2012. Т. 1. С. 514–522.
4. Низов В. А., Машенко В. Н., Бакиров А. Р. Способ переработки медно-никелевого сернокислого раствора. Пат. 2449033 РФ. № 2010146023/02. Заявлено 11.11.2010. Опубликовано 27.04.2012. Бюл. № 12.
5. Нурми П. Каксонен А. Пухакка Я. Способ выделения железа из кислого раствора. Пат. 2493110 РФ. № 2011117096/05. Заявл. 13.10.2009. опубликовано 20.11.2012. Бюл. № 26. **PLAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Белова Татьяна Павловна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, tpbel@yandex.ru,
Ершова Людмила Сергеевна – младший научный сотрудник, ludmila-ershova8@mail.ru,
Ратчина Татьяна Ивановна – ведущий инженер,
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analicheskii byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 216–221.

T. P. Belova, L. S. Ershova, T. I. Ratchina

HYDROLYTIC IRON PRECIPITATION FROM PRODUCTIVE SOLUTIONS OF BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING OF COBALT-COPPER-NICKEL ORES

The paper presents data of the experimental study of the behavior of non-ferrous metals and iron in solutions depending on pH. It is shown that during the processing of productive solutions of a complex composition, obtained during bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-nickel ores, it is reasonable to precipitate iron at pH 3.5 ÷ 4.0 after a preliminary transferring of all iron into the trivalent state.

Key words: productive solutions, iron, nickel, cobalt-copper-nickel ores, bacterial-chemical leaching.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-216-221

AUTHORS

Belova T. P., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, tpbel@yandex.ru,
Ershova L. S., Junior Research Scientist, ludmila-ershova8@mail.ru,
Ratchina T. I., Lead Engineer,
Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Belova T. P., Ershova L. S. *K voprosu o pererabotke produktivnyih rastvorov bakterialno-himicheskogo vyischelachivaniya kobalt-medno-nikelevyih rud* (To the question about the processing of productive solutions of bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-Nickel ores). «Aktualnye voprosy nauki». Moscow: Gornaya kniga. 2017. pp. 177–179.
2. Belova T. P., Gavrilenko Yu.S., Ershova L. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Otdelnyiy vyipusk «Kamchatka». 2014. pp. 300–307.
3. Belova T. P., Selivanova O. N. *Adsorption of metal ions by sorbents composed of marine alga saccharina bongardiana and poriferous aluminosilicates*. Journal of Environmental Science and Engineering. 2012. T. 1. pp. 514–522.
4. *Pat. 2449033 RF. № 2010146023/02*. Nizov V. A., Maschenko V. N., Bakirov A. R. Zayavleno 11.11.2010. Opublikovano 27.04.2012. Byul. no 12.
5. *Pat. 2493110 RF. № 2011117096/05*. Nurmi P. Kaksonen A. Puhakka Ya. Zayavl. 13.10.2009. Opublikovano 20.11.2012. Byul. № 26.



СОВОКУПНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА НА РОСТ КУЛЬТУРЫ АЦИДОФИЛЬНЫХ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Получены экспериментальные данные о совокупном воздействии никеля и кобальта на рост ацидофильного хемолитотрофного сообщества микроорганизмов, включающего *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus* spp. Наибольшая численность клеток культуры зафиксирована в среде с концентрациями никеля 0,75 г/л и кобальта 0,02 г/л.

Ключевые слова: никель, кобальт, хемолитотрофные микроорганизмы, устойчивость, выщелачивание.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-222-227

В бактериально-химическом выщелачивании (БХВ) используются смешанные культуры, выделенные из руд, микроорганизмы которых эволюционно адаптированы к повышенным содержаниям металлов в природной среде [1].

Концентрации металлов в растворах промышленных реакторов значительно превышают природные и могут ингибировать активность микроорганизмов, т.е. быть токсичными для них. Создание эффективной технологии БХВ требует получение такой «рабочей» микробной смешанной культуры, которая была бы адаптирована к высоким содержаниям токсичных компонентов в «рабочих» растворах [1,2].

Цели настоящего эксперимента: определение изменений численности клеток смешанной культуры ацидофильных хемолитотрофов при воздействии высоких концентраций никеля и кобальта в культуральной среде; выявление концентрации никеля и кобальта, при которой численность клеток в культуре наиболее высока.

Материалы и методы

В работе использовали смешанную культуру мезофильных ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, выделенную авторами [3,4] из окисленной руды месторождения Шануч, Камчатский край (руда была отобрана из отвального участка месторождения с интенсивными окислительными процессами в августе 2007 г.; выделение культуры было начато 19 ноября 2007 г.). По данным ПЦР-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 222-227.

© А. С. Хомченкова, 2017.

диагностики НИГТЦ ДВО РАН, в составе культуры определяются бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus* spp.

В экспериментах [5,6] показано, что «жизнеспособная» концентрация Ni – не менее 6 г/л, Co – не менее 0,16 г/л. Значительно более высокие концентрации Ni и Co установлены в более раннем эксперименте в проточных реакторах [8].

Для создания среды с присутствием никеля и кобальта в питательную среду 9К [7] добавили сульфаты этих металлов ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Расчет масс солей провели по массе Ni и Co (г/л).

Был получен ряд пробирок со средой (номера пробирок 1–10). Конечные концентрации в пробирках ряда (Ni, Co г/л):

- 1) Ni – 16, Co – 0,746;
- 2) Ni – 14, Co – 0,533;
- 3) Ni – 12, Co – 0,320;
- 4) Ni – 10, Co – 0,267;
- 5) Ni – 6, Co – 0,160;
- 6) Ni – 3, Co – 0,080;
- 7) Ni – 1,5, Co – 0,040;
- 8) Ni – 0,75, Co – 0,020;
- 9) Ni – 0,375, Co – 0,010;
- 10) Ni – 0,187, Co – 0,005.

Т.о. максимальные концентрации были выше более чем в два раза для никеля и в четыре для кобальта по сравнению со средними значениями в реакторах в экспериментах [5, 6].

Культуру микроорганизмов ($N_{кл} = 1,78 \cdot 10^8 \text{ кл/мл}$) высевали в пробирки со средой, содержащей различные концентрации никеля и кобальта, а также в контрольную пробирку со средой 9К без добавления солей никеля и кобальта (к1). Без посева культуры была оставлена одна пробирка с 9К без добавления солей никеля и кобальта (контроль стерильности питательной среды (к0)). Культивирование проводили в течение 16 суток, при 28 °С, пробирки периодически встряхивали для аэрации среды. Количественный учет клеток проводили прямым подсчетом под микроскопом.

Результаты и обсуждение

Рост клеток культуры в питательной среде наблюдался при всех вариациях концентраций никеля и кобальта на протяжении всего эксперимента. Т.о. максимальные концентрации (Ni 16 г/л и Co 0,746 г/л) не оказали летального воздействия на смешанную культуру ацидофильных хемолитотрофов. Это подтверждает тот факт, что исследуемая культура обладает природной резистентностью к высоким концентрациям никеля и кобальта. В к0 роста не выявлено – среда являлась стерильной.

В табл. 1 приведены результаты измерений количества клеток в течение культивирования. На графике (рис. 1) видно, что в настоящем эксперименте наиболее благоприятным условием для роста культуры стало совокупное воздействие концентраций Ni и Co (г/л) соответственно 0,75 и 0,02 (пробирка 8).

Таблица 1

Результаты количественного учета клеток

Сутки	Количество клеток ($\times 10^7$ /мл)										
	к1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0-5	3,7	6,8	8,0	3,1	5,8	1,8	1,2	1,9	3,7	2,3	2,3
6-8	3,3	9,3	9,1	3,0	6,9	5	4,5	5,3	8,4	2,9	3,0
9-13	3,6	9,6	10,2	7,4	8,6	9	8,5	6,3	11,8	3,7	2,8
14-16	3,4	11,3	11,0	8,7	8,7	9,4	9,1	8,5	14,0	7,2	3,8

Примечание. x – количество клеток в одном миллилитре.

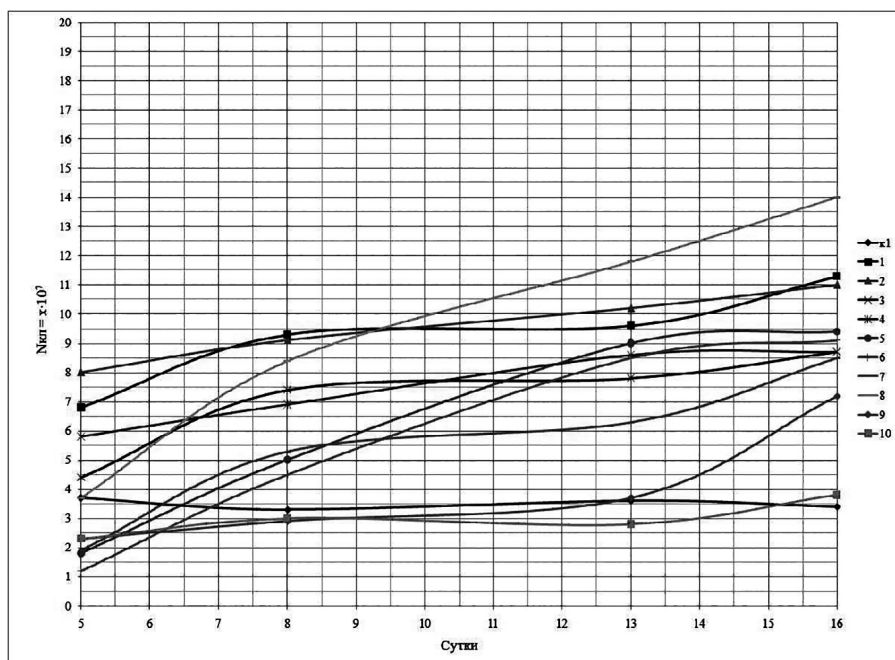


Рис. 1. Изменения численности клеток: x – количество клеток в одном миллилитре

Наименьшая и максимально приближенная к контролю (к1) численность клеток отмечена при условии Ni и Co (г/л) равны соответственно 0,187 и 0,005 (пробирка 10). Добавление никеля и кобальта в среду в такой концентрации замедляет рост культуры на начальном

этапе, но в целом не оказывает какого-либо влияния. Количество клеток здесь примерно в два раза ниже по сравнению с контролем (5 сутки). Однако уже на 8 сутки количество клеток достигает $3,0 \cdot 10^7$ (в контроле $3,3 \cdot 10^7$) (рис. 1) и активно не увеличивается/не уменьшается и далее.

Количество клеток ниже, чем в к1, наблюдалось и в других пробирках (3, 5, 6, 7, 9, 10), но к 6-8 суткам эксперимента рост в этих образцах достиг контрольного, а затем превысил его. В пробирках 1, 2, 4 рост численности клеток превышал контроль даже в начале культивирования.

Интересен факт, что в отсутствие никеля и кобальта в питательной среде, т.е. в «чистой 9К», численность клеток культуры не достигает таких количеств, как в среде с добавлением никеля и кобальта. Например, к окончанию эксперимента количество клеток при концентрации (г/л) Ni 0,75 и Co 0,02 было приблизительно в 4 раза выше ($1,4 \cdot 10^8$ кл/мл), чем в контроле. Т.о. концентрации (г/л) Ni 0,75 и Co 0,02 можно назвать оптимальными для роста рассматриваемого сообщества микроорганизмов.

Заключение

Совокупное воздействие никеля и кобальта в выбранных для эксперимента концентрациях не оказало летального воздействия на исследованную культуру ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов. Т.о. подтверждено, что данная культура обладает природными механизмами устойчивости к высоким содержаниям металлов.

Более того, количество клеток в среде с добавлением металлов превзошло количество клеток в контроле почти во всех вариантах концентраций, несмотря на ингибирование роста в некоторых образцах на начальном этапе культивирования. Установлена оптимальная концентрация никеля (0,75 г/л) и кобальта (0,02 г/л) для роста культуры; при указанных концентрациях к окончанию эксперимента показана максимальная численность клеток ($1,4 \cdot 10^8$ кл/мл).

Дальнейшие исследования совокупного воздействия различных концентраций никеля и кобальта на ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы предполагают получение данных о влиянии этих металлов на видовой состав и окислительную активность микробного сообщества (окисление ионов железа).

Благодарность

Автор статьи выражает признательность за помощь в подготовке эксперимента младшим научным сотрудникам НИГТЦ ДВО РАН – Мухину В. О. и Киореску А. В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомченкова А. С. Исследование влияния различных концентраций солей тяжелых металлов на рост культуры ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 217-222.

2. Хайнасова Т. С., Хомченкова А. С., Позолотина Л. А. Выделение чистых линий ацидофильных железо- и сероокисляющих хемолитотрофных микроорганизмов из руд месторождения Шануч // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 186-191.

3. Левенец О. О., Хайнасова Т. С., Суханова М. А. Изучение биологической активности мезофильных аборигенных сообществ хемолитотрофных микроорганизмов в ходе окисления сульфидной руды кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч // Актуальные аспекты современной микробиологии: IV Молодежная школа-конференция с международным участием. Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН. Москва, 20-22 октября 2008 г.: тезисы. – М.: Макс Пресс, 2008. С. 96-97.

4. Хайнасова Т. С., Левенец О. О. Бактериально-химическое выщелачивание как экологически безопасный способ переработки сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Разведка и охрана недр (научно-технический журнал). ФГУП ВИМС, 2015. № 1., С. 49-54.

5. Киореску А. В., Мусихин В. О., Хомченкова А. С., Балыков А. А. Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11., С. 360-365

6. Киореску А. В., Мусихин В. О., Хомченкова А. С. Исследование процессов проточного бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 272-279.

7. Каравайко Г. И., Росси Дж., Агате А., Грудев С., Авакян З. А. Биогетехнология металлов, практическое руководство, М.: 1989.

8. Балыков А. А., Трухин Ю. П. Исследования бактериально-химического выщелачивания сульфидной медно-никелевой руды в проточном режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №.2. С. 290-299. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Хомченкова Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, bioleaching@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.

No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 0–00.

A. S. Khomchenkova

A CUMULATIVE EFFECT OF NICKEL AND COBALT ON AN ACIDOPHILIC CHEMOLITHOTROPHIC MICROORGANISMS CULTURE'S GROWTH

The experimental datas about a cumulative effect of nickel and cobalt on an acidophilic chemolithotrophic microorganisms community's (including *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus* spp.) growth were obtained. The greatest culture cell's number was fixed in medium with concentrations of nickel 0.75 g/l and cobalt 0.02 g/l.

Key words: nickel, cobalt, chemolithotrophic microorganisms, resistance, leaching.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-0-0

AUTHORS

Khomchenkova A. S., junior scientist, bioleaching@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Homchenkova A. S. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk № 31 «Kamchatka-3», 2016. no 11, pp. 217–222.
2. Hajnasova T. S., Homchenkova A. S., Pozolotina L. A., *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», 2016. no 11., pp. 186–191.
3. Levenec O. O., Hajnasova T. S., Suhanova M. A., *Izuchenie biologicheskoy aktivnosti mezofilnyh aborigennyh soobshchestv hemolitotrofnyh mikroorganizmov v hode okisleniya sulfidnoj rudy kobalt-medno-nikelevogo mestorozhdeniya Shanuch* (Study of biological activity of mesophilic aboriginal communities chemolithotrophic microorganisms during the oxidation of sulphide cobalt-copper-Nickel deposits chanoch). Aktualnye aspekty sovremennoj mikrobiologii: IV Molodezhnaya shkola-konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem. Institut mikrobiologii im. S. N. Vinogradskogo RAN. Moscow, 20–22 oktyabrya 2008: tezisy. Moscow: Maks Press, 2008. pp. 96–97.
4. Hajnasova T. S., Levenec O. O. *Razvedka i ohrana nedr (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. FGUP VIMS, 2015. no 1, pp. 49-54.
5. Kioresku A. V., Musihin V. O., Homchenkova A. S., Balykov A. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 63 «Kamchatka-2». Moscow: Gornaya kniga, 2015. no 11., pp. 360-365.
6. Kioresku A. V., Musihin V. O., Homchenkova A. S. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», 2016. no 11, pp. 272-279.
7. Karavajko G. I., Rossi Dzh., Agate A., Grudev S., Avakyan Z. A. *Biogeotekhnologiya metallov, prakticheskoe rukovodstvo* (Biogeotechnology metals, a practical guide). Moscow: 1989.
8. Balykov A. A., Truhin Yu.P. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*, 2014. no 2. pp. 290-299.



ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩИЕ МИКРООРГАНИЗМЫ (ОБЗОР)

В обзоре обозначена группа «выщелачивающих микроорганизмов» и рассмотрено их взаимодействие с тяжелыми металлами на примерах проведенных ранее экспериментов и исследований. В зависимости от концентрации металлов, физико-химических свойств среды и индивидуальных особенностей штамма, тяжелые металлы могут быть подвергнуты биосорбции клетками микроорганизмов, оказать ингибирующее действие на активность клеток или привести микробную популяцию к гибели.

Ключевые слова: тяжелые металлы, хемолитотрофные микроорганизмы, биовыщелачивание.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-228-236

В основе технологии бактериально-химического выщелачивания (БХВ) металлов из сульфидного минерального сырья лежит использование свойств микроорганизмов, участвующих в природных процессах формирования рудных месторождений. Для таких микроорганизмов (бактерий, архей, микроскопических грибов) микробиологами разных стран описаны физиологические и биохимические свойства, а для некоторых родов определена лидирующая роль в процессах окисления сульфидных минералов. К ним относятся представители *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*, *Sulfobacillus*, *Sulfolobus*, *Acidianus*, *Metallosphaera*, *Ferroplasma*, грибы родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Mucor* и *Auerobasidium* (однако скорость окисления минерального субстрата грибами ниже, чем бактериями) [1]. Краткая характеристика основных видов микроорганизмов, используемых в БХВ, приведена в табл. 1 [2], далее мы будем условно называть их: «выщелачивающие микроорганизмы» (ВМО).

ВМО, как и все микроорганизмы, обладающие разнообразными развитыми ферментными системами, легко адаптируются к переменчивым и порой экстремальным условиям окружающей (природной или антропогенной) среды (изменение диапазона температур, pH, концентрации тяжелых металлов и т.п.). Взаимодействие ВМО с тяжелыми металлами (ТМ) представляется интересным аспектом фи-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 228–236.

© А. С. Хомченкова, 2017.

зиологии данных организмов. Токсичное воздействие ТМ с одной стороны способно ингибировать биоактивность ВМО (например, в условиях промышленного реактора, где концентрации металлов обыкновенно значительно выше природных) [3], а с другой стороны, ВМО могут использоваться для очистки объектов окружающей среды от загрязнений металлами, т.к. их клетки способны к биосорбции и биоаккумуляции [4, 5].

Термин «тяжелые металлы» связан с высокой относительной атомной массой элемента (свыше 50 атомарных единиц). Признаком, позволяющим отнести металлы к группе тяжелых, является и их плотность. По данным литературных источников, к ТМ относятся элементы с плотностью более 5 г/см³ [6].

По токсичности ТМ располагаются в следующей последовательности: ртуть, серебро, медь, кадмий, цинк, свинец, хром, никель, кобальт. Однако такой порядок может меняться в зависимости от индивидуальных свойств вида микроорганизма и от того, присутствуют ли эти элементы в растворе в виде свободных ионов, недиссоциированной соли или входят в состав органических либо неорганических комплексных соединений. Недиссоциированные соли и комплексообразующие ионы обычно менее токсичны, чем свободные ионы в тех же концентрациях. При оценке влияния металла на микроорганизмы важно учитывать и их валентность (например, шестивалентный хром значительно токсичнее четырехвалентного) [5, 7].

Таблица 1

Основные микроорганизмы, участвующие в процессах БХВ

Современное название	Филум (а – архей, б – бактерия)	Энергосубстрат	Оптимум, рН	Оптимум, Т°С
<i>Acidianus ambivalens</i>	а	S ⁰	2,5	80
<i>Acidianus brierleyi</i>	а	S ⁰ , Fe ²⁺ , сульфиды	1,5–2,5	70
<i>Acidianus infernus</i>	а	S ⁰	2,5	80
<i>Acidianus sulfidivorans</i>	а		2,0	70
<i>Acidiphilium acidophilum</i>	б		4,5	30
<i>Acidiphilium angustum</i>	б		2,5–3,0	20
<i>Acidiphilium cryptum</i>	б		3,0	30
<i>Acidiphilium multivorum</i>	б		3,0	30
<i>Acidiphilium organovorum</i>	б		3,5	37
<i>Acidiphilium rubrum</i>	б		2,5–3,0	20
<i>Acidithiobacillus albertensis</i>	б		4,4	30

Продолжение табл. 1

Современное название	Филум (а – архей, б – бактерия)	Энергосубстрат	Оптимум, pH	Оптимум, T °C
<i>Acidithiobacillus caldus</i>	б	S ⁰ , тетрагидрат	2,5	45
<i>Acidithiobacillus fer-ridurans</i>	б		1,8	25
<i>Acidithiobacillus fer-rivorans</i>	б		1,8	25
<i>Acidithiobacillus fer-rooxidans</i>	б	S ⁰ , Fe ²⁺ , сульфиды	1,8	25
<i>Acidocella alu-miniidurans</i>	б		3,0	37
<i>Acidocella aminolytica</i>	б		2,5–3,0	30
<i>Acidocella facilis</i>	б		3,0	20
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	б	S ⁰ , некоторые сульфиды	4,4	25
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	а	Fe ²⁺	1,36–1,8	35
<i>Ferroplasma cupricumulans</i>	а		1,0–1,2	53
<i>Halothiobacillus halophilus</i>	б		7,3–7,5	30
<i>Halothiobacillus hydrothermalis</i>	б		7,5	35
<i>Halothiobacillus kellyi</i>	б		6,6–7,0	37
<i>Halothiobacillus neapolitanus</i>	б		6,6–7,0	37
<i>Leptospirillum ferriphilum</i>	б	Fe ²⁺ , FeS ₂	1,8	37
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	б	Fe ²⁺	1,8	30
<i>Metallosphaera cuprina</i>	а		3,5	65
<i>Metallosphaera hakonensis</i>	а	S ⁰ , (S ²⁻), S ₄ O ₆ ²⁻	3,0	65
<i>Metallosphaera prunae</i>	а	S ⁰ , Fe ²⁺ , сульфиды	3,0	75
<i>Metallosphaera sedula</i>	а		3,0	65
<i>Sulfobacillus acidophilus</i>	б	Fe ²⁺ , сера, сульфидные минералы	2,0	45
<i>Sulfobacillus benefaciens</i>	б		2,0	37
<i>Sulfobacillus sibiricus</i>	б		1,9–2,4	50
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	б		1,9–2,4	40
<i>Sulfobacillus thermotolerans</i>	б		S ⁰ , Fe ²⁺ , S ₄ O ₆ ²⁻ , сульфидные минералы	1,9–2,4

Современное название	Филум (а – архей, б – бактерия)	Энергосубстрат	Оптимум, pH	Оптимум, T °C
<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>	а	S ⁰ ,(S ²⁻), S ₄ O ₆ ²⁻	2,0	70
<i>Sulfolobus metallicus</i>	а	S ⁰	2,0	70
<i>Sulfolobus shibatae</i>	а	S ⁰	3,0–4,0	75
<i>Sulfolobus solfataricus</i>	а	S ⁰ ,(S ²⁻), S ₄ O ₆ ²⁻	4,0–4,2	70
<i>Sulfolobus tokodaii</i>	а		4,0	80
<i>Sulfolobus yangmingensis</i>	а	S ⁰	4,0	80
<i>Thermithiobacillus tepidarius</i>	б		6,9	43
<i>Thiobacillus aquaesulis</i>	б		7,6	42
<i>Thiobacillus denitrificans</i>	б		7,0	35
« <i>Thiobacillus prosperus</i> »	б		7,0	35
<i>Thiobacillus thioparus</i>	б		6,6	26
<i>Thiobacillus thiophilus</i>	б		7,0	25

Постоянная циркуляция ТМ в окружающей среде в результате антропогенной деятельности, оказывает свое воздействие на все живые организмы, включая микробиоту. Как и все представители микробного мира, ВМО обладают ответными реакциями на воздействия стрессовых факторов, включающих ТМ. Такие ответы можно рассматривать в следующих аспектах: как примеры адаптационных возможностей; как фактор селекции на резистентные и неустойчивые штаммы; как вероятность использования в качестве тест-организмов или организмов-индикаторов; как перспективу использования отдельных микробных консорциумов для биоремедиации химически загрязненных сред [7].

Многочисленные бактериологические и микологические исследования показывают, что ТМ являются активными регуляторами состава и численности природных микробных комплексов. Под влиянием конкретных ТМ происходят такие изменения, как возрастание или снижение общей численности определенных микроорганизмов, увеличение или уменьшение видового разнообразия в сообществах, смена доминирующих и соподчиненных видов и т.п. Находясь в окружающей среде (антропогенной или природной), ТМ в первую очередь сталкиваются с экзометаболитами и компонентами клеточных стенок микроорганизмов. При этом ТМ могут подвергнуться биосорбции клетками, ингибировать активность клеток или приводить к гибели клеток, — в зависимости от концентрации ТМ, физико-химических характеристик среды и особенностей штамма [7, 8].

ТМ губительно воздействуют на клетки микроорганизмов двумя основными способами: при нехватке металлов в среде происходит нарушение функций ферментов, тогда как для нормального функционирования важно не только присутствие металла в среде в достаточном количестве, но и его биодоступность; к инактивации ферментов и дестабилизации клеточных структур может привести токсичность избытка металлов, например, токсичность ТМ может проявляться в нарушении проницаемости клеточной мембраны. Чувствительность ферментных систем мембраны может использоваться в качестве индикатора токсичности ТМ или служить критерием резистентности микроорганизма к ТМ [8].

В эксперименте по определению влияния высоких концентраций растворенных металлов на ВМО были использованы культуры acidофильных хемолитотрофных бактерий *Acidithiobacillus albertensis* DSM 14366 и *A. thiooxidans* (*Thiobacillus concretevorus*) DSM 8345. Показано, что добавление в культуральную среду соли NiCl_2 до концентрации 1 % не оказало влияния на рост *A. albertensis* DSM 14366, увеличение концентрации соли до 1,25–1,5 % оказывало незначительное ингибирующее действие на рост бактерий. В отличие от соли никеля, добавление в среду Na_2CrO_4 даже в незначительном количестве оказывало токсическое воздействие на бактерии *A. albertensis* DSM 14366 и рост культуры отсутствовал во всех вариантах концентраций. Рост *A. thiooxidans* DSM 8345 в присутствии даже низких концентраций NiCl_2 и Na_2CrO_4 отсутствовал полностью [3].

В исследовании влияния Cu , Mo , Zn и Al на окисляющую активность *A. ferrooxidans* (аборигенная культура рудника Аксу, Казахстан) показано, что процессы окисления железа данным микроорганизмом строго ингибируются при концентрациях меди в среде выше 1,0 г/л. Окисляющая способность исследованной культуры сохранялась при концентрациях молибдена, не превышающих 10 мг/л, т.е. была очень чувствительна к присутствию молибдена в среде по сравнению с медью. Добавление цинка в культуральную среду в различных концентрациях не оказало существенного воздействия на окисляющую активность культуры *A. ferrooxidans*, хотя скорость процесса при 15–20–30 г/л была значительно медленнее. Присутствие алюминия в среде в концентрациях до 10 г/л не изменяло интенсивности окисления железа клетками *A. ferrooxidans*, но уже при 20 г/л была отмечена крайне слабая окислительная активность [9].

ВМО способны снижать концентрацию ТМ в окружающей среде за счет биосорбции металлов клетками (ответная реакция на увеличение содержания токсиканта, направленная на его детоксикацию). Механизмы биосорбции можно классифицировать в соответствие с

локализацией процесса: внеклеточное взаимодействие, взаимодействие на поверхности клетки и внутриклеточное взаимодействие. Скорость и величина биосорбции определяются видом и возрастом культуры микроорганизмов, временем контакта с металлом, pH, концентрацией ТМ [8].

Так, например, показано, что биосорбция Cu^{2+} клетками *Aspergillus niger* из водного раствора зависит от pH среды: связывание металла имело тенденцию к увеличению при pH от 2 до 6 (максимум между 5 и 6) [10]. Снижение pH с 4,5 до 2,0 вызывало увеличение извлечения ТМ автотрофной бактерией *Thiobacillus spp.* из растворов, содержащих Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sr, Ti, Zn. Максимальное извлечение (более 90 %) установлено для Cu и Pb, для Cd, Co, Ni, Sr – 60–80 % [11].

Хемолитотрофные бактерии *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans* накапливают Ag (около 250 мг/г сухой биомассы). Количество связанного серебра зависит от условий проведения реакций – от pH, регулирующего степень ионизации поверхностных групп клетки, и от присутствия анионных лигандов в среде (сульфат, хлорид, фосфат, глутамат и карбонат ингибируют связывание ионов серебра клетками микроорганизмов) [5].

Способность клеток ВМО к биосорбции и биоаккумуляции и резистентность этих микроорганизмов к высоким содержаниям ТМ являются важными критериями при подборе эффективного микробного сообщества для применения в БХВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева Т. В., Блайда И. А., Иваница В. А. Основные группы микроорганизмов, участвующих в биогидрометаллургических процессах // Проблемы екологічної біотехнології, 2013. № 1.

2. Хомченкова А. С. Микробиологические аспекты бактериально-химического выщелачивания сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63, «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11., С. 371-377.

3. Ахметов Л. И., Быков А. Г., Вайнштейн М. Б., Есикова Т. З., Филонов А. Е., Крылова Л. Н., Мортазави С. Токсичность никеля для тионовых бактерий // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, 2010. Вып. 1., С. 167-174.

3. Каравайко Г. И., Росси Дж., Агате А., Грудев С., Авакян З. А. Биоготехнология металлов. Практическое руководство. М.: 1989.

4. Буракаева А. Д., Русанов А. М., Лантух В. П. Роль микроорганизмов в очистке сточных вод от тяжелых металлов. Методическое пособие // ОГУ. Оренбург: 1999.

5. Сизенцов А. Н., Нугаманова Э. М., Пешков С. А. Влияние тяжелых металлов на рост пробиотических штаммов *E. coli* m 17, *E. faecium*, *L. acidophilus*, *L.*

bulgaricus LB 51 и бактерии рода *Bacillus* в условиях *in vitro* // Вестник Оренбургского государственного университета, 2011. №12 (131).

6. Фокина А. И., Ашихмина Т. Я., Домрачева Л. И., Горностаева Е. А., Огородников С. Ю. Тяжелые металлы как фактор изменения метаболизма у микроорганизмов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология, 2015. №2. С. 5-18.

7. Ulberg Z. Membrane process in the resistance of microorganisms to heavy metals // Research in Microbiology, 1997. Т.148, №6. С. 524-525.

8. Канаев А. Т., Хамуда Р. А., Камалов М. Р. Влияние меди, молибдена, цинка и алюминия на окисляющую активность *Acidithiobacillus ferrooxidans* // Eurasian Journal of Applied Biotechnology, 2008. №3. С. 86-90.

9. Rao C. R.N., Iyengar L., Venkobachar C. Sorption of copper (II) from aqueous phase by waste biomass // Journal of Environmental Engineering, 1993. Т.119, № 2. С. 369-377.

10. Kavser G., Koeckritz T., Markert B. Bioleaching zur Reinigung schwermetallbelasteter Böden mit *Thiobacillus* spp. // Wasser und Boden, 2001. Т.53, №.1-2. С. 54-58.

11. Хомченкова А. С. Исследование влияния различных концентраций солей тяжелых металлов на рост культуры ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 217 – 222.

12. Хомченкова А. С., Мусихин В. О., Киореску А. В., Позолотина Л. А. Опыт выделения аборигенных хемолитотрофных микроорганизмов из окисленных сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11. С. 366-370.

13. Хайнасова Т. С., Хомченкова А. С., Позолотина Л. А. Выделение чистых линий ацидофильных железо- и сероокисляющих хемолитотрофных микроорганизмов из руд месторождения Шануч // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 186 – 191.

14. Хайнасова Т. С., Трухин Ю. П. Прикрепление микроорганизмов в ходе биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11. С. 285-290.

15. Хайнасова Т. С., Кунгурова В. Е., Позолотина Л. А., Балыков А. А., Левенец О. О. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч различными культурами аборигенных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11. С. 297-334.

16. Кунгурова В. Е. Минералогический и вещественный состав сульфидной руды, использованной в экспериментах по бактериально-химическому выщелачиванию (месторождение Шануч, Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 319-327.

17. Левенец О. О. Перспективы использования биосорбентов для извлечения никеля, меди и кобальта из растворов биовыщелачивания сульфидных медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 341-347. **ПИАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Хомченкова А. С. – младший научный сотрудник, bioleaching@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 228–236.

A. S. Khomchenkova

THE HEAVY METALS AND LEACHING MICROORGANISMS (A REVIEW)

The group of «leaching microorganisms» was denoted and their interaction with heavy metals was considered on the examples of previous experiments and studies in the review. Depending on the metals concentration, environment physicochemical characteristics and strains individual factor, heavy metals can be subjected to biosorption by microorganisms cells, act inhibition on cells activity or lead microbial population to death.

Key words: heavy metals, chemolithotrophic microorganisms, bioleaching.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-228-236

AUTHOR

Khomchenkova A. S., junior scientist, bioleaching@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Vasileva T. V., Blajda I. A., Ivanica V. A. *Problemi ekologichnoi biotekhnologii*, 2013. no 1.
2. Homchenkova A. S. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 63, «Kamchatka-2». 2015. no 11, pp. 371-377.
3. Ahmetov L. I., Bykov A. G., Vajnshtejn M. B., Esikova T. Z., Filonov A. E., Krylova L. N., Mortazavi S. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2010. Vyp. 1., pp. 167-174.
4. Karavajko G. I., Rossi Dzh., Agate A., Grudev S., Avakyan Z. A. *Biogeotekhnologiya metallov. Prakticheskoe rukovodstvo* (Toxicity of Nickel to Tihonovich bacteria). Moscow: 1989.
5. Burakaeva A. D., Rusanov A. M., Lantuh V. P., *Rol mikroorganizmov v oчитке stochnyh vod ot tyazhelyh metallov. Metodicheskoe posobie* (Role of microorganisms in wastewater treatment from heavy metals. Methodical manual). OGU. Orenburg: 1999.
6. Sizencov A. N., Nugamanova E. M., Peshkov S. A. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011. no 12 (131).
7. Fokina A. I., Ashihmina T. Ya., Domracheva L. I., Gornostaeva E. A. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2015. no 2. pp. 5-18.
8. Ulberg Z., *Research in Microbiology*, 1997. T.148, no 6. pp. 524-525.
9. Kanaev A. T., Hamuda R. A., Kamalov M. R. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*, 2008. no 3. pp. 86-90.
10. Rao C. R.N., Iyengar L., Venkobachar C., *Sorption of copper (II) from aqueous phase by waste biomass*. *Journal of Environmental Engineering*, 1993. T.119, no 2. pp. 369-377.

11. Kavser G., Koeckritz T., Markert B., *Bioleaching zur Reinigung schwermetallbelasteter Böden mit Thiobacillus spp.* Wasser und Boden, 2001. T.53, no 1-2. pp. 54-58.

12. Homchenkova A. S. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk №31 «Kamchatka-3». Moscow: Gornaya kniga, 2016. no 11, pp. 217–222.

13 Homchenkova A. S., Musikhin V. O., Kioresku A. V., Pozolotina L. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 63 «Kamchatka-2», 2015. no 11, pp. 366-370.

14 Hajnasova T. S., Homchenkova A. S., Pozolotina L. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», Moscow: Gornaya kniga, 2016. no 11, pp. 186–191.

15 Hajnasova T. S., Trukhin Yu.P. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 63 «Kamchatka-2», 2015. №11., pp. 285-290.

16 Hajnasova T. S., Kungurova V. E., Pozolotina L. A., Balykov A. A., Levenec O. O. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 63 «Kamchatka-2», 2015. no 11, pp. 297-334.

17 Kungurova V. E. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», 2016. no 11, pp. 319-327.

18 Levenec O. O. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», 2016. no 11, pp. 341-347.



ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ СВЧ-ВОЛНАМИ КУЛЬТУРЫ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Представлены сведения о влиянии микроволновой энергии на активность хемолитотрофных бактерий, участвующих в процессе выщелачивания Ni, Cu, Co из сульфидной руды месторождения Шануч (Камчатка). Определена оптимальная продолжительность предварительного облучения бактериальной культуры, которая обеспечивает высокую скорость роста микроорганизмов и эффективность восстановления металлов из руды.

Ключевые слова: микроволновая энергия, интенсификация, выщелачивание, бактериально-химическое выщелачивание (БХВ), извлечение металлов.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-237-247

Введение

В России и за рубежом в последние годы наблюдается устойчивая тенденция к истощению запасов богатой и легкообогатимой руды, что приводит к необходимости вовлечения в переработку упорного и низкосортного минерального сырья. В связи с этим все большее внимание уделяется технологии бактериально-химического выщелачивания (БХВ) ценных компонентов из минерального сырья [1].

Основные преимущества технологии БХВ заключаются в низких затратах потребляемой электроэнергии, в высокой экологической безопасности, в простоте эксплуатации и в возможности применения к низкосортным рудам, которые не могут быть обработаны с помощью традиционных пиро- и гидрометаллургических методов [2, 3].

Основным недостатком технологии БХВ является низкая скорость бактериально-химических реакций, связанная со слабой окислительной активностью микроорганизмов.

Целью данной работы являлось исследование влияния электромагнитного излучения в сантиметровом диапазоне спектра на активность железо- и сероокисляющих бактерий в процессах бактериаль-

но-химического окисления медно-никелевых руд и определение оптимальных параметров облучения.

В ряде работ [4, 7], посвященных исследованию нетеплового воздействия СВЧ-излучения на микроорганизмы, было установлено, что основной механизм связан с активацией многослойной адсорбции молекул воды на гидрофильной поверхности за счет смещения дипольного момента. Это приводит к вытеснению ионов H^+ за пределы в область с повышенной концентрацией ионов водорода, в результате чего возникает градиент концентрации протонов ($\Delta\mu_n^+$). Эта потенциальная энергия используется для синтеза АТФ – универсального источника энергии для всех биохимических процессов, протекающих в живых организмах.

Также известно, что активные формы кислорода (АФК), образующиеся при воздействии микроволновой энергии на биологические объекты, при определенных концентрациях могут оказывать многостороннее регуляторное действие на биохимические процессы, и рассматриваются как система межклеточных и внутриклеточных мессенджеров [5]. Например, образование перекиси водорода при воздействии микроволновой энергии приводит к ингибированию фермента супероксиддисмутазы, влияя тем самым на активность многих ферментативных систем внутри клетки.

Перекись водорода восстанавливается и дает гидроксил-радикал (OH^*). Реакционная способность последнего чрезвычайно высока, поэтому гидроксил-радикал способен окислить практически любое вещество клетки, включая ДНК. Взаимодействие свободных радикалов с молекулами ДНК, приводит к возникновению различных типов мутаций [6].

Еще один биологический эффект связан с влиянием квантов микроволнового излучения на кинетическую энергию вращения полярных молекул (например, ДНК, РНК, белки) это означает, что микроволны влияют на высокоспецифичную агрегацию белков, находящуюся под генетическим контролем. В результате формируются временные структуры, способные даже в низких концентрациях вызывать модуляцию транскрипции клеточных генов. Изменение генной экспрессии является причиной изменения скорости роста и выхода биомассы, влияет на цикл клеточного деления, приводит к изменению интенсивности образования межклеточных контактов и клеточных рецепторов [7].

Принципиальным для запуска биологического эффекта микроволн является критическая гидратация белков, при которой белки из функционально пассивного переходят в функционально активное со-

стояние. Рецепторные белки, испытавшие фазовый переход, оказывают решающее влияние на метаболические процессы, происходящие в клетках.

Железо- и сероокисляющие бактерии, участвующие в процессе биовывелачивания существуют в двух разных формах: свободноплавающие (планктонные) клетки, которые осуществляют окисление субстрата по бесконтактному механизму, за счет наработанного трехвалентного железа, и в виде прикрепленных к субстрату биопленок, окисляющие сульфидные минералы прямым механизмом, посредством ферментативной системы. Существование бактериальных клеток в составе биопленок обеспечивает им ряд преимуществ по сравнению с планктонной формой жизни. Внутри биопленки бактерии обладают повышенной резистентностью к агрессивным факторам окружающей среды. Повышенная выживаемость бактерий в составе биопленки связана с уменьшением их свободной поверхности за счет контактов друг с другом. В работе Прониной Е. А. было показано, что микроволновое излучение на частоте молекулярного спектра поглощения и испускания излучения (МСПИ) O_2 повышает способность микроорганизмов к пленкообразованию. Напротив, облучение на частоте МСПИ NO снижает способность к пленкообразованию [8].

Все эти данные свидетельствуют о перспективе применения микроволнового излучения в качестве физического стимулятора биологических процессов.

Материалы и методы

Бактериальная культура

Объектом исследования послужила смешанная культура хемолиотоавтотрофных ацидофильных микроорганизмов, выделенная из образца сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка).

По данным ПЦР-диагностики, в состав данного сообщества входили *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfobacillus* sp.

Бактериальная смешанная культура нарабатывалась в биореакторе, содержащем среду 9К (без добавления железа) и руду. Культивация шла при температуре 30 °С с дополнительной аэрацией и перемешиванием со скоростью 90 об/мин.

Руда

В работе использованы сульфидная руда медно-никелевого месторождения Шануч с содержанием 60–65 % сульфидных минералов, из которых 85–90 % составляет пирротин, 5–6 % – пентландит, 2–5 % – халькопирит, 0,2–0,5 % – виоларит. Исходные концентрации металлов: Ni – 4,52 %; Cu – 0,68 %; Co – 0,11 %. Степень измельчения руды ≤ 100 мкм.

Процесс облучения

Облучение проводилось в СВЧ-печи. Частота облучения составляла 2,45 ГГц, мощность была равна 900Вт. Для минимизации теплового эффекта пробирки находились в специальном боксе со льдом. Плотность биомассы составляла $1 \times 10^9 \text{мл}^{-1}$. Время облучения составляло 5, 10 и 15 секунд.

Оценка окислительной активности

Бактериальное окисление Fe(II) проходило в колбах объемом 250 мл, содержащих стерильную минеральную среду Сильвермана-Люднгрена (9К) с добавлением Fe(II) при температуре 22 °С без дополнительной аэрации и перемешивания. Объем добавляемой бактериальной суспензии составлял 3 мл. На протяжении всего эксперимента производился подсчет клеток, измерялись параметры pH и Eh, а также определялась степень окисления железа. Контролем служила необлученная культура бактерий.

Бактериально-химическое выщелачивание.

БХВ проводилось в периодическом режиме, в колбах (250 мл), содержащих 200 мл минеральной среды 9К и 20 гр. сульфидной металлосодержащей руды. Все растворы были стерильны. Эксперимент проводился на качалке (90 об/мин) при комнатной температуре. В ходе эксперимента измерялись параметры pH и Eh. Подсчет клеток осуществлялся методом прямого подсчета под микроскопом. Содержания металлов в растворе определялось методом атомно-адсорбционной спектрометрии.

** Для удобства введем следующие условные сокращения:*

«Контроль» – Колба с необлученными бактериями

«М1» – колба с бактериями, облученными в течение 5-ти секунд

«М2» – колба с бактериями, облученными в течение 10-ти секунд

«М3» – колба с бактериями, облученными в течение 15-ти секунд

Результаты и их обсуждение

1. Оценка зависимости продолжительности облучения на физиологические процессы микроорганизмов

На первом этапе работы, который заключался в определении оптимальной продолжительности облучения бактериальной культуры, позволяющей получить смешанную культуру микроорганизмов с наиболее выраженной окислительной активностью и высокой скоростью роста, было выявлено (рис. 1), что максимальная скорость накопления биомассы происходит после ее 10-секундной обработки СВЧ-излучением. К 15-м суткам в колбе «М2» насчитывалось $6,1 \cdot 10^8$ клеток в миллилитре раствора. Наименьшая скорость роста была зарегистрирована в контрольной колбе с необлученными микроорганиз-

мами. Максимальная концентрация биомассы в колбе была равна $2 \cdot 10^8$ кл./мл. В колбе «М1» число клеток достигало $4 \cdot 10^8$, что несколько меньше, чем в «М2», но больше, чем в контроле.

Также было установлено, что 15-секундное облучение способствует полному угнетению роста микроорганизмов.

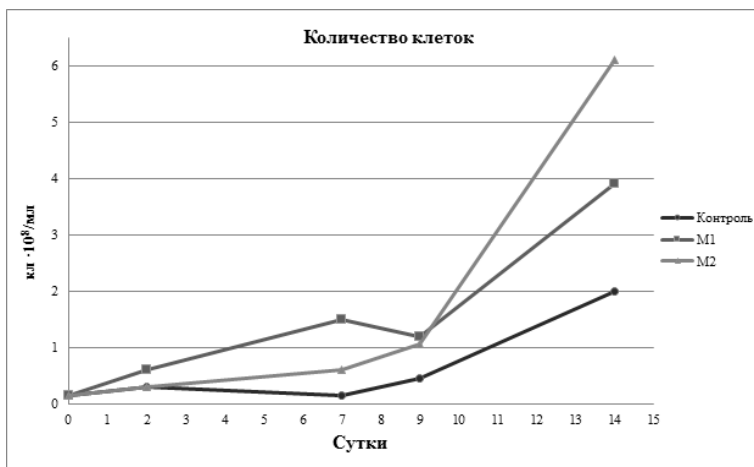


Рис. 1. Зависимость скорости роста клеток от продолжительности облучения

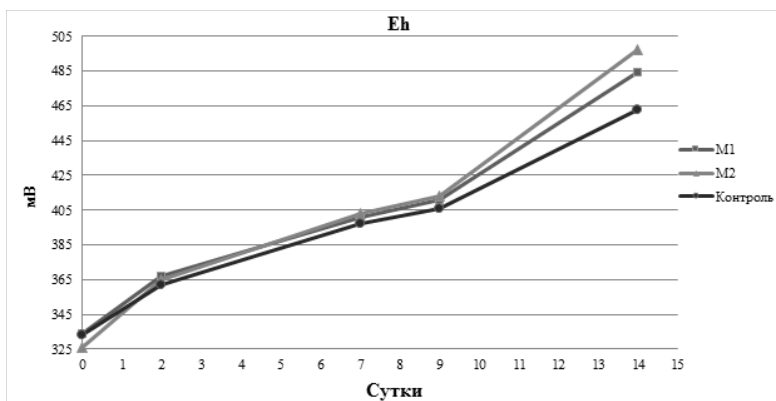


Рис. 2. Окислительно-восстановительный потенциал

Значение окислительно-восстановительного потенциала (рис. 2) на протяжении почти всего эксперимента было выше в колбах «М1» и «М2» с облученными бактериями, по сравнению с контролем, и равнялось (к концу эксперимента) 484 мВ, 497 мВ, и 463 мВ, соответственно. Это говорит о том, что био-химические реакции идут более эффективно в колбах с облученными бактериями.

Окисление железа (рис. 3, 4) осуществлялось наиболее эффективно сообществом микроорганизмов, которые подвергались предварительной обработке СВЧ-излучением. В колбе «М2» к 15-м суткам было окислено 93,1 % всего железа, что на 13,7 % больше, по сравнению с контролем (79,4 %). В колбе «М1» было окислено 90,1 % всего двухвалентного железа, что также больше, чем в контроле.

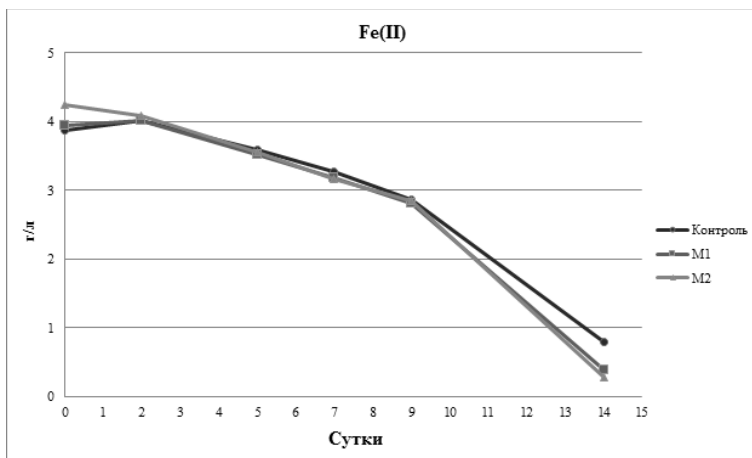


Рис. 3. Изменение концентрации двухвалентного железа в растворе

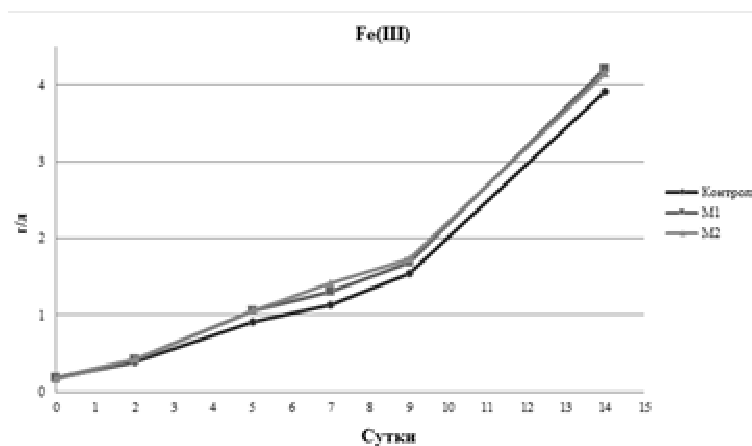


Рис. 4. Изменение концентрации трехвалентного железа в растворе

Полученные результаты на первом этапе эксперимента позволяют сделать заключение о том, что предварительная обработка биомассы СВЧ-излучением продолжительностью 5 и 10 секунд, оказыва-

ет положительный эффект как на окислительную активность железо- и сероокисляющих микроорганизмов так и на скорость их размножения.

На втором этапе эксперимента будет исследована влияние предварительного облучения СВЧ-волнами хемолитотрофных бактерий на их способность к в скрытию минеральных комплексов и восстановлению целевых металлов (Ni, Cu, Co) из сульфидной руды.

2. Бактериально-химическое выщелачивание

В ходе БХВ наиболее эффективно шли процессы в колбах с микроорганизмами, которые подвергались облучению. Как видно не рисунке 5, максимальной плотности достигли микроорганизмы в колбе «М2», их количество было равно $2,2 \cdot 10^8$ в одном миллилитре. Наименьшее количество клеток было в контроле ($1,8 \cdot 10^8$ кл/мл). В колбе «М1» плотность биомассы была равна $1,9 \cdot 10^8$ кл/мл. Эти различия сложно назвать статистически достоверными, т.к. ошибка, при прямом подсчете с помощью микроскопа, достаточна велика. Также стоит отметить, что во всех колбах значительный рост микроорганизмов начался спустя пять суток от начала эксперимента.

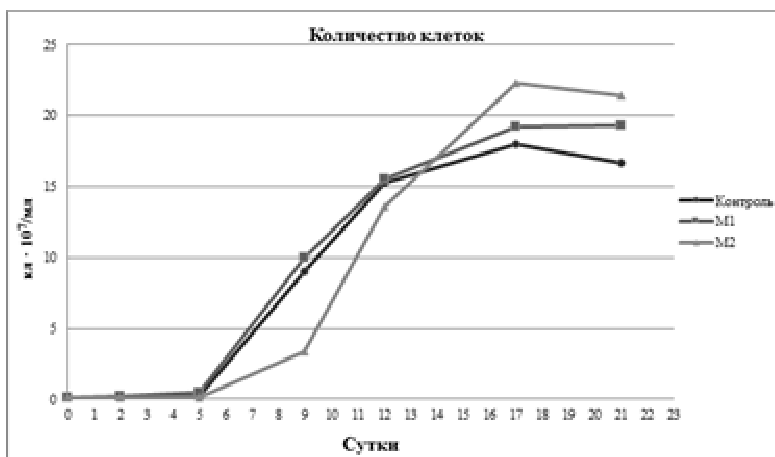


Рис. 5. Изменение числа клеток в растворе

Наиболее эффективно выщелачивание никеля шло в колбе «М2», где концентрация металла в жидкой фазе к концу эксперимента составляла 960 мг/л (рис. 6). В колбе «М1» концентрация никеля равнялась 924 мг/л. Наименьшая концентрация никеля, перешедшего в раствор была в контрольной колбе 884 мг/л.

Несколько иная картина наблюдалась при оценки эффективности процессов выщелачивания меди (рис. 7). В данном случае наиболь-

шая концентрация меди (108 мг/л), перешедшей в раствор, была в колбе «М1». В контрольной колбе концентрация ионов меди в растворе к концу эксперимента была на 28 % ниже, чем в колбе «М1».

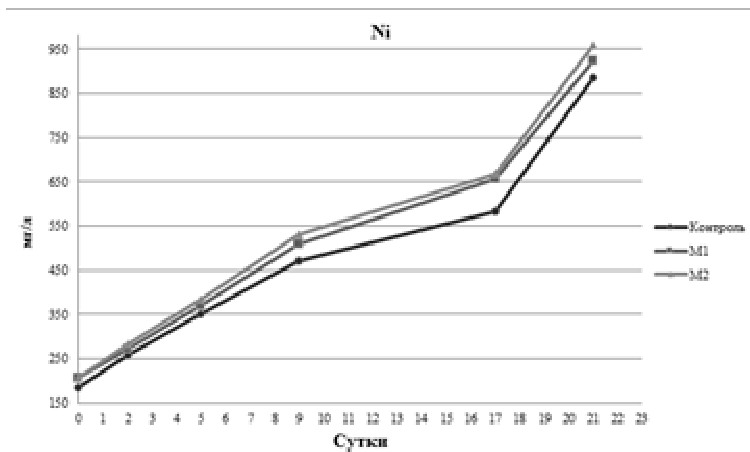


Рис. 6. Концентрация никеля в жидкой фазе пульпы

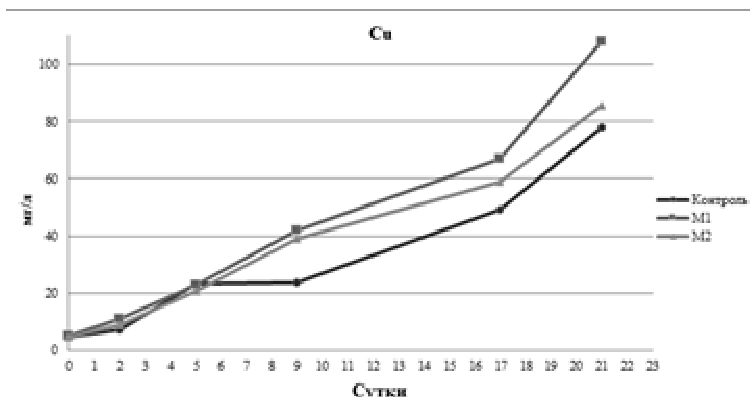


Рис. 1. Концентрация меди в жидкой фазе пульпы

Наибольшая концентрация кобальта в жидкой фазе, также оказалась выше в колбах, содержащих облученные микроорганизмы. В колбе «М2» концентрация кобальта в растворе составляла 15,1 мг/л, в колбе «М1» – 14,1 мг/л, в контрольной колбе – 13,8 мг/л.

В таблице 1 представлены данные извлечения металлов. Стоит отметить, что эксперимент проводился при комнатной температуре, не превышающей 22°С, этим объясняются низкие показатели из-

влечения металлов во всех колбах, тем не менее степень извлечения оказалась выше в колбах «М1» и «М2», в которой находились бактерии, подвергавшиеся СВЧ облучению. Так в колбе «М2» показатель извлечения никеля был на 11 % выше, чем в контроле, и на 2 % выше, по сравнению с колбой «М1». Степень извлечения меди и кобальта была одинаковой в колбах «М1» и «М2» и выше, чем в контроле на 5 % и 6 %, соответственно.

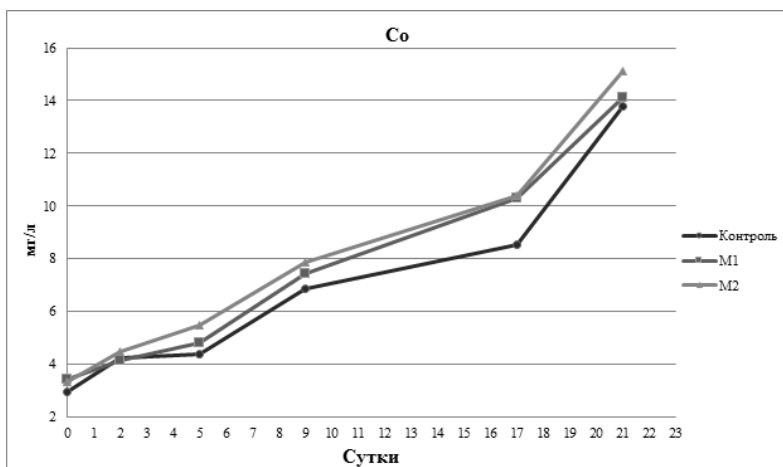


Рис. 8. Концентрация кобальта в жидкой фазе пульпы

Таблица 1

Степень извлечения металлов

	Извлечение, %		
	Ni	Cu	Co
Контроль	15	10	10
M1	24	15	16
M2	26	15	16

В ходе данной работы были выявлены параметры облучения, способствующие эффективному росту микроорганизмов и повышенной окислительной активности. С учетом полученных результатов, можно с уверенностью говорить о перспективе применения СВЧ-энергии в качестве вспомогательного агента, способствующего повышению кинетики процессов бактериально-химического выщелачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киореску А. В. Исследование влияния СВЧ-излучения на кислотолюбивые хемолитотрофные бактерии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. S31. – С. 313–318.

2. Киореску А. В. и др. Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 63. – С. 360–365.

3. Хайнасова Т. С. и др. Бיוвыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч различными культурами аборигенных микроорганизмов //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 63 «Камчатка-2». – 2015. – №. 11. – С. 297.

4. Кузнецов Д. Б. и др. Эффекты воздействия СВЧ излучения на *Escherichia coli lum+* //Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2013. – №. 2. – С. 71–75.

5. Казаринов К. Д., Полников И. Г. Изучение биологических эффектов микроволнового излучения с помощью хемилюминесцентного метода //Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2010. – №. 2. – С. 57–71.

6. Волькенштейн М. В. Биофизика. – Наука, 1988.

7. Кузнецов Д. Б. Перспективы применения электромагнитных излучений крайне высокой частоты малой мощности в фармации //Фундаментальные исследования. – 2012. – №. 10-2.

8. Пронина Е. А., Швиденко И. Г., Шуб Г. М. Формирование бактериальных биопленок под воздействием электромагнитного излучения //Фундаментальные исследования. – 2010. – №. 10. – С. 40–45. **PLAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Киореску Александр Вадимович – аспирант, младший научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 237–247.

A. V. Kioresku

INFLUENCE OF THE DURATION OF PRELIMINARY IRRADIATION WITH MICROWAVE WAVES OF CULTURE OF CHEMOLITHOTROPHIC MICROORGANISMS ON THE EFFICIENCY OF BIOLEACHING PROCESSES

This work made it possible to obtain the necessary information on the effect of microwave energy on the activity of chemolithotrophic bacteria participating in the leaching of Ni, Cu, Co from the sulphide ore of the Shanuch deposit (Kamchatka). The optimal duration of irradiation formation is determined, which ensures a high growth rate of microorganisms and efficient recovery of metals from ore.

Key words: Microwave energy, intensification, leaching, bacterial-chemical leaching (BHB), extraction of metals.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-237-247

AUTHOR

Kioresku A. V., PhD student, junior scientist, e-mail: nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Kioresku A. V. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhniicheskiy zhurnal)*. 2016. S31. pp. 313–318.
2. Kioresku A. V. i dr. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhniicheskiy zhurnal)*. 2015. no 63. pp. 360–365.
3. Khaynasova T. S. i dr. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhniicheskiy zhurnal)*. Specialnyy vypusk 63 «Kamchatka-2», 2015. no 11. pp. 297.
4. Kuznecov D. B. i dr. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Fizika*. 2013. no 2. pp. 71–75.
5. Kazarinov K. D., Polnikov I. G. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCH-tekhnika*. 2010. no 2. pp. 57–71.
6. Volkenshteyn M. V. *Biofizika (Biophysics)*. Nauka, 1988.
7. Kuznecov D. B. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2012. no 10-2.
8. Pronina E. A., SHvidenko I. G., SHub G. M. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2010. no. 10. pp. 40–45.



МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ НЕТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИКРООРГАНИЗМЫ

Представлена и систематизирована информация из опубликованных ранее материалов о механизмах нетеплового воздействия микроволнового излучения на микроорганизмы.

Ключевые слова: микроволновая энергия, СВЧ, КВЧ, микроорганизмы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-248-255

Введение

Механизм действия микроволнового излучения на клетки остается актуальной проблемой в современной молекулярной биологии и биофизике. Долгое время считалось, что воздействие микроволновых полей на биологические объекты вызвано локальным нагревом (тепловой эффект), однако в последние годы было показано, что биологическое воздействие электромагнитного излучения проявляется и при сверхмалых интенсивностях (ниже пороговой величины теплового эффекта — 10 мВт/см^2), когда средний по объему нагрев тканей не является определяющим или пренебрежимо мал [1, 2].

Кроме того, низкоинтенсивное микроволновое воздействие имеет четко выраженный частотно-зависимый характер в очень узкой полосе частот, что является весьма необычным откликом живых организмов на внешнее электромагнитное воздействие [3].

Воздействие микроволнового излучения на биологическую мембрану

В работе [4], посвященной исследованию нетеплового воздействия СВЧ-излучения на микроорганизмы, было установлено, что основной механизм связан с активацией многослойной адсорбции молекул воды на гидрофильной поверхности биологической мембраны за счет перераспределения электронной плотности молекул-акцепторов, что приводит к вытеснению ионов H^+ за пределы адсорбированных слоев в область с повышенной концентрацией ионов водорода. В результате возникает градиент концентрации протонов ($\Delta\mu_{\text{H}^+}$).

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 248–255.

© А. В. Киореску, 2017.

Энергия, образующаяся при прохождении потока протонов по градиенту концентрации обратно через биологическую мембрану, используется ферментом АТФ-синтазой для синтеза молекулы АТФ (аденозинтрифосфата) из молекулы АДФ (аденозиндифосфата) и иона фосфорной кислоты (рис. 1). Молекула АТФ – универсальный источник энергии для всех биохимических процессов, протекающих в живых организмах, в том числе и в микроорганизмах. Наибольшую чувствительность тест-штамм в этом исследовании проявлял к СВЧ-излучению на $\lambda = 4.9$ и 5.6 мм с 60-ти минутной экспозицией.

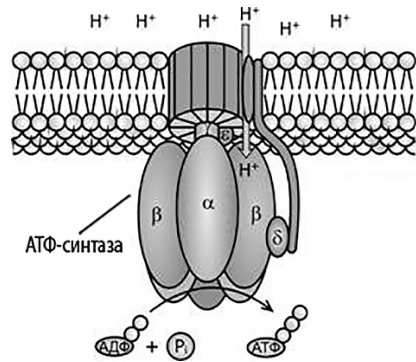


Рис. 1. Схема работы АТФ-синтазы

В процессах жизнедеятельности микроорганизмов важна роль мембранных пор как каналов обмена клетки веществом и энергией с окружающей средой или другими клетками. Поры (ионные каналы) поддерживают разность потенциалов, которая существует между внешней и внутренней сторонами клеточной мембраны всех живых клеток. В работе [5] были выявлены основные закономерности воздействия СВЧ-излучения на размер пор. Было показано, что наводимый СВЧ полем потенциал, способен воздействовать на размеры пор, не вызывая разрушения мембраны. Такое воздействие будет способствовать ускорению или замедлению ионного транспорта в зависимости от направления приложения внешнего потенциала.

При изучении влияния микроволнового излучения на структурно-динамическое состояние модельных биологических мембран в работе [6] было выяснено, что если при частоте 61,8 ГГц объем воды, ассоциированной с полярными группами фосфолипидов липосомом находящихся в составе биологической мембраны, возрастает, то при 62,6 ГГц наблюдается иная картина, которая свидетельствует об уменьшении поверхностного водно-липидного слоя. Таким образом, при облучении на частоте 61,8 ГГц происходит разрыхление (разупорядочивание) водного окружения фосфолипидов биологической мембраны, а при 62,6 ГГц, наоборот, увеличение слоя пограничной воды. И в обоих случаях эти изменения происходят на фоне возрастающей, по сравнению с контролем, плотности упаковки фосфолипидных головок в плазмолемме (биологической мембране).

Влияние микроволн на образование активных форм кислорода (АФК)

В живых организмах под влиянием микроволнового излучения образуются активные формы кислорода (АФК), это небольшие молекулы с исключительной реактивностью благодаря наличию неспаренного электрона на внешнем электронном уровне. Активные формы кислорода химически очень агрессивны: они повреждают белки и ДНК и, главное, вызывают перекисное окисление липидов.

Известно, что АФК при достаточно низких концентрациях могут оказывать многостороннее регуляторное действие (рис.2) на биохимические процессы, и в связи с этим рассматриваются, как система межклеточных и внутриклеточных мессенджеров [7].

Например, образование перекиси водорода при воздействии микроволновой энергии при длине волны 8 мм (38 ГГц), приводит к ингибированию фермента супероксиддисмутазы, влияя тем самым на активность многих ферментативных систем внутри клетки.

Перекись водорода восстанавливается и дает гидроксил-радикал (OH^*). Реакционная способность последнего чрезвычайно высока, поэтому гидроксил-радикал способен окислить практически любое вещество клетки, включая ДНК. Взаимодействие свободных радикалов с молекулами ДНК, приводит к возникновению различных типов мутаций [8].

Наиболее активный гидроксильный радикал (OH^*), который образуется при воздействии микроволн на водосодержащую среду, взаимодействует с большинством органических молекул. Гидроксильный радикал оттягивает на себя электрон и инициирует таким образом цепные реакции окисления. Наиболее подвержены действию АФК жирные кислоты, содержащие двойные связи, расположенные через CH_2 -группу. Именно от этой CH_2 -группы свободный радикал легко отнимает электрон, превращая липид в свободный радикал. Данные процессы приводят к изменению структуры биологической мембраны, гидрофобный слой которой представлен производными жирных кислот [9].

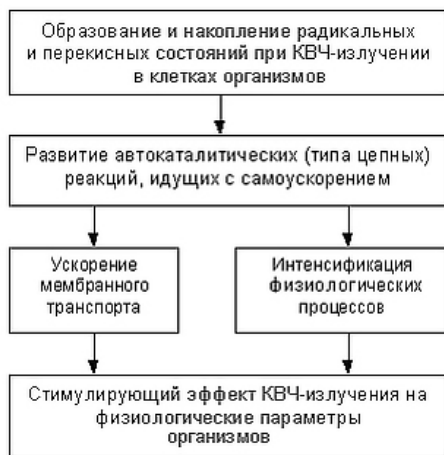


Рис. 2. Механизм действия KBЧ – излучения на процессы жизнедеятельности (по: Сеницын и др., 1999)

Исследование влияния микроволн на процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ) в моделях биологических мембран принесли важную информацию о механизмах действия КВЧ-излучения на биологические объекты. В работе [10] для диапазона волн 4,0–7,1 мм обнаружено ускорение процессов ПОЛ в суспензии липосом при нетепловых мощностях излучения (не более 0,5 мВт/см² при $\lambda = 6,5$ мм). Объяснение эффекта ускорения ПОЛ общим нагревом препаратов исключено, так как скорость ПОЛ в мембранных системах сильно зависит от их структурного состояния, можно предположить, что эффект связан со структурными изменениями мембран липосом и окружающей их воды при поглощении КВЧ-излучения.

Взаимодействие микроволн на биомолекулы

Еще один биологический эффект связан с влиянием квантов микроволнового излучения на кинетическую энергию вращения полярных молекул (ДНК, РНК, белки). Это означает, что микроволны влияют на высокоспецифичную агрегацию белков, находящуюся под генетическим контролем. В результате формируются временные структуры, способные даже в низких концентрациях вызывать модуляцию транскрипции клеточных генов. Изменение генной экспрессии является причиной изменения скорости роста биомассы, влияет на цикл клеточного деления, приводит к изменению интенсивности образования межклеточных контактов и клеточных рецепторов [11].

Принципиальным для запуска биологического эффекта микроволн является критическая гидратация белков, при которой белки из функционально пассивного состояния переходят в активное. Рецепторные белки, испытавшие фазовый переход, оказывают решающее влияние на метаболические процессы, происходящие в клетках.

Также установлено [12] что высокочастотное излучение оказывает влияние на аминокислотный состав микроорганизмов. Аминокислоты – мономеры и основной компонент построения всех белков. Так при облучении бактерии длиной волны 7,2 мм, наблюдалось увеличение аминокислот, относящихся к группе кислых, однако количество аминокислот, относящихся к группе щелочных, снижалось, по сравнению с необлученными бактериями. При облучении тех же бактерий но волнами с длиной 7,6 мм увеличивалось содержание щелочных аминокислот, а относящихся к группе кислых оставалось неизменным, по отношению к контролю.

Влияние микроволн на образование биопленок

Бактерии, в том числе участвующие в процессах биовыщелачивания, существуют в двух разных формах: свободноплавающие (планктонные) клетки и в виде прикрепленных к субстрату биопленок.

Существование бактериальных клеток в составе биопленок обеспечивает им ряд преимуществ по сравнению с планктонной формой жизни. Внутри биопленки бактерии обладают повышенной резистентностью к агрессивным факторам окружающей среды. Повышенная выживаемость бактерий в составе биопленки связана с уменьшением их свободной поверхности за счет контактов друг с другом. В работе Прониной Е. А. было показано, что микроволновое излучение на частоте молекулярного спектра поглощения и испускания излучения (МСПИ) O_2 повышает способность микроорганизмов к пленкообразованию. Напротив, облучение на частоте МСПИ NO снижает способность к пленкообразованию [13].

В работе [14] изучалась способность бактерий к пленкообразованию под влиянием электромагнитного излучения частотных диапазонов 42,2 ГГц и 61,0 ГГц. Результаты свидетельствуют о том, что обработка бактериальной культуры электромагнитными полями миллиметрового диапазона, оказывала влияние на способность к пленкообразованию. КВЧ-волны в частотном диапазоне 61,0 ГГц оказывали стимулирующее воздействие на пленкообразующие способности бактерий. Иная картина наблюдалась при облучении с частотой 42,2 ГГц: доля штаммов с высокой способностью образовывать биопленки снизилась.

Влияние миллиметровых волн на адгезивные свойства бактерий

Известно, что ключевым механизмом колонизации микроорганизмов является адгезия. Роль адгезинов у бактерий выполняют поверхностные белки клеточных стенок, липополисахариды, тейхоевые кислоты, а также фимбрии (пили). В работе [15] исследовалось влияние микроволн и УЗ на адгезивные способности микроорганизмов. Исследования показали адаптированную реакцию тест-культур на действие миллиметровых волн двух диапазонов – 7,1 мм и 4,9 мм (42,2 ГГц и 61,0 ГГц). Облучение исследуемых штаммов в частотном диапазоне 42,2 ГГц привело к выраженному снижению адгезивных свойств у бактерий. Так, среднее количество прикрепленных бактерий снизилось по сравнению с контрольными культурами у музейных штаммов в 1,7 раза. Миллиметровые волны с частотой 61,0 ГГц вызывали у облученных культур противоположный эффект, характеризующийся повышением показателей адгезивной активности как у музейных, так и у тест-штаммов почти в 2 раза.

Приведенные результаты эксперимента демонстрируют зависимость адгезивной активности исследуемых культур от диапазона облучения. Выявленные разнонаправленные эффекты влияния электромагнитных волн миллиметрового диапазона на изменение адге-

живности бактерий свойственны в одинаковой степени всем исследуемым тест-культурам, независимо от видовой принадлежности. Возможно, электромагнитное поле способствует возбуждению электронной энергии атомов и молекул, что может приводить к изменению реакционных возможностей некоторых участков биомолекул микроорганизмов, обеспечивающих колонизацию.

Заключение

Проведенный анализ работ, направленных на изучение механизмов нетеплового воздействия микроволнового излучения на микроорганизмы, позволяет сделать выводы о перспективности применения микроволн в качестве физического агента, оказывающего многостороннее влияние на жизнедеятельность микробов. При разных параметрах облучения микроволны могут вызывать абсолютно противоположные эффекты, как на клеточном, так и на молекулярном уровне, поэтому необходимо более глубокое и детальное изучение механизмов, а также постановка экспериментов и выявление оптимальных параметров облучения, необходимых для достижения результатов и решения конкретно поставленных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киореску А. В.* Исследование влияния СВЧ-излучения на ацидофильные хемолитотрофные бактерии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. 31. – С. 313–318.
2. *Киореску А. В.* Особенности воздействия микроволнового излучения на ацидофильные хемолитотрофные бактерии с целью интенсификации бактериально-химического выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 63. – С. 340–345.
3. *Бецкий О. В., Лебедева Н. Н.* Миллиметровые волны и живые системы // Наука в России. – 2005. – №. 6. – С. 13–19.
4. *Кузнецов Д. Б. и др.* Эффекты воздействия СВЧ излучения на *Escherichia coli lum+* // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2013. – №. 2. – С. 71–75.
5. *Артемова Д. Г.* Транспорт ионов через мембрану при наличии низкоинтенсивного СВЧ-излучения: дис. – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04. 04: 03.01. 02/ДГ Артемова.
6. *Крыницкая А. Ю., Суханов П. П., Седельников Ю. Е.* Влияние КВЧ-излучения на структурно-динамическое состояние модельных биомембран // Радиоэлектроника. – 2011. – №4. – С. 1–9.
7. *Казаринов К. Д.* Биологические эффекты электромагнитного поля терагерцового диапазона // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2009. – №. 4. – С. 48–58.
8. *Волькенштейн М. В.* Биофизика. – Наука, 1988.

9. Бурлакова Е. Б., Храпова Н. Г. Перекисное окисление липидов мембран и природные антиоксиданты //Успехи химии. – 1985. – Т. 54. – №. 9. – С. 1540-1558.

10. Владимиров Ю. А., Арчаков А. И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. – Наука, 1972. – Т. 19. – №. 2.

11. Кузнецов Д. Б. Перспективы применения электромагнитных излучений крайне высокой частоты малой мощности в фармации //Фундаментальные исследования. – 2012. – №. 10-2.

12. Манойлов С. Е. и др. Влияние электромагнитных волн миллиметрового диапазона на некоторые стороны белкового метаболизма бактерий //Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110. – №. 7. – С. 461-462.

13. Пронина Е. А., Швиденко И. Г., Шуб Г. М. Формирование бактериальных биопленок под воздействием электромагнитного излучения //Фундаментальные исследования. – 2010. – №. 10. – С. 40-45.

14. Рыжкова Т. А. и др. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на способность патогенных коринебактерий к образованию биопленок //Живые и биокосные системы. – 2015. – №. 14. – С. 4.

15. Антушева Т. И. и др. Влияние ультразвука и электромагнитных волн миллиметрового диапазона на адгезивные свойства *S. diphtheriae* //Успехи современного естествознания. – 2014. – №. 3. **PLAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Киореску Александр Вадимович – аспирант, младший научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 248–255.

A. V. Kioresku

MOLECULAR MECHANISMS OF A NON-THERMAL INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON MICROORGANISMS

This paper is a review article, which presents and systematizes information from previously published materials on the mechanisms of the effect of microwave radiation on microorganisms.
Key words: Microwave energy, microwave, EHF, bioleaching.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-248-255

AUTHOR

Kioresku A. V., PhD student, junior scientist, e-mail: nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Kioresku A. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2016. no. 31. pp. 313–318.
2. Kioresku A. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2015. no 63. pp. 340–345.
3. Beckiy O.V, Lebedeva N. N. *Nauka v Rossii*. 2005. no 6. pp. 13–19.
4. Kuznecov D. B. i dr. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Fizika*. 2013. no 2. pp. 71–75.
5. Artemova D. G. *Transport ionov cherez membranu pri nalichii nizkointensivnogo SVCH-izlucheniya* (Transport of ions through the membrane in the presence of low-intensity microwave radiation): dis. avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk: 01.04. 04: 03.01. 02/DG Artemova.
6. Krynickaya A.YU., Sukhanov P. P., Sedelnikov YU E. *Radioelektronika*. 2011. no 4. pp. 1–9.
7. Kazarinov K. D. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCH-tekhnika*. 2009. no 4. pp. 48–58.
8. Volkenshteyn M V. *Biofizika* (Biophysics). Nauka. 1988.
9. Burlakova E. B., Khrapova N. G. *Uspekhi khimii*. 1985. T. 54. no 9. pp. 1540–1558.
10. Vladimirov Yu A., Archakov A I. *Perekisnoye okisleniye lipidov v biologicheskikh membranakh* (Peroxidation lipid in biological membranes). Nauka. 1972. T. 19. no 2.
11. Kuznetsov D. B. *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2012. no 10-2.
12. Manoylov S. E. i dr. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1973. T. 110. no 7. pp. 461–462.
13. Pronina E. A., Shvidenko I. G., Shub G. M. *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2010. no 10. pp. 40–45.
14. Ryzhkova T. A. i dr. *Zhivyye i biokosnyye sistemy*. 2015. no 14. p. 4.
15. Antusheva T. I. i dr. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2014. no 3.



В. О. Мусихин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЗИ НА КУЛЬТУРУ АЦИДОФИЛЬНЫХ ХЕМОЛИТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В СРЕДЕ 9К СИЛЬВЕРМАНА И ЛУНДГРЕНА С ДОБАВЛЕНИЕМ FE(II)

Проведено исследование воздействия ультразвукового излучения на культуру ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, выделенных из руды месторождения Шануч (Камчатка). Воздействие на культуру в заданных параметрах облучения не имеет выраженного эффекта на окислительную активность микроорганизмов, но значительно влияет на пролиферативную активность клеток. Максимальный прирост биомассы отмечен в образце, прошедшем 20 минутное ультразвуковое облучение, достигнув к третьим суткам эксперимента значения, превышающего концентрацию клеток в контроле более чем в два раза.

Ключевые слова: бактериально-химическое выщелачивание, ультразвук, сульфидные руды, никель, медь, кобальт, извлечение металлов, сообщество микроорганизмов, биотехнология.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-256-263

Введение

Истощение запасов высококачественного минерального сырья, усиление природоохранных мер, растущая стоимость извлечения металлов из руд, все эти факторы способствуют развитию новых технологий в горнодобывающей и металлургической промышленности. Биовыщелачивание – это привлекательная альтернатива традиционным физическим и химическим методам, благодаря минимизации пагубного воздействия на окружающую среду и низкой ресурсоёмкости [1].

В течение последних десятилетий промышленное применение микроорганизмов для получения металлов достигло широких масштабов в разных регионах мира. В наши дни БХВ применяется в промышленных масштабах более чем в 20 странах мира, при получении меди и урана из бедных и забалансовых руд или отвалов горнорудных предприятий. В настоящее время методами бактериально-химического выщелачивания добывается около 20 % меди и значительная часть урана (США, Канада, Мексика, Перу, Испания, Австралия и др.). Появляются новые промышленные установки бактериаль-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 256–263.

© В. О. Мусихин, 2017.

ного выщелачивания во многих странах (Австралия, Бразилия, Гана, Замбия, Канада, Россия, США, ЮАР) [2].

Бактериально-химическое выщелачивание руд – это достаточно медленный и неэнергоёмкий процесс, по сравнению с химическим выщелачиванием и другими классическими методами, используемыми в горнодобывающей и металлургической отраслях промышленности [2]. Одним из многих методов физической стимуляции и ускорения этого процесса, применение УЗИ является перспективным методом увеличения эффективности [3, 4]. Ультразвуковое излучение, как правило, связывают с повреждением клеток и другими негативными биологическими эффектами. Тем не менее, экспериментально установлено, повышение извлечения металлов, в процессе бактериально-химического выщелачивания, при ультразвуковом воздействии [4].

В ряде проведённых исследований описано действие УЗИ на процессы и эффективность выщелачивания [5, 8, 10, 11, 12, 13]. Результатом биовыщелачивания, интенсифицированного воздействием УЗИ, может быть более эффективное и селективное извлечение Cu, Zn и Ni из руд [6]. В работе [7] описано ультразвуковое воздействие с частотой 40 кГц при интенсивности 1,5 Вт/см², которое дает оптимальные результаты извлечения металлов быстрее, чем обычное бактериально-химическое выщелачивание. Помимо увеличения количественных показателей извлечения [8, 9], многие авторы отмечают повышение скорости биовыщелачивания при ультразвуковом воздействии [10].

Материалы и методы

Руда

В работе использована сульфидная руда медно-никелевого месторождения Шануч с содержанием 60–90 % сульфидных минералов, из которых 65–75 % составляет пирротин, 20–25 % – пентландит, до 10 % – виоларит, до 5 % – халькопирит, до 3 % – пирит. Исходные концентрации металлов в образцах представлены в таблице 1. Степень измельчения руды ≤100 мкм.

Таблица 1

Исходные концентрации металлов в образцах руды

Шифр пробы	Ni, %	Cu, %	Co, %	Fe ₂ O ₃ %
ТП-38	6,26	0,99	0,174	41,35

Бактериальная культура

В исследовании использована мезофильная микробная ассоциация, выделенная из образца руды ТП-38 месторождения Шануч. В реактор объемом 2л было добавлено 100 г сульфидной руды ТП-38 и

1,5л стерильной питательной среды 9К Сильвермана и Лундгрена без железа ($pH \approx 1,8$). Дальнейшее культивирование проводилось при $30^\circ C$ с перемешиванием пульпы 90 об/мин и аэрацией смеси – 2 л/мин до достижения плотности биомассы 10^7 клеток/мл. Подсчет клеток производился с использованием светового микроскопа. Биомасса была выделена из раствора и сконцентрирована до плотности 10^8 клеток/мл, перед посевом.

Эксперимент

Эксперимент по бактериально-химическому выщелачиванию был проведён в шести конических колбах объёмом 250 мл. В каждую из ёмкостей было добавлено 100 мл стерильной минеральной среды 9К с добавлением двухвалентного железа ($pH \approx 1,8$ $C_{Fe} = 5$ г/л) и 1 мл клеточной суспензии. Ультразвуковая активация микроорганизмов находящихся в минеральной среде, происходила в ультразвуковой ванне с термостатом Сапфир ТТЦ 28 с внутренним размером камеры $50 \times 30 \times 20$ см, ультразвуковым генератором с частотой 40 кГц, мощностью 240 Вт (табл. 2). Процесс бактериально-химического выщелачивания длился 4 суток, три комнатной температуре на качалке.

Таблица 2

Время облучения образцов

Шифр колбы	Время облучения, минут
К	-
5	5
10	10
15	15
20	20
30	30

Результаты и их обсуждение

На рис. 1–6 представлены результаты эксперимента (графики изменения Eh, pH, концентрации $Fe_{3+}/Fe_{2+}/Fe_{обш.}$, количества бактериальных клеток в миллилитре).

Развитие микроорганизмов и выщелачивание металлов – это два процесса, проходящих одновременно. Протекание процесса микробного выщелачивания металлов, главным образом, зависит от pH культуральной среды. График изменения pH представлен на рис. 1. Процесс изменения кислотности и, как следствие, многие метаболические процессы во всех колбах имели одинаковый характер. Облучение в экспериментальных дозах не приводит к резким изменениям pH среды и жизнедеятельности микроорганизмов и не вызывает резко отрицательных биологических эффектов в ближайшее от облучения время, что также подтверждается рис. 2–5.

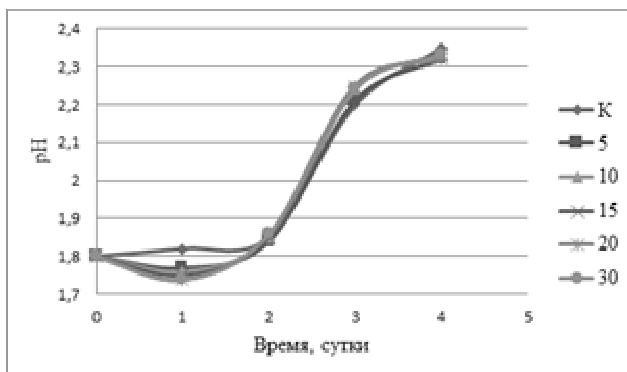


Рис. 1. Изменение pH в жидкой фазе пульпы

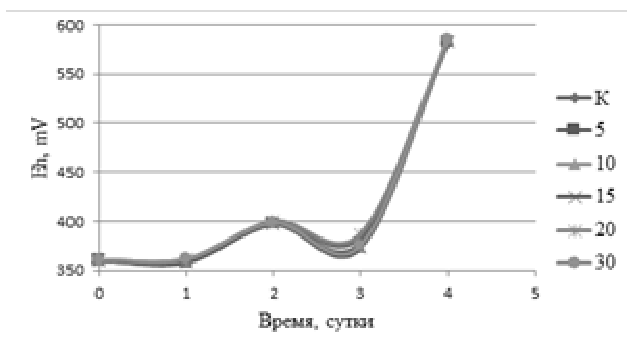


Рис. 2. Изменение концентрации ионов $Fe^{2+}/3^{+}$ в жидкой фазе пульпы

Главными критериями оценки эффективности УЗ интенсификации в данном эксперименте были приняты: скорость окисления железа, концентрация микроорганизмов (рис. 3–6). Из представленных данных об изменении концентрации ионов железа (рис. 3–5), можно заключить, что процесс генерации ионов Fe^{3+} , протекает идентично во всех колбах со средней скоростью $1,25 \text{ г/л} \cdot \text{сутки}$, вне зависимости от ультразвуковой активации, что согласуется с результатами, полученными об изменении pH и Eh.

Рост концентрации бактериальных клеток у образцов, прошедших УЗ активацию, идёт интенсивнее, чем в контроле (рис. 6). Максимальная концентрация клеток была достигнута на третьи сутки в каждом из опытных образцов. Самая высокая плотность бактериальных клеток в среде была достигнута в колбе, прошедшей облучение 20 минут. Количество бактериальных клеток в миллилитре среды этого опытного образца ($116,54 \cdot 10^6$) выше, чем в контроле ($54,01 \cdot 10^6$) в

2,16 раза. Полученные данные согласуются с уже имеющимися результатами исследований, где был отмечен эффект резкого увеличения количества клеток после облучения [12, 13, 14].

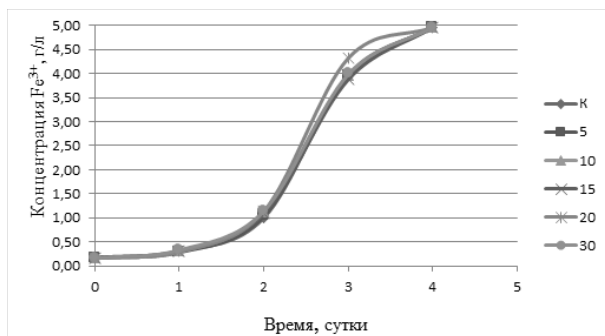


Рис. 3. Изменение концентрации ионов Fe³⁺

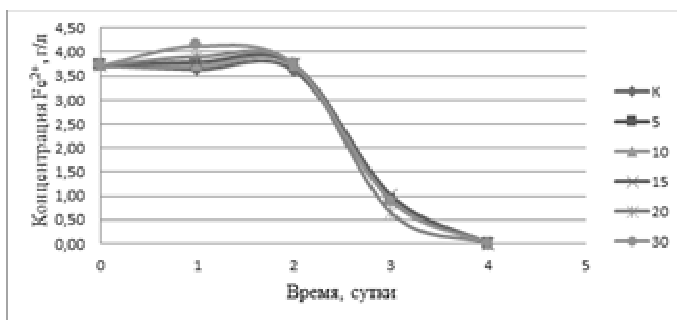


Рис. 4. Изменение концентрации ионов Fe²⁺

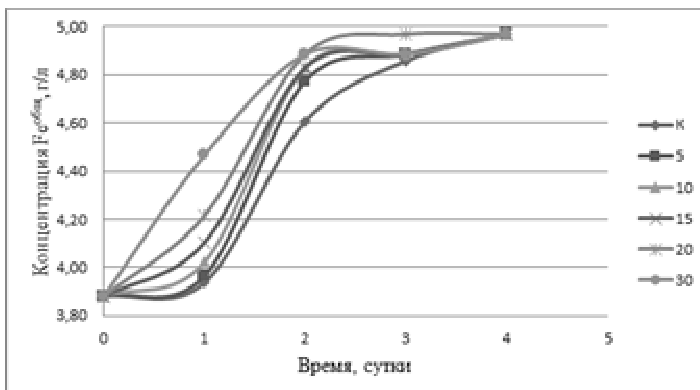


Рис. 5. Изменение концентрации ионов Feобщ

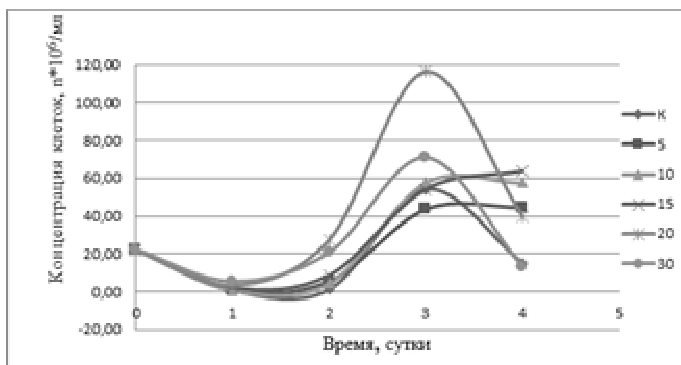


Рис. 6. Изменение концентрации клеток

Выводы

Результаты исследований позволяют заключить, что предварительная ультразвуковая обработка микроорганизмов, при заданных характеристиках облучения, не имеет выраженного эффекта. Необходимо проведение дальнейших исследований для определения оптимального режима воздействия УЗИ на процесс бактериально-химического выщелачивания. Перспективны для исследования работы, связанные с облучением клеток большими дозами в процессе биовыщелачивания, а также использование фракционирования доз облучения и неоднократного облучения в ходе процесса бактериально-химического выщелачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы применения биотехнологий в металлургии и обогащении / Н. М. Теляков, А. А. Дарьин, В. А. Луганов // Записки горного института. 2016. Т. 217 С. 113.
2. Разработка биотехнологии переработки коллективного сульфидного медно-молибденового концентрата / М. Г. Сагдиева, С. И. Борминский, А. М. Мавжудова и др. // Горный вестник Узбекистана. 2009. № 1. С. 64–70.
3. Киореску А. В., Мусихин В. О., Хомченкова А. С. Исследование процессов проточного бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. Специальный выпуск 31, С. 272–280.
4. Киореску А. В. Исследование влияния СВЧ-излучения на кислотолюбивые хемолитотрофные бактерии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. S31. – С. 313–318.
5. Мусихин В. О., Механизм воздействия ультразвукового излучения на процессы бактериально-химического выщелачивания. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. специальный выпуск 2, С. 356–359.

6. Мусихин В. О. Методы интенсификации процессов бактериально-химического выщелачивания воздействием ультразвукового излучения. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. СП 2. – С. 351–355.

7. Barrera-Godinez J. A., Okeefe T. J., Watson J. L., 1992. Effect of ultrasound on acidified brine leaching of double kiln treated EAF dust. Miner. Eng. 5, 1365.

8. Anjum F., Bhatti H. N., Ghauri M. A., 2010b. Enhanced bioleaching of metals from black shale using ultrasonics. Hydrometallurgy 3–4 (100), 122–128.

9. Shi-jie, Z., Wen-qing, Q., Zhong-qiang, Y., Yan-sheng, Z., Jun, W., Liu-yi, R., 2008. Bioleaching of low grade nickel sulfide mineral in column reactor. Trans. Non-ferrous Metall. Soc. China 18, 1480–1484.

10. Sukla L. B., Swamy K.M., Narayana K.L., Kar R.N., Panchanadikar V.V., 1995. Bioleaching of Sukinda laterite using ultrasonics. Hydrometallurgy 37, 387–391.

11. Swamy K. M., Sukla L. B., Narayana K. L., Kar R. N., Panchanadikar V. V., Application of ultrasonics in improvement of fungal strain, Acoust. Lett. 17 (1993) 43–49.

12. Swamy K. M., Narayana K.L., Vibhuti N., Misra, 2005. Bioleaching with ultrasound. Ultrason. Sonochem. 12, 301–306.

13. Bar R. Ultrasound-enhanced bioprocesses: cholesterol oxidation by Rhodococcus erythropolis, Biotechnol. Bioeng. 32 (1988) 655–663.

14. Chisti Y., Mass transfer, in: Flickinger M. C., Drew S. W. (Eds.), Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation, vol. 3, John Wiley, 1999, pp. 1607–1640. **П/АБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Мусихин В. О. – младший научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения РАН.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.

No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 0–00.

V. O. Musikhin

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ULTRASOUND ON THE CULTURE OF AXIDOPHILIC CHEMOLITHOTROPHIC ORGANISMS IN 9K SILVERMAN AND LUNGGREN ENVIRONMENT WITH ADDITION OF FE (II)

The effect of ultrasound radiation on the culture of acidophilic chemolithotrophic microorganisms isolated from the ore of the Shanuch deposit (Kamchatka) was studied. The effect on the culture in the given irradiation parameters does not have a pronounced effect on the oxidative activity of microorganisms, but it significantly affects the proliferative activity of the cells. The maximum increase in biomass was noted in the sample after a 20-minute ultrasonic irradiation, reaching values exceeding the cell concentration in the control by more than two times by the third day of the experiment.

Key words: biochemical leaching, ultrasound, sulphide ores, nickel, copper, cobalt, metal extraction, microorganisms community, biotechnology.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-0-0

AUTHOR

Musikhin V. O., junior scientist, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Telyakov N. M., Dar'in A. A., Luganov V. A. *Zapiski gornogo instituta*. 2016. T.217. pp. 113.
2. Sagdieva M. G., Borminskij S. I., Mavzhudova A. M. i dr. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. 2009. no 1. pp. 64–70.
3. Kioresku A. V., Musihin V. O., Homchenkova A. S. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*. 2016. Specialnyj vypusk 31, pp. 272–280.
4. Kioresku A. V. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2016. no S31. pp. 313–318.
5. Musihin V. O. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2015. special'nyj vypusk 2, pp. 356–359.
6. Musihin V. O. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2015. special'nyj vypusk 2, pp. 351–355.
7. Barrera-Godinez J. A., Okeefe T. J., Watson J. L., 1992. *Effect of ultrasound on acidified brine leaching of double kiln treated EAF dust*. *Miner. Eng.* 5, 1365.
8. Anjum F., Bhatti H. N., Ghauri M. A., 2010b. *Enhanced bioleaching of metals from black shale using ultrasonics*. *Hydrometallurgy* 3–4 (100), 122–128.
9. Shi-jie, Z., Wen-qing, Q., Zhong-qiang, Y., Yan-sheng, Z., Jun, W., Liu-yi, R., 2008. *Bioleaching of low grade nickel sulfide mineral in column reactor*. *Trans. Nonferrous Metall. Soc. China* 18, 1480–1484.
10. Sukla L. B., Swamy K.M., Narayana K.L., Kar R.N., Panchanadikar V.V., 1995. *Bioleaching of Sukinda laterite using ultrasonics*. *Hydrometallurgy* 37, 387–391.
11. Swamy K. M., Sukla L. B., Narayana K. L., Kar R. N., Panchanadikar V. V. *Application of ultrasonics in improvement of fungal strain*, *Acoust. Lett.* 17 (1993) 43–49.
12. Swamy K. M., Narayana K.L., Vibhuti N., Misra, 2005. *Bioleaching with ultrasound*. *Ultrason. Sonochem.* 12, 301–306.
13. Bar R. *Ultrasound-enhanced bioprocesses: cholesterol oxidation by Rhodococcus erythropolis*, *Biotechnol. Bioeng.* 32 (1988) 655– 663.
14. Chisti Y., Mass transfer, in: Flickinger M. C., Drew S. W. (Eds.), *Encyclopedia of Bio-process Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation*, vol. 3, John Wiley, 1999, pp. 1607–1640.



НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА МИКРООРГАНИЗМЫ В ПРОЦЕССЕ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Изложен краткий обзор современной научно-методической литературы, описывающий ультразвуковые воздействия на биообъекты. Представлены механизмы и некоторые особенности влияния данного физического фактора на микроорганизмы. Рассмотрены различные биологические эффекты, возникающие у микроорганизмов под действием ультразвукового излучения различных физических характеристик. Представлены перспективы практического применения ультразвуковых технологий в процессах бактериально-химического выщелачивания.

Ключевые слова: бактериально-химическое выщелачивание, ультразвук, извлечение металлов, сообщество микроорганизмов, биотехнология.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-264-270

Введение

Среди актуальных задач современной микробиологии важным направлением является изучение принципов и механизмов воздействия внешних физических факторов [1, 2, 3, 4] на состояние микроорганизмов, для возможного использования этих воздействий в решении прикладных задач и внедрения новых технологий в медицине и различных отраслях биотехнологии.

Ультразвук является фактором, значительно влияющим на функциональное состояние микроорганизмов [1, 5, 6, 7, 8]. Несмотря на повсеместное использование УЗ в различных отраслях науки, техники и медицины, механизмы его воздействия требуют детального изучения. Ультразвуковое излучение выражено влияет на физические, химические и биологические процессы [1, 8, 9, 10].

Бактериально-химическое выщелачивание это медленный и неэнергоёмкий процесс, по сравнению классическими методами горнодобывающей и металлургических промышленности. Одним из методов физической стимуляции и ускорения этого процесса, применение УЗ является перспективным методом увеличения производительности [11].

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 264–270.

© В. О. Мусихин, 2017.

Особенности влияния УЗ на микроорганизмы

Действие УЗ излучения на биологические объекты зачастую объясняется явлением кавитации [1]. Кавитация – это процесс образования полостей в жидкой среде, заполненных парами самой жидкости, которые возникают под действием разрывающих напряжений и в следующее мгновение схлопываются, что сопровождается резкими перепадами давлений и локальным нагревом среды. Импульсы давления, возникающие при смыкании кавитационных камер, могут разрушить не только твёрдые или жидкие тела, но и микроорганизмы [1, 8, 12].

При адиабатическом сжатии кавитационной камеры температура может достигать 10^4K , что обуславливает тепловой механизм химического действия кавитации [10]. Действие УЗ на живые организмы непосредственно связано с химическими реакциями, инициированными излучением в водных растворах. При высоких температурах молекулы воды внутри полости кавитационного пузырька переходят в возбуждённое состояние и распадаются на радикалы H^* , OH^* . Некоторые радикалы рекомбинируют, конечный состав радикальных и молекулярных продуктов зависит от растворённых в воде веществ [10]. Например, при облучении воды, в которой растворён воздух, образуются оксиды азота и перекись водорода. Помимо этого, ультразвуковое воздействие увеличивает скорость некоторых химических процессов. Обычно это реакции, протекающие в присутствии H_2O_2 и H^+ и окислительные реакции, требующие присутствия атомарного кислорода. Ускорение многих химических реакций происходит по причине действия различных физико-химических УЗ: дегазация, диспергирование, эмульгирование, локальный нагрев при кавитации и др. [14].

Вторичные эффекты физико-химического характера также могут являться причиной изменений биообъектов под действием УЗ. Образующиеся акустические потоки вызывают перемещение внутриклеточных микроскопических структур. Кавитация приводит к разрыву молекулярных связей. Подобно молекулам воды распадаются с образованием свободных радикалов молекулы биополимеров (крахмала, нуклеиновых кислот, белков) [8, 15].

Одна из основных особенностей воздействия УЗ на микроорганизмы – это влияние на клеточные мембраны. Действие излучения приводит к значительному изменению механических и электрических свойств мембран и, как следствие, к нарушению состава клеток [8, 16, 17, 18]. С другой стороны, акустическая волна создает микровихри в окружающей среде, обеспечивая равномерное распределение

компонентов раствора, что вызывает изменение концентраций различных веществ в составе цитоплазмы за счет изменения равновесной концентрации веществ по разные стороны клеточной мембраны [1, 19, 20]. Клетка становится более зависимой от состава внешней среды, что может сказаться на процессах жизнедеятельности. Нарушение внутреннего состава клетки, и как следствие, её физиологического состояния — это наиболее глубокое и долговременное изменение. Влияние таких изменений может сказываться на клетке в течение нескольких дней после окончания воздействия излучения.

С ростом интенсивности УЗ, последствия воздействия на клетку можно расположить в следующий ряд: изменение концентрации веществ в цитоплазме — изменение свойств мембраны — нарушение целостности клетки [8, 10].

Эффекты облучения биологических объектов обусловлены сочетанным действием многих факторов и не всегда удаётся проследить чёткие причинно-следственные связи. При практическом применении и изучении влияния УЗ важно изучать и оценивать характер акустического поля, распределение в пространстве звукового давления и интенсивности [9, 14]. Облучение микроорганизмов УЗ малой интенсивности (до 2 Вт/см²) обычно вызывает положительные биологические эффекты (активация роста и пролиферации); большие интенсивности (3–10 Вт/см²) и длительное облучение вызывают отрицательные биологические эффекты (разрывы клеточных стенок и мембран, повреждение флагеллина у подвижных форм, появление свободных радикалов и АФК в цитоплазме) [1, 9, 12].

Механизм, обуславливающий эффекты УЗИ на процессы биовыщелачивания, до сих пор полностью не изучен. Биологические эффекты, связанные с воздействием ультразвука, имеют несколько причин (тепловые, химические, механические, кавитационные), которые не в полной мере характеризуют это явление. Действие ультразвука на БХВ описывается следующими положениями:

- дисперсия микробных клеточных агрегатов приводит к появлению в растворе большего количества единичных микроорганизмов;
- активация пролиферации микроорганизмов;
- дегазация, обусловленная УЗИ, удаляет избыток кислорода и диоксида углерода, обеспечивая благоприятную среду для роста микроорганизмов;
- увеличение скорости усвоения питательных веществ клеткой, за счёт равномерного распределения питательных веществ по всему объёму пульпы;

- выделение тепловой энергии при кавитационных процессах. Дополнительный источник тепла увеличивает темпы роста некоторых микроорганизмов;
- равномерное распределение газов необходимо для нормальной жизнедеятельности микроорганизмов [11, 21, 22, 23].

Заключение

На сегодняшний день результатов проведённых работ недостаточно, чтобы понять механизм действия ультразвука на микроорганизмы в полной мере. Ультразвуковые воздействия на биологические объекты приводят к различным эффектам, физическая природа которых связана с действием факторов, сопутствующих распространению ультразвука в среде: механического, теплового, физико-химического. Различные эффекты вызывают каскад переключаемых биологических реакций и ответов, что только осложняет изучение и понимание воздействия УЗИ.

Оптимальные условия УЗИ при биовыщелачивании были получены только для микроорганизма *A. niger* в конкретных условиях. Влияние ультразвука на другие микроорганизмы, применяемые в биовыщелачивании, не изучено. Интерпретировать данные, полученные в опытах с *A. niger* на другие микроорганизмы, не представляется возможным по причине больших морфологических и физиологических различий микроорганизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопян В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 224 с.
2. Киореску А. В. Исследование влияния СВЧ-излучения на ацидофильные хемолитотрофные бактерии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. S31. – С. 313–318
3. Мусихин В. О. Механизм воздействия ультразвукового излучения на процессы бактериально-химического выщелачивания. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. специальный выпуск 2. – С. 356–359.
4. Мусихин В. О. Методы интенсификации процессов бактериально-химического выщелачивания воздействием ультразвукового излучения. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. специальный выпуск 2. – С. 351–355
5. Буц В. А., Скибенк К. П. Изменение иммуногенности клеток и супернатанта под воздействием ультразвука. // Биофизика. 1991. том 36. вып. №5. — С. 263–265.
6. Перс И. Ф., Жданова Л. Г. Действие ультразвука на биологические свойства бактерий кишечной группы. Сообщение II. Изменение биохимических

свойств и антигенной структуры шигелл и сальмонелл под влиянием ультразвука // ЖМЭИ. 1964. №3. — 27.

7. Симонян З. Г., Кавтарадзе Ц. В. Влияние ультразвуковых волн на патогенные свойства стафилококков и их чувствительность к антибиотикам // Тр. НИКожно-венерол. института МЗГССР. 1970. Т. 13-14. — С. 381-388.

8. Сорока С. А. Влияние акустических колебаний на биологические объекты // Вибрация в технике и технологиях. 2005. № 1. — С. 39 – 41.

9. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. под редакцией В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. — 726 с.

10. Демин И. Ю., Прончатов-Рубцов Н. В. Современные акустические методы исследований в биологии и медицине (учебно-методические материалы) [Электронный ресурс] // Электронный курс лекций. URL: <http://www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/37.pdf>

11. Мусихин В. О. Механизм воздействия ультразвукового излучения на процессы бактериально-химического выщелачивания. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. специальный выпуск 2, С. 356-359

12. Перельман М. И., Моисеев В. С. Бактерицидное действие ультразвука // Проблемы техники в медицине. — Таганрог, 1980. — 38-41.

13. Weissler A. Formation of hydrogen peroxide by ultrasonik waves: free radicals // J. Am. Chem. Soc. 1959. Vol. 81. — P. 1077-1081.

14. Гайдамака И. И. Физическая характеристика и механизм действия ультразвука. [Электронный ресурс] / Сайт медиков-радиологов. URL: <http://smham.ucoz.ru/publ/2-1-0-55>.

15. Шияев А. С. Ультразвук в науке, технике и технологии. Гомель: Институт радиологии, 2007. — 412 с.

16. Исаенко Е. Ю. Применение ультразвука для дезинтеграции микробных клеток. [Электронный ресурс] // Annals of Mechnicov Institute. 2008. №1. С.5-9 URL: <http://www.imiamn.org/journal.htm>

17. Мошиашвили И. Я., Селезнева С. Н., Сандулова С. Л. Электронномикроскопическое изучение морфологии коклюшных микробов, обработанных ультразвуком // Журнал микробиологии эпидемиологии и иммунобиологии. 1969. № 6. — С. 126–128.

18. Сидоров М. А. О действии ультразвука на некоторые патогенные анаэробные и аэробные микроорганизмы // Автореф. дис. канд. вет. наук. — М, 1964. — 24 с.

19. Шапхаев Э. Г., Цыренов В. Ж., Чебунина, Е. И. Основы биотехнологии. Дезинтеграция микробных клеток. Улан-Уде, 2005. — С. 53–65.

20. Harvey, E. N., Loomis, A. L. High Frequency Sound Waves of Small Intensity and Their Biological Effects // Nature, 1928. №121 — P.622.

21. Swamy K. M., Narayana K.L., Vibhuti N., Misra, 2005. Biobleaching with ultrasound. Ultrason. Sonochem. 12, 301–306.

22. Bar R. Ultrasound-enhanced bioprocesses: cholesterol oxidation by Rhodococcus erythropolis, Biotechnol. Bioeng. 32 (1988) 655– 663.

23. Chisti Y., Mass transfer, in: Flickinger M. C., Drew S. W. (Eds.) Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation, vol. 3, John Wiley, 1999, pp. 1607–1640. **П/АБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Мусихин В. О. – младший научный, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 264–270.

V. O. Musikhin

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE USE ON THE CULTURE OF AXIDOPHILIC CHEMOLITHROPHIC ORGANISMS IN 9K SILVERMAN AND LUNDGREN ENVIRONMENT WITH ADDITION OF FE (II)

The article presents a brief review of modern scientific and methodological literature, describing ultrasonic effects on bioobjects. Mechanisms and some features of the influence of this physical factor on microorganisms are presented. Various biological effects that occur in microorganisms under the action of ultrasonic radiation of various physical characteristics are considered. Perspectives of practical application of ultrasonic technologies in the processes of bacterial-chemical leaching are presented.

Key words: biochemical leaching, ultrasound, sulphide ores, nickel, copper, cobalt, metal extraction, microorganisms community, biotechnology.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-264-270

AUTHORS

Musikhin V. O., junior scientist at laboratory of geochemistry and geotechnology, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Akopyan V. B. *Osnovy vzaimodejstviya ul'trazvuka s biologicheskimi ob'ektami: Ul'trazvuk v medicine, veterinarii i ehksperimental'noj biologii* (Bases of the interaction of ultrasound with biological objects: Ultrasound in medicine, veterinary and experimental biology). Moscow: MG TU im. N. EH. Bauman, 2005. 224 s.
2. Kioresku A. V. *Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2016. no S31. pp. 313-318.
3. Musikhin V. O. *Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015. special'nyj vypusk 2, pp. 356-359
4. Musikhin V. O. *Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015. special'nyj vypusk 2, pp. 351-355.
5. Buc V. A., Skibenko K. P. *Biofizika*. 1991. tom 36. vyp. 5. pp. 263-265.
6. Pers I. F., Zhdanova L. G. *ZHMEHI*. 1964. no 3. 27 p.
7. Simonya, Z. G., Kavtaradze C. V. *Tr. Nikozhno-venerol. instituta MZGSSR*. 1970. T. 13-14. pp. 381-388.
8. Soroka S. A. *Vibraciya v tekhnike i tekhnologiyah*. 2005. no 1. pp. 39–41.

9. Bergma, L. *Ul'trazvuk i ego primenenie v nauke i tekhnike* (Ultrasound and its application in science and technology). Per. s nem. pod redakciej V. S. Grigor'eva i L. D. Rozenberga. Moscow: Izd-vo inostrannoj literatury, 1957. 726 p.
10. Demin I.YU., Pronchatov-Rubcov N. V. *Elektronnyj kurs lekcij*.
URL: <http://www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/37.pdf>
11. Musihin V. O. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2015. special'nyj vypusk 2, pp. 356-359.
12. Perel'man M. I., Moiseev B. C. *Baktericidnoe dejstvie ul'trazvuka* (Bactericidal action of ultrasound). *Problemy tekhniki v medicine*. Taganrog, 1980. pp. 38-41.
13. Weissler A. *Formation of hydrogen peroxide by ultrasonik waves: free radicals* (Formation of hydrogen peroxide by ultrasonik waves: free radicals). *J. Am. Chem. Soc.* 1959. Vol. 81. pp. 1077-1081.
14. Gajdamaka I. I. *Sajt medikov-radiolyubitelej*. URL: <http://smham.ucoz.ru/publ/2-1-0-55>
15. Shilyaev A. S. *Ul'trazvuk v nauke, tekhnike i tekhnologii* (Ultrasound in science, engineering and technology). Gornel': Institut radiologii, 2007. 412 p.
16. Isaenko E.YU. *Annals of Mechnicov Institute*. 2008. no 1. pp.5-9
URL: <http://www.imiamn.org/journal.htm>
17. Moshiaev I.YA., Selezneva S. N., Sandulova S L. *Zhurnal mikrobiologii ehpidemiologii i immunobiologii*. 1969. no 6. pp. 126-128.
18. Sidorov M A. *O dejstvii ul'trazvuka na nekotorye patogennye anaerobnye i aerobnye mikroorganizmy* (On the effect of ultrasound on some pathogenic anaerobic and aerobic microorganisms). Avtoref. dis. kand. vet. nauk. Moscow, 1964. 24 p.
19. Shaphaev Eh.G., Cyrenov V. Zh., Chebunina E. I. *Osnovy biotekhnologii. Dezintegraciya mikrobnih kletok* (Fundamentals of biotechnology. Disintegration of microbial cells). Ulan-Ude, 2005. pp. 53-65.
20. Harvey E. N., Loomis A. L. *High Frequency Sound Waves of Small Intensity and Their Biological Effects*. *Nature*, 1928. no 121 p.622.
21. Swamy K. M., Narayana K. L., Vibhuti N., Misra, 2005. *Bioleaching with ultrasound*. *Ultrason. Sonochem.* 12, 301-306.
22. Bar R. *Ultrasound-enhanced bioprocesses: cholesterol oxidation by Rhodococcus erythropolis*, *Biotechnol. Bioeng.* 32 (1988), pp. 655-663.
23. Y. Chisti, Mass transfer, in: M. C. Flickinger S. W., Drew (Eds.). *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation*, vol. 3, John Wiley, 1999, pp. 1607-1640.



ОСОБЕННОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИКЕЛЯ ИЗ СУЛЬФИДНОЙ РУДЫ ПОСРЕДСТВОМ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ПРИ РАЗНЫХ ПЛОТНОСТЯХ ПУЛЬПЫ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Представлены результаты исследования бактериально-химического выщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч. Выявлены особенности извлечения никеля в раствор в зависимости от плотности пульпы и температуры.

Ключевые слова: биовыщелачивание, бактериально-химическое выщелачивание, кобальт-медно-никелевая руда, извлечение никеля, плотность пульпы, температура выщелачивания.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-271-277

Бактериально-химическое выщелачивание является сложным, многоступенчатым процессом. Разработка эффективной технологической схемы биовыщелачивания сульфидной руды предполагает решение сложной задачи – достижения максимального извлечения целевых компонентов в продуктивный раствор при высокой скорости процесса [1, 2].

Целью настоящей работы стало определение особенностей извлечения никеля как основного целевого компонента из сульфидной кобальт-медно-никелевой руды в процессе биовыщелачивания при разных плотностях пульпы и температурах.

Материалы и методы

В работе использовали сульфидную кобальт-медно-никелевую руду месторождения Шануч (Камчатский край) степени измельчения 100 % <100 мкм. Содержание рудных минералов – 60–65 %, из которых 85–90 % – пирротин, 5–6 % – пентландит, 2–5 % – халькопирит, 0,2–0,5 % – виоларит [3]. В руде содержалось 3,3 % Ni, 0,57 % Cu, 0,1 % Co, 20 % Fe.

В качестве инокулята использовали автохтонную мезофильную ассоциацию хемолитотрофных микроорганизмов, выделенную из зо-

ны окисления месторождения Шануч, выращенную на сульфидной кобальт-медно-никелевой руде данного месторождения в питательной среде Сильвермана-Люндгрена ОК [3]. В состав ассоциации входили, преимущественно, *A. ferrooxidans*, *Sulfobacillus* spp. (по данным ПЦР в реальном времени) [5].

Количество бактериальных клеток в жидкой фазе пульпы определяли прямым подсчетом в микроскопе с фазово-контрастной насадкой (МИКРОМЕД 3 вар. 3–20). Величины pH и Eh (окислительно-восстановительный потенциал) измеряли с помощью портативного мультимонитора pH и Eh Kelilong PH-099-KL. Концентрацию ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} в жидкой фазе пульпы определяли методом комплексонометрического титрования трилоном Б. Определение никеля, кобальта и меди в жидкой и твердой фазах осуществляли атомно-абсорбционным методом при помощи атомно-абсорбционного спектрофотометра 6300 Shimadzu (Япония).

Эксперименты проводили в 3 реакторах с механической мешалкой (≈ 120 об/мин). Соотношение культуры и свежей питательной среды = 1:4. Пульпу в течение эксперимента не подкисляли. Испарения восполняли дистиллированной водой; объем раствора, отобранный на химический анализ, – питательной средой ОК. Эксперимент по бактериально-химическому выщелачиванию при разных плотностях пульпы проводили при температуре 28–30 °C и следующих плотностях пульпы (Т:Ж): 1:5, 1:3, 1:2. Эксперимент по бактериально-химическому выщелачиванию при разных температурах проводили при плотности пульпы Т:Ж = 1:5 и следующих температурах: 16 °C, 30 °C, 45 °C.

Результаты и обсуждение

В бактериально-химическом выщелачивании можно выделить три механизма: химическое выщелачивание (за счет кислоты, присутствующей в питательной среде для микробной культуры), прямое или контактное выщелачивание (непосредственное окисление руды бактериями) и не прямое выщелачивание (с помощью Fe^{3+} , образуемого путем окисления бактериями извлекаемого из руды Fe^{2+}) [6, 7]. Таким образом, индикаторами перечисленных механизмов могут быть:

1) для химического выщелачивания – отсутствие биомассы бактерий или ее малое количество, низкая концентрация Fe^{3+} , повышение pH вследствие потребления кислоты пульпой;

2) для прямого биовыщелачивания – наличие бактериальной биомассы в пульпе, нахождение железа в растворе в неокисленном (двухвалентном) состоянии;

3) для непрямого биовыщелачивания – высокая концентрация биомассы в пульпе, высокая концентрация Fe^{3+} в растворе.

В настоящей работе ключевыми параметрами для анализа результатов экспериментов стали: количество бактериальных клеток в 1 мл жидкой фазы пульпы (N кл) как показатель интенсивности прироста бактериальной биомассы; концентрации окисного (Fe^{3+}) и суммарного ($\text{Fe}_{\text{общ}}$) железа как показатель железоокисляющей активности бактерий; скорость выщелачивания и процентное извлечение никеля как показатель интенсивности выщелачивания (табл. 1–3).

Как видно из табл. 1, при плотности пульпы 1:2 (Т:Ж) количество бактериальных клеток и концентрация Fe^{3+} на протяжении всего эксперимента оставались низкими. Извлечение железа из руды составило 6 %, при этом в растворе оно практически все находилось в двухвалентной форме. Таким образом, можно предположить, что при данной плотности пульпы доминирует химическое выщелачивание с максимумом скорости извлечения никеля в первые 3 суток (табл. 2). При плотности пульпы 1:3 количество биомассы было уже на 2 порядка выше, извлечение железа увеличилось в 2 раза (12,5 %), однако почти все оно находилось в двухвалентной форме, как и при Т:Ж = 1:2. Следовательно, в данном случае имеет место как химическое выщелачивание (в первые 3 суток), так и прямое биовыщелачивание (с 4-х по 28-е сутки). При этом соотношение долей химического выщелачивания и прямого биовыщелачивания в извлечении никеля составляет 1:2.

При плотности пульпы 1:5 в первые 3 суток выщелачивание происходит также преимущественно химическим путем. С 4-х по 14-е сутки преобладает прямое биовыщелачивание, характеризующееся приростом бактериальной биомассы и концентрации железа, находящегося в растворе, в основном, в двухвалентной форме. С 15-х суток

Таблица 1

Параметры процесса бактериально-химического выщелачивания при разных плотностях пульпы

Время, сут	Т:Ж = 1:5				Т:Ж = 1:3				Т:Ж = 1:2			
	N кл*	Fe^{3+} , г/л	$\text{Fe}_{\text{общ}}$, г/л	Ext Ni**, %	N кл*	Fe^{3+} , г/л	$\text{Fe}_{\text{общ}}$, г/л	Ext Ni**, %	N кл*	Fe^{3+} , г/л	$\text{Fe}_{\text{общ}}$, г/л	Ext Ni**, %
0	0,37	0,22	2,45	0,5	0,4	1,38	4,28	1,7	0,19	0,84	3,91	2,2
3	3,2	0,56	5,80	9,0	1,5	0,42	5,89	10,6	0,23	0,35	8,93	6,9
8	3,7	0,42	8,66	10,0	1,6	0,32	7,93	12,3	0,12	0,28	10,64	8,2
14	9,6	5,58	11,54	23,8	5,5	2,55	9,33	19,6	0,19	0,67	10,75	9,3
21	27,3	10,68	10,89	47,5	4,2	0,84	15,36	23,9	0,44	0,42	12,42	11,5
28	45,9	17,87	18,08	67,8	11,7	1,02	15,66	31,4	0,70	0,40	12,28	12,1

Примечание: * – количество бактериальных клеток в 1 мл жидкой фазы пульпы ($\times 10^8$); ** – извлечение никеля.

Таблица 2

Скорость выщелачивания никеля

Период времени, сут	Ni ²⁺ , (мг/л)сут ⁻¹			Период времени, сут	Ni ²⁺ , (мг/л)сут ⁻¹		
	Т:Ж = 1:5	Т:Ж = 1:3	Т:Ж = 1:2		16 °С	30 °С	45 °С
0–3	167	293	227	0–3	80	43	240
4–8	58	24	26	4–8	74	46	234
9–14	78	102	8,3	9–14	98	190	43
15–21	187	39	26	15–21	133	230	337
22–28	144	77	-16	22–23	155	120	195
Средняя скорость	127	107	54,3	Средняя скорость	108	126	210

Таблица 3

Параметры процесса бактериально-химического выщелачивания при разных температурах

Время, сут	16 °С				30 °С				45 °С			
	N кл*	Fe ³⁺ , г/л	Fe _{общ} , г/л	Ext Ni ^{**} , %	N кл*	Fe ³⁺ , г/л	Fe _{общ} , г/л	Ext Ni ^{**} , %	N кл*	Fe ³⁺ , г/л	Fe _{общ} , г/л	Ext Ni ^{**} , %
0	0,71	1,79	2,78	0,3	0,99	1,86	2,79	0,3	0,78	1,68	2,82	0,2
3	9,1	0,27	2,78	4,0	12,6	0,42	3,21	2,3	5,2	0,42	1,54	10,8
8	25,0	0,59	5,58	9,9	14,6	1,19	4,77	6,2	1,8	0,39	1,40	28,3
14	35,0	4,47	7,12	19,3	28,7	3,98	7,43	23,5	1,1	0,73	2,07	33,5
21	33,5	9,74	9,74	34,3	40,4	11,48	11,48	48,6	1,5	2,09	2,09	70,0
23	35,0	10,75	10,75	41,1	35,9	12,49	12,49	54,9	2,5	2,93	2,93	79,5

Примечание: * – количество бактериальных клеток в 1 мл жидкой фазы пульпы ($\times 10^8$); ** – извлечение никеля.

до конца эксперимента доминирует не прямое биовыщелачивание, о чем свидетельствуют значительный прирост биомассы и высокая концентрация Fe³⁺ в растворе (табл. 1). Соотношение долей химического выщелачивания, прямого и непрямого биовыщелачивания в извлечении никеля при плотности пульпы 1:5 (Т:Ж) составляет 1: 1,6: 5.

Таким образом, в плотных пульпах преобладающим является процесс химического выщелачивания с максимумом скорости извлечения никеля в первые 3 суток, а с уменьшением содержания твердого в пульпе растет доля непрямого биовыщелачивания, при котором скорость растворения никеля достигает своего максимума в период с 15-х по 21-е сутки.

Эксперимент при разных температурах показал, что использованная в настоящей работе культура хемолитотрофных микроорга-

низмов характеризуется широким температурным оптимумом: значительный прирост биомассы и высокая железooksисляющая активность наблюдались как при 16, так и при 30 °С (табл. 3). Бактерии сохранялись в пульпе даже при 45 °С, хоть и в гораздо меньшем количестве. Скорость выщелачивания никеля при повышении температуры с 16 до 30 °С увеличивается незначительно. При этом в эксперименте при 16 °С не использовали нагрев пульпы – это температура лабораторного помещения, в котором находились реакторы. Увеличение скорости и, соответственно, степени извлечения никеля с повышением температуры с 30 до 45 °С не связано с биологической активностью бактериальной культуры, а имеет химическую природу (правило Вант-Гоффа).

Из табл. 2 следует, что высокие плотности пульпы (1:3 и 1:2) целесообразно использовать кратковременно в начале процесса выщелачивания (не более первых 3 суток).

Выводы

При варьировании плотности пульпы наблюдается прямая зависимость между извлечением железа и извлечением никеля. При этом она не прослеживается при изменении температуры выщелачивания.

С повышением плотности пульпы растет доля химического выщелачивания, что подтверждается повышением рН вследствие потребления кислоты пульпой.

Используемая в настоящей работе микробная ассоциация проявляет высокую биологическую активность в достаточно широком температурном диапазоне, при этом значительное влияние на нее оказывает плотность пульпы.

Максимальные скорости извлечения никеля в раствор наблюдали в первые 3 суток при плотностях пульпы Т:Ж = 1:3 и 1:2 при 30 °С, а также с 15-х по 21-е сутки при плотности пульпы Т:Ж = 1:5 и температуре 45 °С, т.е. в периоды преобладания химического выщелачивания над биологическим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левенец О.О. Анализ физико-химической модели биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 31 «Камчатка-3». М.: Горная книга, 2016. – № 11. – С. 333–337.

2. Киореску А.В., Мусихин В.О., Хомченкова А.С., Балыков А.А. Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. – № 11. – С. 333–337.

3. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. Камчатская никеленосная провинция // Доклады Академии наук. 2008. – Т. 418. – № 6. – С. 802–805.

4. Левенец О.О., Хайнасова Т.С., Позолотина Л.А. Модифицирование питательных сред для микроорганизмов в целях улучшения физико-химических параметров биовыщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга, 2016. – № 11. – С. 260–271.

5. Рогатых С.В., Докшукина А.А., Хайнасова Т.С., Мурадов С.В., Кофиади И.А. Использование технологии ПЦР в реальном времени для оценки эффективности методов выделения ДНК из культур ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. – Т. 47. – № 2. – С. 226–230.

6. Кузякина Т.И., Хайнасова Т.С., Левенец О.О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Петропавловск-Камчатский, 2008. – № 2. – Вып. 12. – С. 76–86.

7. Хайнасова Т.С., Трухин Ю.П. Прикрепление микроорганизмов в ходе биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 63 «Камчатка-2». – М.: Горная книга, 2015. – № 11. – С. 285–290. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Левенец Ольга Олеговна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, levelga@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 271–277.

O. O. Levenets

FEATURES OF NICKEL EXTRACTION FROM SULFIDE ORES THROUGH BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING AT DIFFERENT PULP DENSITIES AND TEMPERATURES

The results of a study of bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore from the Shanuch ore-deposit are presented in this article. Peculiarities of extraction of nickel into solution depending on the pulp density and temperature have been revealed.

Key words: bioleaching, bacterial-chemical leaching, cobalt-copper-nickel ore, extraction of nickel, pulp density, temperature of leaching.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-271–277

AUTHOR

Levenets O. O., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, leveolga@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Levenets O.O. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3», 2016, No 11, pp. 333–337.
2. Kioresku A.V., Musihin V.O., Homchenkova A.S., Balykov A.A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 63 «Kamchatka-2», 2015, No 11, pp. 333–337.
3. Truhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. *Doklady Akademii nauk*, 2008, T. 418, No 6, pp. 802–805.
4. Levenets O.O., Hajnasova T.S., Pozolotina L.A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3», 2016, No 11, pp. 260–271.
5. Rogatyh S.V., Dokshukina A.A., Hajnasova T.S., Muradov S.V., Kofiadi I.A. *Prikladnaya biohimiya i mikrobiologiya*, 2011, T. 47, No 2, pp. 226–230.
6. Kuzyakina T.I., Hajnasova T.S., Levenets O.O. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 2008, No 2, Vyp. 12, pp. 76–86.
7. Hajnasova T.S., Truhin Yu.P. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 63 «Kamchatka-2», 2015, No 11, pp. 285–290.



ВАЛИДАЦИЯ ПЦР-ТЕСТ-СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННОГО И КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА СООБЩЕСТВ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ (КАМЧАТКА)

Приведены экспериментальные данные, полученные при валидации ПЦР-тест-систем разработанных ранее праймеров, необходимых для качественного и количественного анализа оценки структуры сообществ хемолитотрофных ацидофильных микроорганизмов *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* и *Ferroplasma acidiphillum*, обитающих на сульфидных рудах медно-никелевого месторождения Шануч (полуостров Камчатка). Исследование позволило вывести корреляционный коэффициент $> 0,99$, подтверждающий эффективность разработанных тест-систем.

Ключевые слова: биовыщелачивание, ПЦР в реальном времени, ацидофильные микроорганизмы, автохтонное микробное сообщество, медно-никелевое месторождение.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-278-284

Технология биометаллургии для извлечения металлов из руд в последнее время активно используется и развивается [1; 2]. Исследователи многих стран изучают микробное разнообразие биовыщелачивающих растворов, используя в том числе и современные методы [3; 4]. Однако в большинстве работ по интенсификации процесса биовыщелачивания не определяется структура микробной ассоциации, вносимой в выщелачивающий раствор, в ее качественной и количественной характеристике. В основном используют аборигенную микрофлору, находящуюся в исходной пульпе, подразумевая, что она адаптируется к условиям выщелачивающего раствора [5]. Настоящая статья дополняет и уточняет вопрос количественного мониторинга микробных ассоциаций в ходе процесса биовыщелачивания.

Для выяснения оценки чувствительности разработанной нами ранее количественной методики определения структуры сообществ хемолитотрофных ацидофильных микроорганизмов [6], целевые компоненты (ампликоны, являющиеся специфическими фрагментами

генома микроорганизмов, используемых в исследовании) были клонированы. Клонирование было проведено с использованием вектора pGemTeasy («Promega», USA) на базе ЗАО «Евроген» (Москва).

Для проведения эксперимента использовались чистые линии культур *Acidithiobacillus thiooxidans* (штамм ВКПВ-456), *Acidithiobacillus ferrooxidans* (штамм ВКМВ-460) [7], *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* (штамм № 1269) [8] и *Ferroplasma acidiphilum* (штамм Y-2) [9], предоставленные лабораторией хемолитотрофных микроорганизмов Института микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН. Определение качественного и количественного состава микробных сообществ проводили методом ПЦР с детекцией накопления продуктов реакции. Визуализацию накопления продуктов ПЦР проводили с использованием интеркалирующего красителя SYBR Green I. ПЦР проводили в детектирующем амплификаторе ДТ-96 (ЗАО «НПФ ДНК-Технология», Россия) по следующей программе: 94 °С – 10 с, 64 °С – 20 с, 72 °С – 10 с в течение 40 циклов, с измерением флуоресценции при 64 °С. Использовались разработанные ранее праймеры [6].

Концентрация плазмидной ДНК определялась спектрофотометрически. Специфическими праймерами были амплифицированы серии из десяти повторов предельных разведений. Среднее число – 10 плазмид в реакции – должно быть обнаружено во всех опытах для каждой пары праймеров (10 из 10). Таким образом было выяснено, что реакции при участии среднего числа одной плазмиды были положительными, при том, что условия реакции были оптимизированы до возможного максимума.

Эффективность полимеразной цепной реакции была протестирована с использованием чистых линий культур микроорганизмов. С этой целью стандартные образцы были инокулированы определенными количествами микроорганизмов (2000, 1000, 500, 100, 10 и 1 клеток на мл). Подсчет клеток осуществляли с помощью флуоресцентного сортировщика. Четыре образца каждой концентрации были выделены и амплифицированы в трех повторах (всего 12 реакций). При концентрациях 2000 и 1000 клеток в 1 мл 12 из 12 реакций оказались положительными. Степень обнаружения при 500, 100, 10 и 1 клеток в 1 мл составила 11 из 12, 6 из 12, 1 из 12 и 0 из 12, соответственно.

Далее был проведен тест-эксперимент по исследованию линейности, включающий проверку серии десятикратных разведений всех микроорганизмов. Каждый тест проводился в 4 повторах для образцов с высокой концентрацией анализируемого образца и в 25 повторах для образцов с меньшим содержанием. Тестовая секция включала пять кратных разведений. Эти образцы были обработаны в соот-

ветствии с разработанной методикой, включающей экстракцию и амплификацию. Полученные и ожидаемые значения для каждого образца были представлены в виде графиков зависимости от параметра C_t – значения порогового цикла ПЦР. Наклон и линейность полученной кривой принимали за сравнительное значение.

Десятичные логарифмы относительных значений концентрации были нанесены на график против значений C_t (точка пересечения кривой накопления продукта ПЦР с произвольно установленным пороговым уровнем, превышающим уровень шумов). В данном случае эффективность ПЦР зависит только от угла наклона кривой, поэтому абсолютные значения концентрации ДНК не требуются [10]. На рис. 1 приведен пример расчёта эффективности ПЦР с использованием программного обеспечения ДТ-96 v. 7.3. По оси «у» отложены значения пороговых циклов (C_t), по оси «х» – логарифм относительной концентрации ДНК (копий геномов на реакцию), черные точки – известные десятикратные разведения препаратов ДНК образцов. На рис. 1 видно, что значения десятикратных разведений препаратов ДНК образцов ложатся на стандартную кривую накопления продукта ПЦР.

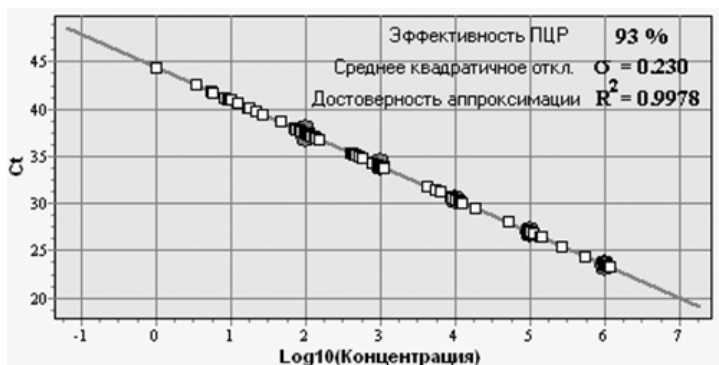


Рис. 1. Стандартная кривая, построенная по результатам ПЦР в реальном времени, одной из серий десятикратных разведений чистых культур

Данные анализировали с помощью многочленного оценочного метода. Для всех анализируемых образцов многочлен второго порядка подходил лучше, чем третьего порядка. Однако квадратичный коэффициент многочлена второго порядка незначительно отличался от нуля, подтверждая линейность. Анализ параметра уклона, заканчивающегося линейной регрессией, позволил вывести корреляционный коэффициент $> 0,99$, подтверждающий эффективность разработанных тест-систем [10].

Воспроизводимость результатов была достигнута повторным проведением экспериментов в нормальных условиях. В экспериментах участвовали образцы с низкой (1000 копий/мл) и высокой (250 000 копий/мл) концентрацией анализируемого образца в 10 и 25 повторях соответственно. Исследование точности определения (повторяемость и воспроизводимость) позволило установить средний процентный коэффициент вариации 1,15–1,93 и 6,14–6,91 соответственно [11]. Суммарная неточность значений для обеих концентраций показала, что применяемый метод имеет меньшую точность при меньшей концентрации аналита.

Для оценки близости ожидаемых значений и значений, полученных в ходе экспериментов, был проведен тест на точность. Процент неточности варьировал в пределах 1,5–7,53 и 3,2–22,3 соответственно.

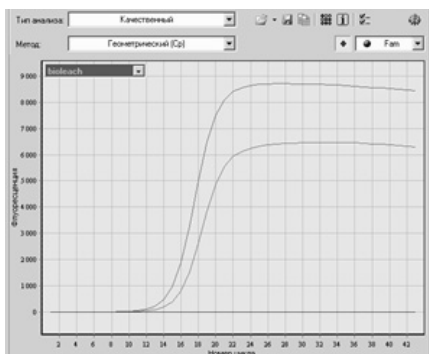
Специфичность разработанной ПЦР-системы заключается в том, что она разработана впервые и включает специально подобранные праймеры, а также условия проведения реакции. Но так как праймеры и пробы были проверены на возможную гомологичность ко всем опубликованным последовательностям при помощи сравнительного анализа нуклеотидных последовательностей, способность обнаружения всех 4 исследованных микроорганизмов, таким образом, была гарантирована.

В ходе исследования разработаны тест-системы для специфической детекции микроорганизмов *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans*, *F. acidiphilum* и относительной количественной оценки числа копий целевых фрагментов гена 16S рНК. Разработанные тест-системы основаны на использовании интеркалирующего красителя Sybr Green I. Важным свойством интеркалирующих красителей является их способность к встраиванию в двуцепочечную молекулу ДНК. Таким образом, флуоресцентный сигнал, получаемый в ходе реакции, является неискаженным отображением динамики накопления продукта реакции, что наилучшим образом подходит для количественного анализа нуклеиновых кислот. Единственным недостатком методов, основанных на использовании интеркалирующих красителей, является возможность регистрации накопления продуктов неспецифической амплификации.

Для определения специфичности все праймеры были протестированы на кросс-реактивность. Для верификации результатов ПЦР в реальном времени нами была проведена оценка возможности кросс-реакции разработанных видоспецифичных олигонуклеотидов. Для этого каждую пару праймеров тестировали на всех имеющихся образцах чистых культур в серии из 4 экспериментов. На образцах

чистых культур *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans* и *F. acidiphilum* протестированы пары праймеров AtF, AtR и AfF, AfR (рис. 2, а) и пары праймеров Fer-d, Fer-r1 и Sulf-d1, Sulf-r (рис. 2, б). Ни в одной из параллельных реакций неспецифическая амплификация не была отмечена.

а



б

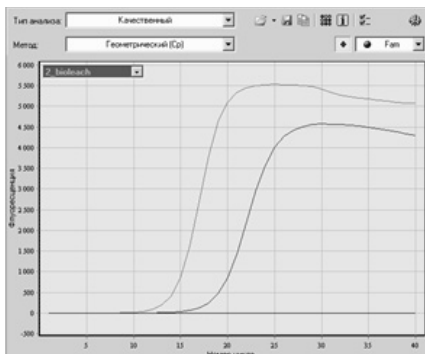


Рис. 2. Результат ПЦР в реальном времени в экспериментах по установлению возможности кросс-реакции разработанных видоспецифичных праймеров. По оси абсцисс – номер цикла, по оси ординат – количество регистраций флуоресценции

По результатам проделанной работы можно предложить следующий вывод: оценка качественной и количественной структуры сообществ, основанная на ПЦР в реальном времени с учетом разработанных ранее праймеров, эффективна при анализе смешанных сообществ микроорганизмов, в том числе биовыщелачивающих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gericke M., Govender Y. Bioleaching strategies for the treatment of nickel-copper sulphide concentrates // Minerals Engineering. 2011. V. 24. P. 1106–1112.
2. Кондратьева Т. Ф., Булаев А. Г., Муравьев М. И. Микроорганизмы в биотехнологиях переработки сульфидных руд. М.: Наука, 2015. – 206 с.
3. Минеев Г. Г. Биометаллургия золота. М.: Metallurgy, 1989. – 160 с.
4. Черняк А. С. Основы биотехнологии металлов. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2002. – 102 с.
5. Левенец О. О. Научно-техническое обоснование способов биовыщелачивания в мезофильных условиях сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка): дис. ... канд. техн. наук: 03.01.06. Петропавловск-Камчатский, 2012. – 138 с.
6. Рогатых С. В., Докшукина А. А., Левенец О. О., Мурадов С. В., Кофиади И. А. Оценка качественного и количественного состава сообществ культивируе-

мых ацидофильных микроорганизмов методами ПЦР-РВ и анализа библиотеки клонов // Микробиология. 2013. Том 82. № 2. С. 212–217.

7. Kelly D. P., Wood A. P. Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov., *Halothiobacillus* gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov. // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2000. V. 50. P. 511–516.

8. Головачева Р. С., Каравайко Г. И. *Sulfobacillus* – новый род термофильных спорообразующих бактерий // Микробиология. 1978. Т. 47. № 5. С. 815–822.

9. Golyshina O. V., Pivovarova T. A., Karavaiko G. I. et al. *Ferroplasma acidiphilum* gen. nov., sp. nov., an acidophilic, autotrophic, ferrous-iron-oxidizing, cell-wall-lacking, mesophilic member of the *Ferroplasmaceae* fam. nov., comprising a distinct lineage of the *Archaea* // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2000. V. 50. P. 997–1006.

10. Ребриков Д. В., Саматов Г. А., Трофимов Д. Ю., Семенов П. А., Савилова А. М., Кофиади И. А., Абрамов Д. Д. ПЦР в реальном времени. М.: Бином, 2009. – 216 с.

11. Sikorsky J. A., Primerano D. A., Fenger T. W., Denvir J. DNA damage reduces Taq DNA polymerase fidelity and PCR amplification efficiency // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2007. V. 355. P. 431–437. [PUBMED](#)

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Рогатых Станислав Валентинович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, rogarykhsv@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 278–284.

S. V. Rogatykh

VALIDATION OF THE PCR-TEST SYSTEMS FOR ESTIMATION OF QUALITATIVE AND QUANTITATIVE COMPOSITION OF COMMUNITIES OF CHEMOLITHOTROPHIC MICROORGANISMS OF FIELD SHANUCH (KAMCHATKA)

Experimental data obtained with the validation of PCR-test systems of primers developed earlier necessary for the qualitative and quantitative analysis of the structure of the communities of the chemolithotrophic acidophilic microorganisms *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* and *Ferroplasma acidiphilum*, which inhabit the sulfide ores of the copper-nickel deposit Shanuch (Kamchatka). The study made it possible to derive a correlation coefficient > 0.99, which confirms the effectiveness of the developed test systems.

Key words: bioleaching, real-time PCR, acidophilus microorganisms autochthonous microbial community, copper-nickel deposit.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-278-284

AUTHOR

Rogatykh S. V., Ph.D, Senior Research, Research Geotechnological center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

2. Kondrat'eva T. F., Bulaev A. G., Murav'ev M. I. *Mikroorganizmy v biogeotekhnologijah pererabotki sulfidnyh rud* (Microorganisms in biogeotechnology processing of sulphide ores). Moscow.: Nauka, 2015. 206 p.
3. Mineev G. G. *Biometallurgija zolota* (Biometallurgy gold). Moscow: Metallurgija, 1989. 160 p.
4. Chernjak A. S. *Osnovy biotekhnologii metallov* (Fundamentals of biotechnology of metals). Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2002. 102 p.
5. Levenec O. O. *Nauchno-tehnicheskoe obosnovanie sposobov biovyshhelachivaniya v mezofil'nyh uslovijah sulfidnoj kobalt-medno-nikelevoj rudy mestorozhdenija Shanuch (Kamchatka)* (Scientific-technical justification of the methods of bioleaching under mesophilic conditions of sulphide cobalt-copper-Nickel ore deposits chanoch (Kamchatka)): dis. ... kand. tehn. nauk: 03.01.06. Petropavlovsk-Kamchatskij, 2012. 138 p.
6. Rogatyh S. V., Dokshukina A. A., Levenec O. O., Muradov S. V., Kofiadi I. A. *Mikrobiologija*. 2013. Tom 82. no 2. Pp. 212–217.
8. Golovacheva R. S., Karavajko G. I. *Mikrobiologija*. 1978. T. 47. no 5. Pp. 815–822.
10. Rebrikov D. V., Samatov G. A., Trofimov D. Ju., Semenov P. A., Savilova A. M., Kofiadi I. A., Abramov D. D. *PCR v real'nom vremeni* (Real-time PCR). Moscow: Binom, 2009. 216 p.



РАЗРАБОТКА ВИДОСПЕЦИФИЧНЫХ ПРАЙМЕРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВА ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ АЦИДОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ (КАМЧАТКА)

Показан ход исследования разработки тест-систем для специфической детекции микроорганизмов *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans*, *F. Acidiphilum* и относительной количественной оценки числа копий целевых фрагментов гена 16S рРНК. Разработанные тест-системы были апробированы для накопительных культур, выделенных из сульфидной руды месторождения и для реакторных пробах выщелачивающих растворов.

Ключевые слова: биовыщелачивание, видоспецифичность, ацидофильные микроорганизмы, автохтонное микробное сообщество, медно-никелевое месторождение.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-285-294

Современное внедрение технологии биовыщелачивания невозможно без четких данных о структуре микробных сообществ или ассоциаций, вносимых в нарабатываемую культуру выщелачивающего раствора. Причем данные о качественном (видовом) составе микробной культуры и количественном соотношении микроорганизмов в ней необходимо узнавать перед внесением ее в выщелачивающий раствор [1; 2].

До недавнего времени видовой анализ микроорганизмов в процессе выщелачивания проводили с помощью культуральных, микроскопических, биохимических методов. В настоящее время определение видового состава сообществ ведется, как правило, с использованием молекулярно-биологических методов, основанных на полиморфизме длин рестрикционных фрагментов ДНК или гибридизационного ДНК-анализа *in situ*. Однако эти методы не позволяют проводить количественную оценку состава сообществ, время пробоподготовки занимает большое количество времени, они сложны и ресурсоемки.

Одним из наиболее перспективных подходов к изучению видового разнообразия микроорганизмов является анализ последова-

тельностью их ДНК [3]. В настоящей статье предложена реализация метода полимеразной цепной реакции (основы большинства методов генодиагностики микроорганизмов), основанная на использовании флуоресцентной детекции продуктов реакции – ПЦР в реальном времени.

Основными аборигенными для месторождения Шануч микроорганизмами являются бактерии *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans* и *F. acidiphilum* [4; 5]. Однако эти данные не дают представления о количественном составе сообществ, а также не позволяют дифференцировать близкородственные и не различающиеся морфологически виды. Для решения задачи качественного и количественного анализа сообществ нами был разработан комплекс видоспецифичных ПЦР-тест-систем с возможностью детекции результатов реакции в режиме реального времени [6].

Использованную в работе модификацию метода нельзя назвать истинно количественной. Она не позволяет установить абсолютное число копий целевого фрагмента. Для этого необходимо вводить в эксперимент стандартные образцы с заведомо известной концентрацией нуклеиновых кислот. Однако, зная эффективность полимеразной цепной реакции для каждой пары праймеров в эксперименте, а также показатель общей бактериальной массы (ОБМ) в анализируемой пробе, можно провести достаточно точную оценку количества специфических фрагментов относительно показателя ОБМ. Этот подход хорошо зарекомендовал себя при оценке относительного количества микроорганизмов в составе комплексных сообществ бактериальных биоценозов урогенитального тракта человека, что позволило адаптировать этот подход к поставленной нами задаче [7].

Видоспецифичные праймеры были подобраны таким образом, чтобы достоверно выявлять основные четыре вида бактерий, принимающих участие в процессе биовыщелачивания – *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans* и *F. acidiphilum*. Последовательности 16S рРНК были получены из открытых баз данных последовательностей ДНК и экспериментально. Были синтезированы два универсальных праймера, располагающиеся в консервативных участках последовательностей [6]. Участки, амплифицируемые с помощью этих праймеров, составляли 420 п.н. в длину и содержали несколько высоко варибельных доменов. Эти варибельные домены (рис. 1, отмечены стрелкой) были впоследствии использованы для подбора мест отжига видоспецифичных праймеров (табл. 1).

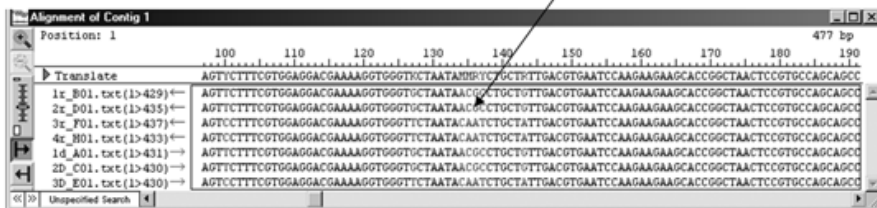


Рис. 1. Нуклеотидная последовательность ПЦР-продуктов, полученных с помощью универсальных праймеров

Таблица 1
Последовательности видоспецифичных праймеров, использованных в работе

Название	Последовательность 5'-3'	Специфичность	Номер доступности последовательности гена 16S рРНК в GenBank
AtF	TCTTCGGACCTCGCGCTGG	A. thiooxidans	AY552086
AtR	GTCAACAGCAGGCGATATTAGCAC		
AfF	AATCTGCTATTGACGTGAATCC	A. ferrooxidans	AF465604
AfR	CATGAACCATAACCGTGGTAAC		
Fer-d	CCTGAAGCTTAACTCCAGAAAGT	F. acidiphilum	AJ224936
Fer-r1	TCTTTGTAATGCGCGTGTAGC		
Sulf-d1	ACCTTCGGGTCCAGCTGCGG	S. thermo-sulfidooxidans	X91080
Sulf-r	GCCGGTCTTCGTCCCAGACA		

С помощью интернет-баз данных, содержащих известные последовательности ДНК, было выявлено, что вышеуказанные праймеры обладают высокой специфичностью на видовом уровне. Система для амплификации состоит из трех олигонуклеотидов, каждый из которых имеет в своём составе специфичный для данного вида участок. Два из них необходимы для амплификации и один – гибридационный – несёт метку и предназначен для визуализации процесса накопления специфического продукта. Системы праймеров в эксперименте показали высокую специфичность и точность (пример указан на рис. 2). Как видно на рис. 2, сигнал присутствует только в пробирках с образцами культур *A. thiooxidans* и *A. ferrooxidans*, соответственно. Результаты воспроизводимы на культурах бактерий.

Разработанные тест-системы были апробированы для накопительных культур и реакторных пробах, предоставленных сотрудниками НИГЦ ДВО РАН Т. С. Хайнасовой, О. О. Левенец, А. А. Балыковым.

Была поставлена ПЦР в реальном времени для 40 проб, отобранных из реакторных установок (табл. 2), и качественная ПЦР с электрофоретической детекцией для 16 проб из выделяемых из руды культур (рис. 3) по приведенной выше методике. Результаты отражены в табл. 2 и на рис. 3. Тест-системы применяются в настоящее время в экспериментальных работах сотрудниками научно-исследовательского отдела НИГТЦ ДВО РАН по выявлению наиболее эффективных в выщелачивании сообществ хемолитотрофных микроорганизмов.

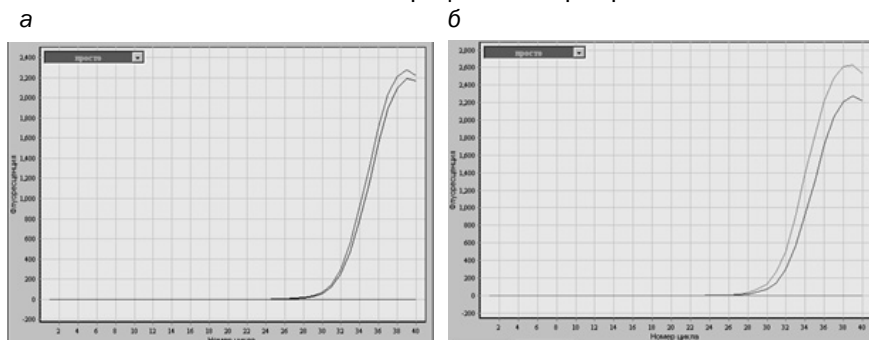


Рис. 2. Результаты определения видоспецифичности разработанных праймеров с помощью проведенной ПЦР в реальном времени: а – ПЦР с праймерами, специфичными для вида *A. thiooxidans*; б – ПЦР с праймерами, специфичными для вида *A. ferrooxidans*. По оси абсцисс – номер цикла, по оси ординат – количество регистраций флуоресценции

Таблица 2

Результаты проведенной ПЦР в реальном времени

№ пробы	Характеристика выделенной культуры микроорганизмов	t, °C	Микроорганизм			
			<i>A. thiooxidans</i>	<i>A. ferrooxidans</i>	<i>S. thermo-sulfidoxidans</i>	<i>F. acidiphilum</i>
1.	из окисленной руды № 1	28–30	-	+много	-	-
2.	из сильно окисленной руды	28–30	-	-	-	-
3.	из средне окисленной руды	28–30	-	-	+	-
4.	из слабо окисленной руды	28–30	-	+мало	-	+мало
5.	из окисленной руды № 2	28–30	-	+	-	-
6.	из окисленной руды № 3	28–30	-	+много	?	-
7.	из прожилко-вкрапленной руды	28–30	-	+много	-	-
8.	из образца из хвостохранилища	28–30	-	+много	-	+мало
9.	сульфидокисляющих	28–30	-	+	+	-
10.	железоокисляющих	28–30	-	+	?	+

№ пробы	Характеристика выделенной культуры микроорганизмов	t, °C	Микроорганизм			
			<i>A. thiooxidans</i>	<i>A. ferrooxidans</i>	<i>S. thermo-sulfidooxidans</i>	<i>F. acidiphilum</i>
11.	из окисленной руды	28	-	+	-	?
12.	из измельченной руды	28	-	+мало	-	-
13.	из измельченной руды № 1	60	-	+	-	-
14.	из измельченной руды № 2	60	-	+	-	-
15.	из окисленной руды № 1	60	-	+	-	-
16.	из окисленной руды № 2	60	-	+	-	-
17.	из измельченной руды № 3	60	-	+	-	-
18.	из измельченной руды № 4	60	-	+мало	-	-
19.	из окисленной руды № 3	60	-	+	-	+
20.	из окисленной руды, 10-кратные разведения	60	-	+	-	-
21.	из окисленной руды № 4	60	-	-	-	+мало
22.	из измельченной руды, 10-кратные разведения	60	-	-	-	-
23.	выделенная (№ 1) из реактора	28-30	+мало	+	-	-
24.	сероокисляющих № 1, выделенная из реактора	28	-	+	-	-
25.	сероокисляющих № 2, выделенная из реактора	28	-	+	-	-
26.	железоокисляющих, выделенная из реактора	28	-	+	-	-
27.	выделенная на железе и сере	28-30	-	+	-	+
28.	сероокисляющих № 3, выделенная из реактора	28	-	+	-	?
29.	железоокисляющих	42	-	+мало	-	?
30.	сероокисляющих, из окисленной руды № 1	42	-	-	-	-
31.	железоокисляющих, из окисленной руды № 1	42	-	+	-	-
32.	сероокисляющих, из измельченной руды № 1	42	-	-	-	-
33.	железоокисляющих, из окисленной руды № 2	42	-	?	-	-
34.	сероокисляющих, из измельченной руды № 2	42	-	-	-	-
35.	железоокисляющих, из измельченной руды	42	-	-	-	-
36.	из окисленной руды, 10-кратные разведения	42	-	-	-	-

№ пробы	Характеристика выделенной культуры микроорганизмов	t, °C	Микроорганизм			
			<i>A. thiooxidans</i>	<i>A. ferrooxidans</i>	<i>S. thermosulfidooxidans</i>	<i>F. acidiphilum</i>
37.	из измельченной руды, 10-кратные разведения	42	-	-	-	+мало
38.	из окисленной руды № 2	42	-	-	-	-
39.	бактериально-химического выщелачивания, выделенная из установки	28–30	-	+мало	-	-
40.	выделенная (№ 2) из реактора	28–30	-	-	-	-
Примечания: «+» – присутствие ДНК обозначенных микроорганизмов, «-» – нет ДНК обозначенных микроорганизмов, «?» – сомнительно.						

Кроме того, нами была определена нуклеотидная последовательность продуктов ПЦР из 5 реакций для каждого эксперимента. Во всех случаях полученная последовательность совпадала с последовательностями целевых фрагментов гена 16S рРНК. Таким образом, разработанные тест-системы могут быть использованы при оценке состава смешанных сообществ биовыщелачивающих микроорганизмов, а также для качественной и количественной диагностики микроорганизмов *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans* и *F. acidiphilum*.

В большинстве последних отечественных работ по интенсификации процесса биовыщелачивания не определяется качественный и количественный состав микробной ассоциации, вносимой в выщелачивающих раствор. В основном используют аборигенную микрофлору, находящуюся в исходной пульпе, подразумевая, что аборигенная микрофлора адаптируется к условиям, происходящих в выщелачивающем растворе. В течение длительного времени считалось, что выщелачивание сульфидов протекает благодаря только тионовым бактериям *A. ferrooxidans*. Использование в качестве источников энергии широкого круга окисляющих субстратов (сульфидов, элементарной серы и др.) устойчивость бактерий к ионам тяжелых металлов и низким значениям pH, а также широкий уровень изменчивости в экстремальных условиях среды обусловили ведущую роль *A. ferrooxidans* в бактериально-химических условиях вскрытия золота или выщелачивания цветных металлов [8; 9]. При этом методы интенсификации

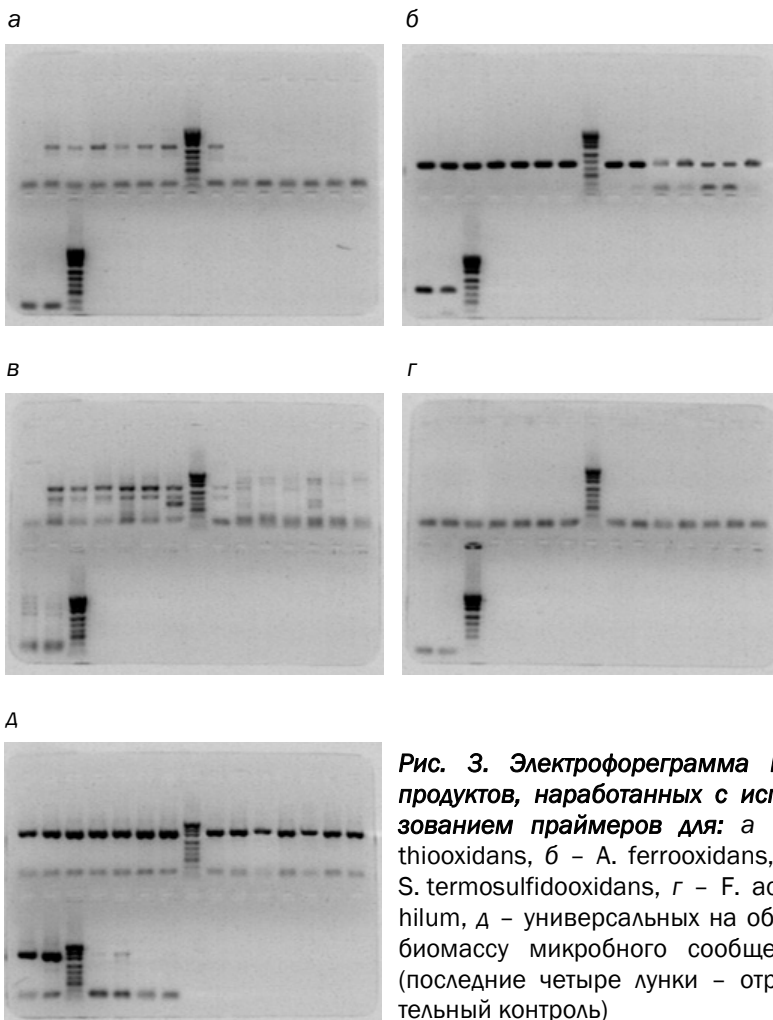


Рис. 3. Электрофореграмма ПЦР-продуктов, наработанных с использованием праймеров для: а – *A. thiooxidans*, б – *A. ferrooxidans*, в – *S. termosulfidooxidans*, г – *F. acidiphilum*, д – универсальных на общую биомассу микробного сообщества (последние четыре лунки – отрицательный контроль)

были направлены на получение активных штаммов *A. ferrooxidans* и оптимизации среды их жизнедеятельности. Однако в работе П. А. Залочного [10] сделан вывод о том, что ресурсы по интенсификации процесса бактериального окисления концентратов с использованием монокультуры *A. ferrooxidans* исчерпаны. В то же время за рубежом и даже в России уже используются патентованные технологии использования смешанных микробных культур – технология BIOX™ на руднике Фэйрвью (Fairview, Южная Африка) использует смешанную микробную ассоциацию в составе *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* [11]; технология VacTech на заводе Bea-

consfield (Австралия) – микробную ассоциацию из *A. caldus* и *L. ferrooxidans*; технология BIONORD® на Олимпиадинском месторождении в России – ассоциацию из *Sulfobacillus olimpiadicus*, *F. acidiphillum* и *L. ferrooxidans* [12]; на руднике Килембе (Kilembe, Уганда) – ассоциацию из *L. ferrooxidans*, *A. ferrooxidans*, *A. caldus*, *S. thermosulfidooxidans* [13]; технология GeoLeach™ на руднике Агнес (Agnes, Южная Африка) использует *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *L. ferrooxidans*, археи родов *Sulfolobus* и *Acidianus* [14]; на руднике Соткамо (Sotkamo, Финляндия) – ассоциацию из *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans* или *A. albertensis*, *A. caldus* и *L. ferrooxidans* [15].

Как видно, перечень используемых микроорганизмов довольно узок и специфичен для определенной территории использования. Анализ практики применения микроорганизмов в технологиях переработки минерального сырья показал, что использование ассоциации микроорганизмов, состоящих из высокоактивных штаммов (умеренно-термофильных в сочетании с мезофильными бактериями) является перспективным направлением интенсификации процесса выщелачивания. В настоящей статье показано что основным представителем микроорганизмов медно-никелевого месторождения Шануч на Камчатке является *A. ferrooxidans*, а также различные его штаммы, в отличие например от представителей *Leptospirillum* sp. и *Sulfobacillus* sp., широко применяемых в биовыщелачивании на других месторождениях.

Однако возможно включение в скрининг биовыщелачивающих сообществ месторождения Шануч других бактерий, принимающих участие в выщелачивании и ранее обнаруженных на месторождении – *A. caldus*, *A. ferrivorans*, *L. ferrooxidans*, *L. thermoferrooxidans*, *L. ferriphillum*, *Alicyclobacillus disulfidooxidans*, *S. acidophilus*, *F. Cupricumulans* [5]. Возможно, пересмотр состава микробной ассоциации впоследствии будет иметь значение для получения другой ассоциации, обладающей более лучшей окисляющей способностью, чем сейчас.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rawlings D. E. Characteristics and adaptability of iron- and sulfuroxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates // Microbial cell factories. 2005. V. 4. N. 13. P. 1–15.
2. Кондратьева Т. Ф., Булаев А. Г., Муравьев М. И. Микроорганизмы в биотехнологиях переработки сульфидных руд. М.: Наука, 2015. – 206 с.
3. Bovei C., Xingyu L., Wenyan L., Jiankang W. Application of clone library analysis and real-time PCR for comparison of microbial communities in a low-grade copper sulfide ore bioheap leachate // J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 2009. V. 36. P. 1409–1416.

4. Каравайко Г. И., Росси Дж., Агате А., Грудев С., Авакян З. А. Биоготехнология металлов: практическое руководство. М.: ЦМП ГКНТ, 1989. – 375 с.
5. Кузякина Т. И., Хайнасова Т. С., Левенец О. О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Т. 12. № 2. С. 76–86.
6. Рогатых С. В., Докшукина А. А., Левенец О. О., Мурадов С. В., Кофиади И. А. Оценка качественного и количественного состава сообществ культивируемых ацидофильных микроорганизмов методами ПЦР-РВ и анализа библиотеки клонов // Микробиология. 2013. Том 82. № 2. С. 212–217.
7. Липова Е. В. Болдырева М. Н., Трофимов Д. Ю. и др. Урогенитальные инфекции, обусловленные условно-патогенной биотой у женщин репродуктивного возраста: учебное пособие. М., 2009. – 46 с.
8. Агеева С. Н., Кондратьева Т. Ф., Каравайко Г. И. Плазмидные профили штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans*, адаптированных к разным субстратам окисления // Микробиология. 2003. Т. 72. № 5. С. 651–657.
9. Каравайко Г. И. Микроорганизмы рудных месторождений, их физиология и использование в гидрометаллургии: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.00.07. М., 1973. – 51 с.
10. Заулочный П. А. Интенсификация технологии бактериального выщелачивания упорных золотосульфидных концентратов с использованием ассоциации микроорганизмов, включая умеренно-термофильные бактерии: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13. М., 2011. – 168 с.
11. Aswegen P. C. van, Niekerk J. van, Olivier W. The BIOX™ process for the treatment of refractory gold concentrate // In: Biomining. Ed. by D. E. Rawlings and D. Barrie Johnson. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – P. 1–35.
12. Совмен В. К., Гуськов В. Н., Белый А. В. Переработка золотоносных руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего Севера. Новосибирск: Наука, 2007. – 144 с.
13. Foucher S., Battaglia-Brunet F., d'Hugues P., Clarens M., Godon J. J., Morin D. Evolution of the bacterial population during the batch bioleaching of a cobaltiferous pyrite in a suspended-solids bubble column and comparison with a mechanically agitated reactor // Hydrometallurgy. 2003. N. 71. P. 5–12.
14. Harvey T. J., Bath M. The GeoBiotics GEOCOAT® Technology – progress and challenges // In: Biomining. Ed. By D. E. Rawlings and D. Barrie Johnson. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – P. 97–112.
15. Puhakka J. A., Kaksonen A. H., Riekkola-Vanhanen M. Heap Leaching of Black Schist // In: Biomining. Ed. By D. E. Rawlings and D. Barrie Johnson. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – P. 139–152. **ИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Рогатых Станислав Валентинович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, rogaykhsv@yandex.ru,
Мурадов Сергей Васильевич – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,
 Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

S. V. Rogatykh, S. V. Muradov

**DEVELOPMENT OF VIDOSPECIFIC PRIMERS
IN THE EVALUATION OF THE STRUCTURE OF THE COMMUNITY
OF THE CHEMOLITHOTROPHIC ACYDOPHILE MICROORGANISMS
OF THE SHANUCH DEPOSIT (KAMCHATKA)**

The article shows the progress of the development of test systems for the specific detection of microorganisms *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans*, *F. acidiphilum* and the relative quantitative evaluation of the number of copies of the desired fragments of the 16S rRNA gene. The developed test systems were tested for accumulation cultures isolated from the sulfide ore of the deposit and for reactor tests of leaching solutions.

Key words: bioleaching, species-specificity, acidophilus microorganisms autochthonous microbial community, copper-nickel deposit.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-285-294

AUTHORS

Rogatykh S. V., Ph.D, Senior Research

Muradov S. V., Ph.D., Associate Professor, Leading Researcher,

Research Geotechnological center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

2. Kondrat'eva T. F., Bulaev A. G., Murav'ev M. I. *Mikroorganizmy v biogeotekhnologijah pererabotki sulfidnyh rud* (Microorganisms in biogeotechnology processing of sulphide ores). Moscow: Nauka, 2015. 206 p.

4. Karavajko G. I., Rossi Dzh., Agate A., Grudev S., Avakjan Z. A. *Biogeotekhnologija metallov: prakticheskoe rukovodstvo* (Biogeotechnology metals: a practical guide). Moscow: CMP GKNT, 1989. 375 p.

5. Kuzjakina T. I., Hajnasova T. S., Levenec O. O. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2008. T. 12. no 2. Pp. 76–86.

6. Rogatykh S. V., Dokshukina A. A., Levenec O. O., Muradov S. V., Kofiadi I. A. *Mikrobiologija*. 2013. Tom 82. no 2. Pp. 212–217.

7. Lipova E. V. Boldyreva M. N., Trofimov D. Ju. i dr. *Urogenital'nye infekcii, obuslovlennye uslovno-patogennoj biotoj u zhenshin reproduktivnogo vozrasta* (Urogenital infections caused by opportunistic biota in women of reproductive age): uchebnoe posobie. Moscow, 2009. 46 p.

8. Ageeva S. N., Kondrat'eva T. F., Karavajko G. I. *Mikrobiologija*. 2003. T. 72. no 5. Pp. 651–657.

9. Karavajko G. I. *Mikroorganizmy rudnyh mestorozhdenij, ih fiziologija i ispol'zovanie v gidrometallurgii* (The ore deposits of microorganisms, their physiology, and the use in hydrometallurgy): avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk: 03.00.07. Moscow, 1973. 51 p.

10. Zaulochnyj P. A. *Intensifikacija tehnologii bakterial'nogo vyshhelachivaniya upornyh zolotosulfidnyh koncentratov s ispol'zovaniem asociacii mikroorganizmov, vkljuchaja umerenno-termofil'nye bakterii* (Intensification technology of bacterial leaching of persistent gold-sulfide concentrates with the use of the Association of microorganisms, including moderately thermophilic bacteria): dis. ... kand. tehn. nauk: 25.00.13. Moscow, 2011. 168 p.

12. Sovmen V. K., Gus'kov V. N., Belyj A. V. *Pererabotka zolotonosnyh rud s primeneniem bakterial'nogo okislenija v uslovijah Krajnego Severa* (Processing of gold-bearing ores with the use of bacterial oxidation in the far North). Novosibirsk: Nauka, 2007. 144 p.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕСТ-СИСТЕМА, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО-БИОЛОГИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Показан ход исследования разработки универсальной тест-системы, которая позволит амплифицировать фрагмент генома всех бактерий и архей, входящих в состав микробного сообщества. Из восьми пар семи праймеров была отобрана одна пара, которая была апробирована для чистых линий культур микроорганизмов *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans* и *F. acidiphilum*, составляющих большинство из микробного сообщества сульфидной руды месторождения Шануч (Камчатка), и показала свою состоятельность.

Ключевые слова: биовыщелачивание, олигонуклеотиды, ацидофильные микроорганизмы, микробное сообщество, медно-никелевое месторождение, праймер.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-295-302

Камчатское медно-никелевое месторождение Шануч по степени устойчивости и характеру изменений главных рудообразующих минералов в условиях зоны окисления относится к группе сульфидных месторождений, руды которых наиболее подвержены процессам растворения и выноса полезных компонентов [1]. Кроме неорганических процессов миграции элементов, их концентрации и рассеяния, важное значение в формировании зоны окисления сульфидной кобальт-медно-никелевой руды имеют биогеохимические процессы. Из руд месторождения Шануч выделены и исследованы бактерии родов *Acidithiobacillus* и *Sulfobacillus*, которые активно участвуют в процессах бактериально-химического окисления этих руд [2].

Микробное выщелачивание сульфидных руд и концентратов давно было признано привлекательной альтернативой традиционным физическим и химическим методам извлечения металлов из руд благодаря сокращению потребления энергии и транспортных затрат и менее пагубному воздействию на окружающую среду [3]. Видовой состав микробных ассоциаций определяет окисляющую продуктивность выщелачивания [2]. Основная доля работ по технологии биовыщелачивания направлена на исследование окисления отдельных минералов

чистыми культурами микроорганизмов [4]. Сульфидная руда Шанучского рудника однако состоит из многих минералов, основной компонент ее – пирротин [4; 5]. В этих же работах указано, что микробные ассоциации гораздо эффективней, чем монокультуры, в технологиях выщелачивания, а использование культуры хемолитотрофных микроорганизмов, выделенной из других месторождений, совместно с аборигенными, не имеет практического смысла, так как в процессе выщелачивания аборигенные культуры подавляют рост привнесённых. Видовое разнообразие и количественное соотношение видов ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, принимающих участие в биовыщелачивании сульфидных руд Камчатки, является одной из нерешённых задач, препятствующих развитию горнодобывающей отрасли.

Для определения качественного и количественного состава сообществ биовыщелачивающих ацидофильных микроорганизмов необходимо провести их генетический скрининг в культуральной среде, то есть провести оценку структуры сообществ в её качественной и количественной характеристике.

Нам представляется, что в первую очередь качественная структура культуры определяется простым вопросом: «если ли в исследуемой пробе какие-либо микроорганизмы?». Для ответа на этот вопрос необходимо разработать универсальную тест-систему, позволяющую амплифицировать фрагмент генома всех бактерий и архей, входящих в состав микробного сообщества.

В мире в настоящее время в основном используют универсальные праймеры, описанные в литературе: для представителей домена *Bacteria* 8-27f и 519r, 1492r [6], для архей – A109f и A104r [7], соответствующие позициям 8–27, 536-519, 1510-1492, 109-125 и 1058-1042 гена 16S рПНК *E. coli* соответственно; систему праймеров 27F и 1492R для амплификации генов 16S рПНК эубактерий [8]. Также используют собственноручно разработанные системы праймеров, например, систему универсальных праймеров F1 и R6 для амплификации фрагментов гена *nifH* [9]; или слегка их модифицируют [10]. Для биовыщелачивающих микроорганизмов (*A. ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans*) используют универсальные праймеры, описанные в литературе – 341f и 1100r, соответствующие позициям 341–357 и 1100–1114 гена рПНК *E. coli* соответственно [11; 12]; или 530F и 1490R [13]. Liu с соавторами [14] также сами разработали систему универсальных праймеров NR-F2 и NR-R2 на биовыщелачивающие эубактерии и археи *L. ferrooxidans*, *A. caldus*, *S. acidophilus*, *S. thermosulfidooxidans*, *Sulfolobus* sp. Эти авторы использовали для создания видоспецифичных праймеров переменные участки универсальных праймеров.

В виду того, что по литературным данным, камчатские бактериальные ассоциации содержат другой видовой и родовой состав, логичней было создание собственной универсальной ПЦР-тест-системы, позволяющей с равной эффективностью амплифицировать ДНК всех микроорганизмов, находящихся в пробе. Работа над созданием универсальных праймеров начинается с выбора гена, отвечающего двум основным требованиям: с одной стороны этот ген должен иметь в своем составе консервативные фрагменты, встречающиеся у подавляющего большинства известных зубактерий и архей, а с другой стороны, эти консервативные фрагменты должны фланкировать переменный участок, который в последствии позволит определить микроорганизмы, входящие в состав пробы, до вида. Для этих целей лучше всего подходит последовательность гена 16S рРНК. Последовательность этого гена определена для подавляющего большинства известных микроорганизмов и доступна в открытых базах данных (например, *nucleotide database* с сервера *National Center for Biotechnology Information*). Из-за дороговизны определения полногеномной последовательности, а также из-за универсальности (этот ген встречается у всех зубактерий и архей) ген 16S рРНК стал распространенным инструментом молекулярной систематики и повсеместно используется при проведении филогенетических исследований. Ген содержит несколько переменных областей позволяющих проводить сравнительный анализ последовательностей на различных таксономических уровнях. В то же время последовательность гена в целом достаточно консервативна, что делает возможным создание универсальных праймеров, одинаково эффективно амплифицирующих переменные фрагменты ДНК разных микроорганизмов.

Следующим этапом в создании универсальных праймеров является выравнивание максимально возможного числа известных последовательностей гена 16S рРНК разных микроорганизмов. Выравнивание геномных последовательностей означает сравнение последовательностей друг с другом, поиск переменных участков, уникальных для конкретных микроорганизмов, и консервативных фрагментов с минимальным числом мутаций. Для создания подобных выравниваний можно пользоваться различным коммерчески доступным программным обеспечением (например, *Generunner*, *Seqman*), либо программным обеспечением, доступным он-лайн (например, *Blast* с сервера *National Center for Biotechnology Information*). Данный этап работы заканчивается выбором гиперпеременного участка гена 16S рРНК, фланкированного с обеих сторон консервативными последовательностями, подходящими для того, чтобы расположить на них универсальные праймеры.

На следующем этапе работы на основании выбранного участка гена 16S рРНК с помощью специального программного обеспечения *Oligo 6.0* подбирается последовательность олигонуклеотидов, используемых для проведения ПЦР-реакции. Правила создания универсальных праймеров не отличаются от общих правил создания любых других праймеров для ПЦР. Возможные мутации в последовательности гена 16S рРНК не должны затрагивать выбранный для праймеров участок гена, так как замены в геномной последовательности могут негативно сказаться на работе праймеров. Длина праймеров должна находиться в пределах 18–25 нуклеотидов. При конструировании праймеров нежелательно использовать последовательности, которые могут формировать вторичные структуры в виде «шпилек» или дуплексов. Следует избегать комплементарных последовательностей как в структуре праймера, так и у пары праймеров. Также нежелательно присутствие трех или более С или G нуклеотидных оснований на 3'-конце праймера. Рекомендуется использовать праймеры с близкой температурой отжига.

При поиске локусов, подходящих для разработки универсальных праймеров, нами использовались общедоступные интернет-базы данных последовательностей – *GenBank* и алгоритм *Blast* сервера NCBI. После разработки праймеров (указаны в таблице), была проверена их универсальность более чем на 5000 последовательностях бактерий и архей. На основании анализа было отобрано несколько участков, обладающих высокой степенью сходства. В случае с единичными вырожденными нуклеотидами использовали эквимоллярную смесь праймеров полностью комплементарных каждому из вариантов последовательности. Ни один из праймеров не содержал более одного вырожденного нуклеотида. Расхождения в 1 нуклеотид были компенсированы при синтезе праймеров путем добавления эквимоллярной смеси варьирующих нуклеотидов на этапе встраивания нуклеотида в соответствующей позиции.

Таблица

Последовательности универсальных праймеров, использованных в сравнительном исследовании

№ п/п	Название	Последовательность 5'-3'
1.	upr1-d	GTGCCAGCHGCCGCGGTAA
2.	upr2-d	TGCATGGCYGTCGTCACTCGT
3.	upr2-r	ACGAGCTGACGACRGCATGCA
4.	upr3-r	TGACGGGCGGTGTGTRCAAGG
5.	upr4-r	TGGTTTGACGSGCGGTGTGT
6.	bac2-d	ATTAGATACCCBGGTAGTCC
7.	1427-r	TACCTTGTTACGACTTMACCC

В дальнейшем сравнении принимали участие пары праймеров в восьми различных комбинациях. На рис. 1 приведена электрофореграмма ПЦР продуктов, полученных с помощью разработанных универсальных праймеров. В качестве анализируемых образцов использовали ДНК, выделенную из реакторных проб, затем оценивали наличие продуктов неспецифической амплификации и димеров праймеров. Предпочтение отдавали праймерам, позволяющим получить более короткие продукты амплификации. Наилучший результат был получен для пары праймеров *upr2-d/upr3-r*.

Для проверки этого результата была проведена ПЦР в реальном времени с амплификацией ДНК, выделенных из чистых культур *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans* и *F. acidiphilum*, с использованием универсальных праймеров *upr2-d*, *upr3-r*. Результаты показали, что приблизительно одинаковое значение ΔCt (15–17) для всех чистых культур (при равном количестве стартовой ДНК) свидетельствует о том, что выбранные нами универсальные праймеры обеспечивают сходную эффективность амплификации фрагмента гена 16S рРНК всех основных предполагаемых представителей хемолитотрофных сообществ месторождения Шануч.

Для визуализации накопления продукта ПЦР использован неспецифический интеркалирующий краситель SYBR Green I. Чтобы исключить возможность накопления и регистрации неспецифического продукта реакции, нами проводился анализ длины продуктов амплификации. На рис. 2 приведены результаты гель-электрофореза ПЦР-продуктов, полученных при ам-

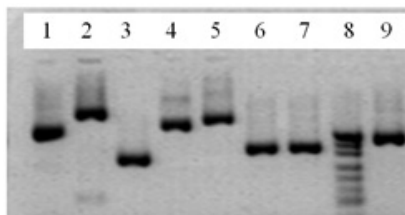


Рис. 1. Электрофореграмма ПЦР-продуктов, полученных при амплификации фрагмента гена 16S рРНК с использованием попарных комбинаций разработанных праймеров: 1 – *upr1-d + upr2-r* (562 п.н.), 2 – *upr1-d + upr3-r* (898 п.н.), 3 – *bac2-d + upr2-r* (293 п.н.), 4 – *bac2-d + upr4-r* (630 п.н.), 5 – *bac2-d + 1427-r* (724 п.н.), 6 – *upr2-d + upr3-r* (358 п.н.), 7 – *upr2-d + upr4-r* (363 п.н.), 9 – *upr2-d + 1427-r* (457 п.н.), 8 – маркер

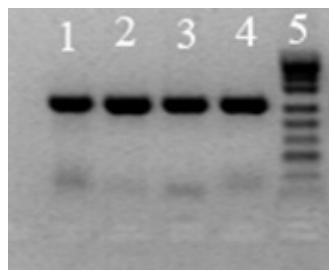


Рис. 2. Электрофореграмма ПЦР-продуктов, полученных при амплификации ДНК, выделенной из четырех чистых культур: дорожки 1–4 – чистые культуры бактерий *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans* и *F. acidiphilum* соответственно, 5 – маркер

плификации ДНК, выделенной из чистых культур, с использованием универсальных праймеров *upr2-d*, *upr3-r*.

Таким образом, результаты данной работы показали универсальность разработанной тест-системы, необходимой для мониторинга микробных сообществ в выщелачивающих культурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Алискеров А. А. Структурно-текстурные и минералогические особенности зоны окисления рудного тела № 1 месторождения Шануч (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S31. С. 56-71.

2. Хайнасова Т. С., Кунгурова В. Е. Позолотила Л. А., Балыков А. А., Левенец О. О. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч различными культурами аборигенных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S63. С. 297-304.

3. Кузякина Т. И., Хайнасова Т. С., Левенец О. О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Т. 12. № 2. С. 76-86.

4. Левенец О. О. Научно-техническое обоснование способов биовыщелачивания в мезофильных условиях сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка): дис. ... канд. техн. наук: 03.01.06. Петропавловск-Камчатский, 2012. – 138 с.

5. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 75-81.

6. Weisburg W., Barns S. M., Pelletier D. A., Lane D. J. 16S Ribosomal DNA amplification for phylogenetic study // J. Bacteriol. 1991. V. 173. P. 697-703.

7. Калюжный С. В., Шестакова Н. М., Турова Т. П., Полтараус А. Б., Гладченко М. А., Трухина А. И., Назина Т. Н. Филогенетический анализ микробного сообщества, осуществляющего анаэробное окисление аммонийного азота // Микробиология. 2010. Т. 79. № 2. С. 260-269.

8. Герасимчук А. Л., Шаталов А. А., Новиков А. Д., Буторова О. П., Пименов Н. В., Леин А. Ю., Яненко А. С., Карначук О. В. Поиск сульфатредуцирующих бактерий в пробах мата из гидротермального поля Лост Сити методом молекулярного клонирования // Микробиология. 2010. Т. 79. № 1. С. 103-113.

9. Марусина А. И., Булыгина Е. С., Кузнецов Б. Б., Турова Т. П., Кравченко И. К., Гальченко В. Ф. Система олигонуклеотидных праймеров для амплификации генов *nifH* различных таксономических групп прокариот // Микробиология. 2001. Т. 70. № 1. С. 86-91.

10. Задорина Е. В. Биоразнообразии диазотроф почв с различной антропогенной нагрузкой: автореф. дис.... канд. биол. наук: 03.00.07. М., 2008. – 24 с.

11. Escobar B., Bustos K., Morales G., Salazar O. Rapid and specific detection of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans* by PCR // Hydro metallurgy. 2008. N. 92. P. 102-106.

12. Osborn M., Moore E., Timmis K. An evaluation of terminal-restriction fragment length polymorphism (tRFLP) analysis for the study of microbial community structure and dynamics // *Environmental Microbiology*. 2000. V. 2. P. 39–50.

13. Bawei C., Xingyu L., Wenyan L., Jiankang W. Application of clone library analysis and real-time PCR for comparison of microbial communities in a low-grade copper sulfide ore bioheap leachate // *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 2009. V. 36. P. 1409–1416.

14. Liu C. Q., Plumb J., Hendry P. Rapid specific detection and quantification of bacteria and archaea involved in mineral sulfide bioleaching using real-time PCR // *Biotechnology and Bioengineering*. 2006. V. 94. N. 2. P. 330–336. **WAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Рогатых Станислав Валентинович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, rogatykhsv@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 295–302.

S. V. Rogatykh

UNIVERSAL TEST SYSTEM USED FOR MOLECULAR BIOLOGICAL ANALYSIS OF MICROBIAL COMMUNITIES OF SULFIDE ORE DEPOSITS

The article shows the progress of research into the development of a universal test system that will allow amplifying a fragment of the genome of all the bacteria and archaea that make up the microbial community. Of eight pairs of seven primers, one pair was selected that was tested for pure lines of microorganism cultures of *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *S. thermosulfidooxidans*, and *F. acidiphilum*, which constitute the majority of the microbial sulfide ore community of the Shanuch deposit (Kamchatka) and showed its consistency.

Key words: bioleaching, oligonucleotides, acidophilic microorganisms, microbial community, copper-nickel deposit, primer.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-295-302

AUTHORS

Rogatykh S. V., Ph.D, Senior Research, Research Geotechnological center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Kungurova V. E., Truhin Ju.P., Aliskerov A. A. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2016. no S31. Pp. 56-71.

2. Hajnasova T. S., Kungurova V. E. Pozolotila L. A., Balykov A. A., Levenec O. O. *Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2015. no S63. Pp. 297-304.

3. Kuzjakina T. I., Hajnasova T. S., Levenec O. O. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2008. T. 12. no 2. Pp. 76–86.
4. Levenec O. O. *Nauchno-tehnicheskoe obosnovanie sposobov biovshhelachivanja v mezofil'nyh uslovijah sul'fidnoj kobalt-medno-nikelevoj rudy mestorozhdenija Shanuch (Kamchatka)* (Scientific-technical justification of the ways biofidelity-tion in a mesophilic sulfide cobalt-copper-Nickel ore deposits chanoch (Kamchatka)): dis. ... kand. tehn. nauk: 03.01.06. Petropavlovsk-Kamchatskij, 2012. 138 p.
5. Truhin Ju.P., Stepanov V. A., Sidorov M. D., Kungurova V. E. *Rudy i metally*. 2009. no 5. Pp. 75–81.
7. Kaljuzhnyj S. V., Shestakova N. M., Turova T. P., Poltarau A. B., Gladchenko M. A., Truhina A. I., Nazina T. N. *Mikrobiologija*. 2010. T. 79. no 2. Pp. 260–269.
8. Gerasimchuk A. L., Shatalov A. A., Novikov A. D., Butorova O. P., Pimenov N. V., Lein A. Ju., Janenko A. S., Karnachuk O. V. *Mikrobiologija*. 2010. T. 79. no 1. Pp. 103–113.
9. Marusina A. I., Bulygina E. S., Kuznecov B. B., Turova T. P., Kravchenko I. K., Gal'chenko V. F. *Mikrobiologija*. 2001. T. 70. no 1. Pp. 86–91.
10. Zadorina E. V. *Bioraznoobrazie diazotrof pochv s razlichnoj antropogennoj nagruzkoj* (Biodiversity diazotroph soils with various anthropo-genic load): avtoref. dis.... kand. biol. nauk: 03.00.07. Moscow, 2008. 24 p.



СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАЯ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

Представлены экспериментальные данные по сорбции цветных металлов и железа из продуктивных растворов БХВ кобальт-медно-никелевых руд. Показано, что оптимальным временем сорбции является время 1 час, лучшие результаты достигнуты с применением Na-формы КУ-2-8, при этом извлекается до 90 % никеля за три цикла сорбции.

Ключевые слова: продуктивные растворы, железо, никель, медь, кобальт, сорбция, катионит.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-303-309

Извлечение никеля из пульп бактериально-химического выщелачивания (БХВ) кобальт-медно-никелевых руд является сложной задачей. Кислые пульпы БХВ имеют сложный состав. Наряду с никелем они содержат медь, кобальт, железо, магний, кальций и др. Причем содержание железа зачастую превосходит содержание никеля в несколько раз. Известно, что для дальнейшей переработки растворов необходимо удалить основную часть железа. Одним из способов является осаждение его в виде гидроксида, используя такие реагенты как гидроксид натрия, карбонат кальция или другие. Однако, при повышении pH растворов до значений более 4,0 неизбежно сталкиваемся с потерями никеля за счет соосаждения [1, 2]. При осаждении железа карбонатом кальция, продуктивные растворы существенно обогащаются кальцием [3]. В печати обсуждается вопрос переработки таких многокомпонентных растворов сорбционными методами, в частности, предлагается использование минеральных сорбентов для переработки растворов низких концентраций [4], карбоксильных катионитов хелатного типа – СГ-1, КБ-4, КМ-2П, АНКБ-1, АНКБ-35 [5–7]. Целью настоящей работы является установление возможности сорбционного извлечения никеля из продуктивных растворов БХВ. Для решения проблемы – перспективной представляется сорбция с использованием катионита КУ-2-8.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 303–309.

© Т. П. Белова, Т. И. Ратчина, Л. С. Ершова, 2017.

Для исследования использовали реальные продуктивные растворы БХВ полученные в НИГТЦ ДВО РАН на лабораторной установке [8]. Первоначально было установлено оптимальное время сорбции. Для этого, пробы продуктивных растворов 1 и 2 с различным содержанием ценных компонентов были приведены в соприкосновение с катионитом КУ-2-8 при соотношении фаз 1:10. Через определенные промежутки времени отслеживалось снижение концентрации компонентов продуктивных растворов. По данным построены кинетические кривые, представленные на рис. 1. В качестве сорбента использовали смолу КУ-2-8 отечественного производства в водородной и натриевой формах, подготовленных согласно методики [9]. После установления оптимального времени сорбции был проведен эксперимент по ступенчатой схеме сорбции. Учитывая, что продуктивные растворы обогащены железом, для снижения концентрации железа использовали карбонат кальция [3]. Тонкодисперсный осадок, состоящий из сульфата кальция, гидроксида железа (III) и основных сульфатов железа (III) не отделяли. Таким образом, продуктивный раствор представлял собой суспензию. В работе применяли серную кислоту, соляную кислоту, гидроксид натрия, сульфат натрия, карбонат кальция квалификации не ниже «х.ч.». Определение состава растворов до и после сорбции проводили с использованием атомно-абсорбционного спектрофотометра AA-6300 Shimadzu (Япония), содержание кальция определяли трилонометрически. Погрешности определений не превышали допустимые используемых методик.

В табл. 1 представлен состав реальных продуктивных растворов, полученных на этапах БХВ, различающихся по содержанию ценных компонентов и использованных для кинетических исследований. По содержанию никеля растворы 1 и 2 отличаются почти в два раза, соотношение общего железа к никелю в первом растворе составляет 3,2 раза, во втором – 1,9.

Таблица 1

Состав продуктивных растворов 1 и 2

Раствор	рН	Содержание компонентов, мг/л			
		Ni ²⁺	Cu ²⁺	Co ²⁺	Fe ³⁺
1	2,35	4650±650	215±28	121±36	14740±2510
2	2,48	8340±1170	368±48	206±62	15860±2700

На графике зависимости концентрации ценных компонентов в продуктивном растворе от времени (рис. 1) наблюдается плавное снижение, установлено, что после первого часа сорбции уменьшение концентрации становится незначимым. Поэтому принято решение

ограничиться одним часом сорбции в следующих экспериментах. По данным сорбции для натриевой и водородной форм определена равновесная обменная емкость для каждого компонента и рассчитана суммарная равновесная емкость в мг-экв/г. Для натриевой формы средняя величина равновесной обменной емкости оказалась равной $5,42 \pm 0,05$ мг-экв/г, для водородной формы – $4,85 \pm 0,08$ мг-экв/г. Уже на этом этапе можно сделать вывод, что эффективность сорбции выше для натриевой формы. Однако, при таком соотношении фаз (1:10) за один цикл в статическом режиме сорбируется от 24,8 до 28,2 % ценных компонентов из раствора 1 и от 20,0 до 23,6 % из раствора 2.

Процент извлечения может быть повышен за счет снижения количества железа в продуктивном растворе и применения последовательной сорбции новыми порциями сорбента. Сорбцию из растворов

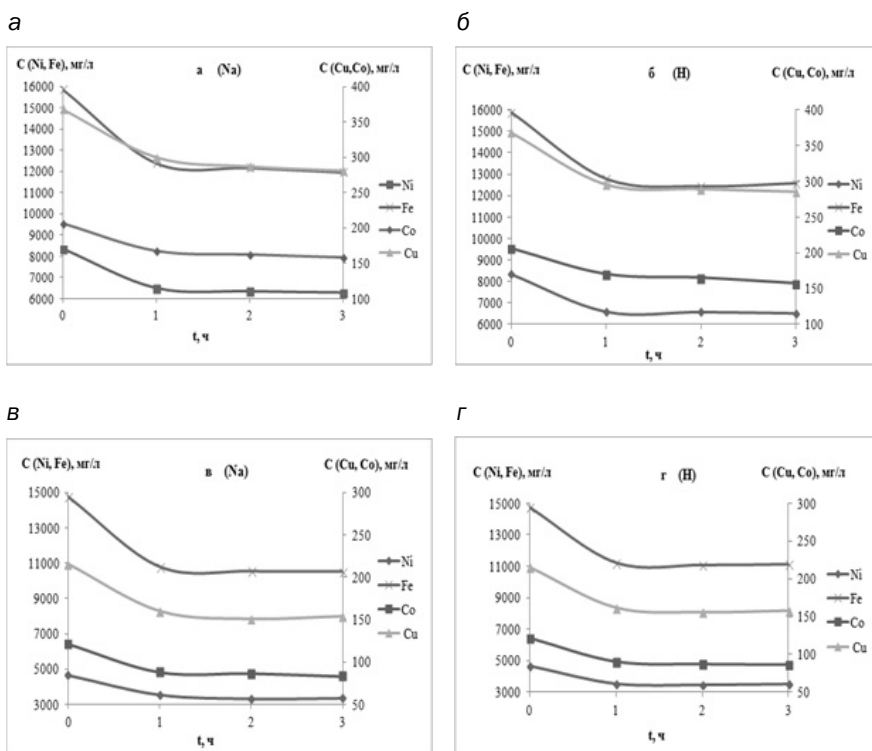


Рис. 1. Зависимость концентрации ценных компонентов в продуктивном растворе от времени при сорбции КУ-2-8 Т:Ж=1:10: а, б – продуктивный раствор 2; в, г – продуктивный раствор 1; а, в – Na-форма КУ-2-8; б, г – H-форма КУ-2-8

после обработки карбонатом кальция проводили в агитационном режиме в статических условиях при комнатной температуре. Время контакта составляло 1 час, после чего сорбент отделяли с помощью сита с размером ячейки 0,25 мм, а в суспензию помещали новую порцию сорбента. Всего проведено 3 цикла сорбции. Массовое соотношение суспензия/сорбент составило 1:10. В табл. 2 представлено содержание компонентов в жидкой фазе суспензии в зависимости от цикла сорбции.

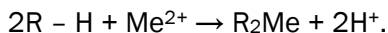
Анализируя данные, представленные в табл. 2, отметим, что в исходном продуктивном растворе (раствор 0) содержание железа почти в два раза превышает содержание никеля. Для снижения концентрации железа к раствору 0 был добавлен карбонат кальция из расчета $0,028 \pm 0,005$ кг на 1 кг продуктивного раствора. После 4-х часового перемешивания и отстаивания раствор над осадком был проанализирован, его состав представлен в таблице (раствор 1). Концентрация железа снизилась более чем в два раза и стала сопоставимой с концентрацией никеля. Снизилась также концентрация меди, но увеличилась более, чем в 7 раз концентрация кальция.

Таблица 2

Изменение содержания металлов в ходе сорбции катионитом КУ-2-8 в водородной форме в системе суспензия–сорбент

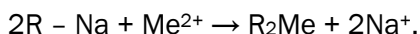
Номер цикла	рН	Содержание компонентов, мг/л					
		Ni ²⁺	Cu ²⁺	Co ²⁺	Fe ³⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
0	1,95	11120	710	286	21420	2160	100
1	4,37	10630	373	262	10640	2050	762
<i>H-форма КУ-2-8</i>							
2	1,85	6730	447	167	15560	1320	1300
3	1,18	3810	259	97,4	9458	787	1350
4	0,79	1860	130	53,1	5299	376	1500
<i>Na-форма КУ-2-8</i>							
5		7340	378	172,2	6180	1338	902
6		3272	174,8	89,8	3260	852	902
7		1044	51	12,02	1028	608	1002

После проведения первого цикла сорбции, отделения сорбента на сите и отстаивания, раствор над осадком был проанализирован (раствор 2). Наблюдали снижение концентрации никеля, кобальта, магния, но возрастание концентрации меди, железа и кальция. Это мы связываем с частичным растворением осадка из-за понижения рН. Понижение рН происходит благодаря реакции ионного обмена водородной формы катионита и ионов металлов по схеме:



В каждом последующем цикле сорбции (растворы 3–4) наблюдали равномерное снижение содержания всех компонентов, в том числе и железа, но концентрация кальция возрастала. Всего за три цикла сорбции извлекается 82,5 % никеля, 77,3 % меди, 79,7 кобальта 70,1 % железа и 84,0 % магния.

При сорбции на Na-форме КУ-2-8 (растворы 5–7) наблюдали равномерное снижение всех компонентов, кроме кальция. Обмен проходит по схеме:



За три цикла сорбции извлекается 90,2 % никеля, 86,5 % меди, 93,0 кобальта 90,3 % железа и 54,6 % магния. Высокие показатели процента извлечения указывают на то, что предпочтительнее использование Na-формы КУ-2-8 для сорбции ценных компонентов из продуктивных растворов БХВ.

Таким образом, на основании проведенных исследований показано, что оптимальным временем сорбции является время 1 час, лучшие результаты достигнуты с применением Na-формы КУ-2-8, при этом извлекается до 90 % никеля за три цикла сорбции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова Т. П., Ершова Л. С., Ратчина Т. И. Гидролитическое осаждение из продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд. // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). Отдельный выпуск «Камчатка-5». – М.: Издательство «Горная книга». 2017. С. 216–221.

2. Белова Т. П., Ершова Л. С. К вопросу о переработке продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд // «Актуальные вопросы науки». – М.: Издательство «Горная книга». 2017. – С. 177–179.

3. Белова Т. П., Ершова Л. С., Ратчина Т. И. Осаждение железа из продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд с использованием карбоната кальция Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). Отдельный выпуск «Камчатка-5». – М.: Издательство «Горная книга». 2017. – С. 210–215.

4. Белова Т. П., Гавриленко Ю. С., Ершова Л. С. // Адсорбция меди, никеля, кобальта и железа натуральным цеолитом из водных растворов в динамическом режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). Отдельный выпуск «Камчатка». – М.: Издательство «Горная книга». 2014. – С. 300–307.

5. Гуров В. А. Способ извлечения никеля из растворов и очистки от примесей. Пат. 2430981 РФ. № 2010111866/02. Заявлено 03.30.2010. Опубликовано 10.10.2011. Бюл. №28.

6. Кузьмин Д. В., Кузьмин В. И. Сорбция цветных металлов из пульп хелатами // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2013. №2. С. 151–157.

7. Низов В. А., Машенко В. Н., Бакиров А. Р. Способ переработки медно-никелевого сернокислого раствора. Пат. 2449033 РФ. № 2010146023/02. Заявлено 11.11.2010. Опубликовано 27.04.2012. Бюл. № 12.

8. Хайнасова Т. С., Левенец О. О., Балыков А. А. Бактериально-химические процессы переработки руд и их исследование в Камчатском крае // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». М.: Горная книга, 2016. № 11. С. 223–234.

9. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ. 1970. 488 с. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Белова Татьяна Павловна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, tpbel@yandex.ru,

Ратчина Татьяна Ивановна – ведущий инженер,

Ершова Людмила Сергеевна – младший научный сотрудник, ludmila-ershova8@mail.ru,

Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 303–309.

T. P. Belova, T. I. Ratchina, L. S. Ershova

SORPTION NICKEL RECOVERY FROM PRODUCTIVE SOLUTIONS OF BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING OF COBALT-COPPER-NICKEL ORES

The paper presents experimental data on the sorption of non-ferrous metals and iron from the productive solutions of BCL of cobalt-copper-nickel ores. It was shown that one hour is the optimum time for sorption; best results were achieved by using Na-form of KU-2-8 with nickel recovery up to 90 % during three cycles of sorption.

Key words: productive solutions, iron, nickel, copper, cobalt, sorption, cation exchanger.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-303-309

AUTHORS

Belova T. P., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, tpbel@yandex.ru,

Ratchina T. I., Lead Engineer,

Ershova L. S., Junior Research Scientist, ludmila-ershova8@mail.ru,

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Belova T. P., Ershova L. S., Ratchina T. I. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (Nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Otdel'nyj vypusk «Kamchatka-5». 2017. pp. 216–221.
2. Belova T. P., Ershova L. S. «Aktual'nye voprosy nauki». 2017. pp. 177–179.
3. Belova T. P., Ershova L. S., Ratchina T. I. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (Nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Otdel'nyj vypusk «Kamchatka-5». 2017. pp. 210–215.
4. Belova T. P., Gavrilenko YU.S., Ershova L. S. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (Nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Otdel'nyj vypusk «Kamchatka». 2014. pp. 300–307.
5. RF. № 2010111866/02. Gurov V. A. Zayavleno 03.30.2010. Opublikovano 10.10.2011. Byul. No 28.
6. Kuz'min D. V., Kuz'min V. I. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2013. no 2. pp. 151–157.
7. Pat. 2449033 RF. № 2010146023/02. Nizov V. A., Mashchenko V. N., Bakirov A. R. Zayavleno 11.11.2010. Opublikovano 27.04.2012. Byul. No 12.
8. Hajnasova T. S., Levenec O. O., Balykov A. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk no 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11. pp. 223–234.
9. Arinushkina E. V. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* (Manual on chemical analysis of soils). Moscow: MGU. 1970. 488 p.



В. О. Мусихин, А. В. Киореску, А. С. Хомченкова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ (ВОЗДЕЙСТВИЕ УЗИ, СВЧ И ТОКСИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА АЦИДОФИЛЬНЫЕ ХЕМОЛИТОТРОФНЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ)

Представлены экспериментальные данные о воздействии УЗИ, СВЧ и ионов токсичных металлов на активность ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, применяемых в процессах бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд и некоторые другие параметры биовыщелачивания. Приведены результаты исследований ультразвукового воздействия: предварительной активации пульпы и влияния излучения на окислительную способность и пролиферативную активность микроорганизмов. Получены необходимые сведения о влиянии микроволновой энергии на активность хемолитотрофных бактерий, определена оптимальная продолжительность предварительного облучения, которая обеспечивает высокую скорость роста микроорганизмов и эффективность восстановления металлов из руды. Показаны изменения видового состава (*Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *Sulfobacillus sp.*, *Ferroplasma sp.*) и численности клеток культуры в присутствии ионов металлов (Ni, Co, Cu, Mg, As) в питательной среде.

Ключевые слова: биовыщелачивание, интенсификация, ультразвук, микроволны, токсичные металлы, ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-310-321

В НИГТЦ ДВО РАН проводят исследования, направленные на создание эффективной и экологически безопасной технологии переработки сульфидных медно-никелевых руд путём бактериально-химического выщелачивания (БХВ). Важнейшей частью таких исследований является поиск средств и методов, способствующих интенсификации БХВ: приводящих к адаптации клеток культуры микроорганизмов к токсическому воздействию металлов (токсичные металлы — ТМ) и повышению показателей извлечения ценных компонентов из руды, путем воздействия УЗИ и СВЧ на бактериальные клетки.

Ультразвуковое излучение

Перспективным методом физической интенсификации и увеличения производительности процесса биовыщелачивания является

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 310–321.

© В. О. Мусихин, А. В. Киореску, А. С. Хомченкова, 2017.

применение УЗИ. УЗИ это фактор, значительно влияющий на функциональное состояние микроорганизмов [1, 2, 3, 4, 5]. Несмотря на обширное использование ультразвука в различных отраслях науки, техники и медицины, механизмы его воздействия требуют детального изучения. Ультразвуковое излучение влияет на физические, химические и биологические процессы [1, 5, 6, 7]. Ультразвуковое излучение, как правило, связывают с негативными биологическими эффектами и повреждением клеток. Однако экспериментально установлено повышение извлечения металлов в процессе БХВ при ультразвуковом воздействии [8, 9]. Механизм, обуславливающий эффекты УЗИ на процессы биовыщелачивания, до сих пор полностью не изучен. Биологические эффекты, связанные с воздействием ультразвука, имеют несколько причин (тепловые, химические, механические, кавитационные), которые не в полной мере характеризуют это явление [10, 11, 12, 13].

Микроволновое излучение

Основным недостатком технологии БХВ является большая продолжительность процессов, связанная со слабой окислительной активностью микроорганизмов, участвующих в процессе. Для стимуляции роста железо- и сероокисляющих микроорганизмов и повышения их окислительной активности, часто применяется электромагнитное поле сверхвысокой частоты. Воздействие микроволновых полей на биологические объекты вызывает эффекты, которые можно разделить на две основные группы – это тепловые эффекты, обусловленные трением колеблющихся молекул в электромагнитном поле, и нетепловые эффекты. С точки зрения науки, наибольший интерес представляют нетепловые эффекты, когда средний по объему нагрев тканей не является определяющим или пренебрежимо мал [14].

Основная проблема использования микроволнового излучения в качестве физического агента, стимулирующего рост микроорганизмов и их продуктивность, связана с определением оптимальных параметров облучения, которые обеспечивали бы нужные эффекты, необходимые для решения конкретно поставленных задач.

Токсичные металлы

Резистентностью к ионам ТМ обладают микроорганизмы, обитающие вблизи действующих вулканов, гидротермальных источников и мест залежей руд; т.е. такие микроорганизмы эволюционно адаптированы к повышенным содержаниям ТМ в природной среде. Однако в растворах промышленных реакторов концентрации ТМ могут значительно превышать природные и приводить к снижению биоактивности сообщества микроорганизмов [17].

Устойчивость микроорганизмов к ионам ТМ (в т.ч. Ni, Co, Cu, Mg, As) может быть обусловлена следующими факторами: типом и количеством путей транспорта ионов металлов в клетку; локализацией генов резистентности на хромосоме, плазмиде или транспозоне; ролью ионов металлов в метаболизме клетки. Один штамм может одновременно обладать разными механизмами защиты: внеклеточный барьер; активный транспорт ионов металлов из клетки (эффлюкс); внеклеточная секвестрация; внутриклеточная секвестрация; восстановление ионов металлов [16, 17].

Экспериментальная часть

Ультразвуковое излучение

В экспериментах по определению оптимальных условий облучения пульпы и ацидофильных хемолитотрофных бактерий, используемых в процессах БХВ, использовалась смешанная культура аборигенных микроорганизмов, выделенных с медно-никелевой руды месторождения Шануч, сульфидная руда медно-никелевого месторождения Шануч (исходные концентрации металлов: Ni – 4,52 %; Cu – 0,68 %; Co – 0,11 %; степень измельчения руды ≤ 100 мкм).

Первая часть работы была посвящена влиянию УЗИ на скорость накопления биомассы и на эффективность окисления двухвалентного железа в зависимости от времени облучения пульпы выщелачивания. Эксперимент проводился в колбах Эрленмейера на 250 мл, содержащих 200 мл культуральной среды. Ультразвуковую активацию руды осуществляли, обрабатывая пульпу, помещённую в колбы (контроль, 15 минут, 30 минут, 45 минут, 60 минут). Облучение происходило в ультразвуковой ванне с термостатом Сапфир ТТЦ 28 с внутренним размером камеры 50·30·20 см, ультразвуковым генератором с частотой 40 кГц, мощностью 240 Вт. После облучения во все колбы была одновременно добавлена суспензия микроорганизмов (0 сутки). Процесс БХВ длился 35 суток, три комнатной температуре.

Развитие микроорганизмов и выщелачивание металлов – это два процесса, проходящих одновременно. Выщелачивание металлов, обусловленное действием микроорганизмов, главным образом зависит от синтеза кислоты. Водородный показатель был принят в качестве основного критерия для оценки интенсификации выщелачивания металлов. Изменение pH представлено на рис. 1.

Поведение графиков до 11 суток обусловлено, прежде всего, взаимодействием серной кислоты, содержащейся в минеральной среде 9К, и рудных минералов. Процесс изменения pH среды микроорганизмами (12–35 сутки), имеет один характер во всех колбах, вне зависимости от длительности ультразвуковой экспозиции. По-

сколькo водородный показатель среды зависит от физиологической и пролиферативной активности микроорганизмов, можно предположить, что облучение при заданных параметрах выражено не влияет на рудную компоненту, как на субстрат для жизнедеятельности микроорганизмов.

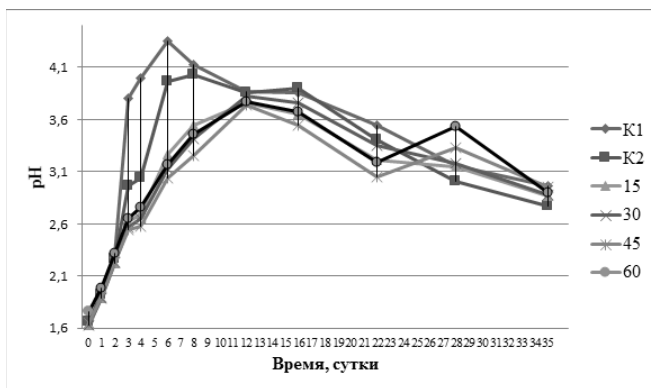


Рис. 1. Изменение pH в жидкой фазе пульпы

Вторая часть работы была посвящена вопросу влияния излучения на культуру ацидофильных хемолитрофных микроорганизмов в среде 9К Сильвермана и Лундгрена с добавлением Fe(II). Эксперимент по БХВ был проведён в шести конических колбах объёмом 250 мл. В каждую из ёмкостей было добавлено 100 мл стерильной минеральной среды 9К с добавлением двухвалентного железа ($\text{pH} \approx 1,8$, $\text{C}_{\text{Fe}} = 5 \text{ г/л}$) и 1 мл клеточной суспензии. Ультразвуковая активация микроорганизмов, находящихся в минеральной среде, происходила в ультразвуковой ванне. Процесс культивации длился 4 суток, при комнатной температуре на качалке.

Основными критериями оценки эффективности УЗ интенсификации в эксперименте были приняты величины: скорость окисления железа, концентрация микроорганизмов (рис. 2–3). Из представленных данных о изменении концентрации ионов железа (рис. 2) можно заключить, что процесс генерации ионов Fe^{3+} протекает идентично во всех колбах со средней скоростью $1,25 \text{ г/л}\cdot\text{сутки}$, вне зависимости от ультразвуковой активации, что согласуется с результатами, полученными при изменении pH и Eh. Процессы роста концентрации бактериальных клеток у образцов, прошедших УЗ активацию, идут интенсивнее, чем у контроля (рис. 3). Максимальная плотность бактериальных клеток в среде была достигнута в колбе, прошедшей облучение 20 минут на третьи сутки, количество бактериальных клеток в милли-

литре среды данного опытного образца ($116,54 \cdot 10^6$ кл/мл) – выше, чем в контроле ($54,01 \cdot 10^6$ кл/мл) в 2,16 раза. Эти закономерности согласуются с имеющимися данными. В ряде исследований отмечен эффект резкого увеличения количества клеток [11, 12, 13].

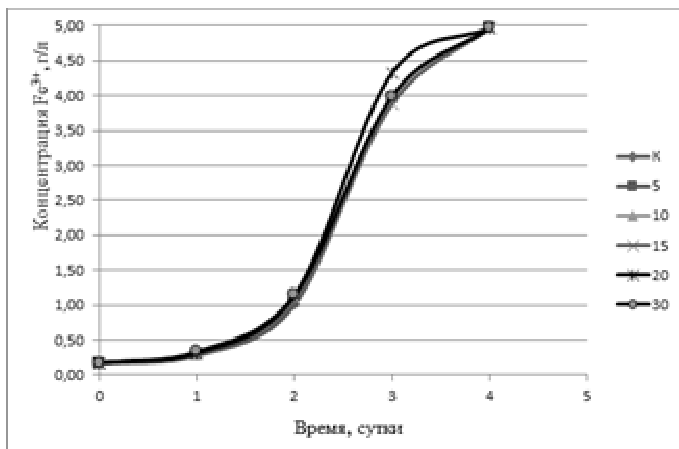


Рис. 2. Изменение концентрации ионов Fe³⁺

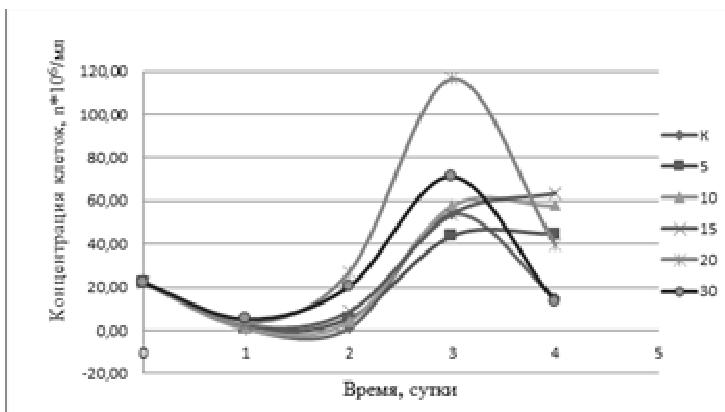


Рис.3. Изменение концентрации клеток

Результаты исследований ультразвукового воздействия позволяют заключить, что предварительная ультразвуковая активация пульпы и микроорганизмов при заданных характеристиках облучения, не имеет выраженного эффекта для процессов биовыщелачивания. Значительное увеличение количества микроорганизмов в опытных образцах происходит без изменения генерации ионов трехвалентно-

го железа, следовательно, не является значительно интенсифицирующим процесс биовыщелачивания фактором. Необходимо проведение дальнейших исследований для определения оптимального режима воздействия УЗИ на процесс БХВ. Для дальнейшего исследования представляют интерес работы, связанные с многократным облучением суспензий клеток микроорганизмов в процессе биовыщелачивания суммарно большими дозами излучения, чем в проведённых работах.

Микроволновое излучение

В экспериментальной работе по определению оптимальных параметров облучения хемолитотрофных бактерий, участвующих в процессах БХВ, использовалась смешанная культура мезофильных ацидофильных микроорганизмов, выделенных с медно-никелевой руды месторождения Шануч. По данным ПЦР-диагностики, в состав данного сообщества входили *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfobacillus sp.* [15]. В качестве источника микроволнового излучения использовалась СВЧ-печь (2,45 ГГц, 900 Вт). Временные интервалы были равны: 5 с, 10 с, 15 с. Пробирки с микроорганизмами помещались в бокс со льдом для минимизации теплового эффекта во время облучения.

Первая часть работы заключалась в выявлении зависимости скорости накопления биомассы и эффективности окисления двухвалентного железа от продолжительности облучения. Эксперимент проводился в колбах Эрленмейера на 250 мл, содержащих 200 мл питательной среды 9К с добавлением Fe(II). Процессы шли при постоянной температуре 30 °С, без перемешивания. Контролем служила колба, с находящимися в ней необлученными микроорганизмами.

Таблица 1

Основные результаты эксперимента

Время облучения, с	Объём, мл	Макс. число клеток в 1 мл	Скорость окисления Fe ²⁺ , мг/сут
0	200	2,1·10 ⁸	82
5	200	3,9·10 ⁸	98
10	200	6,1·10 ⁸	102
15	200	0	-

В ходе эксперимента было установлено, что предварительное облучение микроорганизмов в течение 10 секунд стимулирует их рост и окислительную активность. Облучение продолжительностью в 15 секунд полностью подавляло рост бактерий.

Целью второй части работы являлось определение зависимости продолжительности предварительного облучения железо- и сероокисляющих микроорганизмов на эффективность процессов БХВ кобальт-медно-никелевой руды (исходные концентрации металлов: Ni – 4,52 %; Cu – 0,68 %; Co – 0,11 %; степень измельчения руды ≤ 100 мкм). Облучение также проводилось в СВЧ-печи (2,45 ГГц, 900 Вт), продолжительность облучения составила 5 и 10 секунд. БХВ проводилось в периодическом режиме, в колбах Эрленмейера на 250 мл, содержащих 200 мл питательной среды 9К (без железа) и 20 г медно-никелевой руды. Эксперимент протекал при комнатной температуре. Количество никеля, меди и кобальта в растворе определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Таблица 2

Степень извлечения металлов

Время облучения, с	Извлечение, %		
	Ni	Cu	Co
0	15	10	10
5	24	15	16
10	26	15	16

Токсичные металлы

В эксперименте по влиянию ионов ТМ на рост культуры ацидофильных хемолитотрофов была использована культура мезофильных ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, являющаяся аборигенной для сульфидной медно-никелевой руды (источник выделения культуры: окисленная руда месторождения Шануч (Камчатский край), выделение было начато 19.11.2007). На момент проведения исследования в состав данной культуры входили: *Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *Sulfobacillus sp.*, *Ferroplasma sp.* (по данным ПЦР-диагностики НИГТЦ ДВО РАН). В качестве источника ионов ТМ, в питательную среду 9К добавляли соли этих металлов (NiSO_4 , CoCl_2 , CuSO_4 , MgSO_4 , Na_3AsO_4) в различных концентрациях (0,10; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50 %). Культивировали в течение 20–22 суток при температуре 30 °С. Контроль – выращивание культуры в среде 9К без добавления солей ТМ. Учёт количества клеток проводили путём прямого подсчёта под микроскопом (результаты подсчётов представлены в табл. 3) [17].

Увеличение концентрации в ростовой среде соли никеля до 1,0–1,25 %; кобальта до 1,0–1,50 %; меди до 0,75–1,50 %; магния до 1,50 %; мышьяка до 0,25–1,50 % в 12–18 сутки культивирования ингибирует рост культуры, после чего (на 19–22 сутки) численность бактерий восстанавливается и становится приближенной к началу экс-

перимента. Такое изменение численности клеток культуры, вероятно, связано с гибелью неустойчивых клеток, и ростом клеток, обладающих механизмами защиты [17].

Таблица 3

Результаты количественного учёта клеток микроорганизмов в процессе культивирования под воздействием различных концентраций солей ТМ

Концентрация, %	Сутки	Количество клеток в 1 мл ($\times 10^5$)				
		NiSO ₄	CoCl ₂	CuSO ₄	MgSO ₄	Na ₃ AsO ₄
0,10	0-11	1,5	18,9	8,3	10,6	15,9
	12-18	11,3	7,6	11,3	21,9	10,6
	19-22	18,9	27,2	24,2	25,7	20,4
0,25	0-11	5,0	17,4	25,7	22,7	41,6
	12-18	12,8	11,3	15,9	16,6	6,8
	19-22	21,2	16,6	31,0	18,1	20,4
0,50	0-11	19,7	47,7	38,6	16,6	18,0
	12-18	12,0	10,6	18,9	15,1	12,8
	19-22	19,7	21,8	21,2	25,0	16,6
0,75	0-11	13,6	29,5	38,6	15,9	43,9
	12-18	9,8	12,8	25,7	19,7	7,5
	19-22	16,5	18,1	27,2	25,7	15,1
1,00	0-11	16,6	34,1	59,8	15,6	28,0
	12-18	6,0	15,9	21,2	20,4	8,3
	19-22	13,6	20,4	23,4	27,2	20,4
1,25	0-11	13,6	18,1	32,5	11,3	10,6
	12-18	12,8	18,1	21,2	25,0	8,3
	19-22	21,2	20,4	24,2	25,0	15,1
1,50	0-11	13,6	56,8	31,8	27,2	12,0
	12-18	13,6	12,8	18,1	9,8	8,3
	19-22	15,9	31,8	21,2	31,8	15,1

Примечание. х – количество клеток в одном миллилитре.

Результаты ПЦР-анализа (табл. 4) подтвердили, что микроорганизмы-представители культуры, использованной в эксперименте, обладают природными механизмами устойчивости к воздействию ТМ. Три вида из четырех от первоначальной культуры (*A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *Ferroplasma* sp.) проявили резистентность к высоким содержаниям солей никеля и кобальта в питательной среде. Наибольший ингибирующий эффект на бактериальное сообщество оказали соли магния и мышьяка, в присутствие этих веществ отмечен рост только *Sulfobacillus* sp. [17].

Результаты эксперимента позволяют заключить, что входящие в состав одного аборигенного сообщества микроорганизмы имеют различную резистентность к ТМ. Для эффективного использования культур хемолитотрофов в БХВ необходимо проводить предварительную видовую и штаммовую селекцию [17].

Результаты ПЦР-диагностики культур, выращенных под воздействием различных концентраций солей ТМ

Микроорганизм	Наличие (+) / отсутствие (-) роста в среде с				
	NiSO ₄	CoCl ₂	CuSO ₄	MgSO ₄	Na ₃ AsO ₄
<i>A. thiooxidans</i>	+	+	-	-	-
<i>A. ferrooxidans</i>	+	+	-	-	-
<i>Sulfobacillus</i> sp.	-	-	+	+	+
<i>Ferroplasma</i> sp.	+	+	+	-	-

В продолжение проведенных экспериментов по интенсификации процессов БХВ влиянием УЗИ, СВЧ и адаптации клеток культур ацидофильных хемолитотрофов к токсичным металлам, планируется провести исследование совокупного воздействия всех указанных факторов на жизнедеятельность культур и извлечение металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопян В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 224 с.
2. Буц В. А., Скибенко К. П. Изменение иммуногенности клеток и супернатанта под воздействием ультразвука. // Биофизика. 1991. том 36. вып. №5. — С. 263-265.
3. Перс И. Ф., Жданова Л. Г. Действие ультразвука на биологические свойства бактерий кишечной группы. Сообщение IT. Изменение биохимических свойств и антигенной структуры шигелл и сальмонелл под влиянием ультразвука // ЖМЭИ. 1964. №3. — 27.
4. Симонян З. Г., Кавтарадзе Ц. В. Влияние ультразвуковых волн на патогенные свойства стафилококков и их чувствительность к антибиотикам // Тр. НИ-кожно-венерол. института МЗГССР. 1970. Т. 13-14. — С. 381-388.
5. Сорока С. А. Влияние акустических колебаний на биологические объекты // Вибрация в технике и технологиях. 2005. № 1. — С. 39 – 41.
6. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. под редакцией В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. — 726 с.
7. Демин И. Ю., Прончатов-Рубцов Н. В. Современные акустические методы исследований в биологии и медицине (учебно-методические материалы) [Электронный ресурс] // Электронный курс лекций. URL: <http://www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/37.pdf>
8. Мусихин В. О. Методы интенсификации процессов бактериально-химического выщелачивания воздействием ультразвукового излучения // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11., С. 351-355.

9. Barrera-Godinez J. A., Okeefe T. J., Watson J. L., 1992. Effect of ultrasound on acidified brine leaching of double kiln treated EAF dust. Miner. Eng. 5, 1365

10. Мусихин В. О. Механизм воздействия ультразвукового излучения на процессы бактериально-химического выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11., С.356-359.

11. Swamy K. M., Narayana K. L., Vibhuti N., Misra, 2005. Bioleaching with ultrasound. Ultrason. Sonochem. 12, 301–306.

12. Bar R., Ultrasound-enhanced bioprocesses: cholesterol oxidation by *Rhodococcus erythropolis*, Biotechnol. Bioeng. 32 (1988) 655– 663.

13. Chisti Y., Mass transfer, in: Flickinger M. C., Drew S. W. (Eds.), Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation, vol. 3, John Wiley, 1999, pp. 1607–1640.

14. Киореску А. В. Исследование влияния СВЧ-излучения на ацидофильные хемолитотрофные бактерии // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга, 2016. – № 11. – С. 313–318.

15. Хайнасова Т. С. и др. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч различными культурами аборигенных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11., С. 297.

16. Хомченкова А. С. Микробиологические аспекты бактериально-химического выщелачивания сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63, «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11., С. 371-377.

17. Хомченкова А. С. Исследование влияния различных концентраций солей тяжелых металлов на рост культуры ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С. 217 – 222.

18. Киореску А. В., Мусихин В. О., Хомченкова А. С., Балыков А. А. Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». М.: Горная книга, 2015. №11., С. 360-365.

19. Киореску А. В., Мусихин В. О., Хомченкова А. С. Исследование процессов проточного бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3», М.: Горная книга, 2016. № 11., С 272-279. **ПМБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Мусихин В. О. – младший научный сотрудник, bioleaching@yandex.ru,
Киореску А. В. – младший научный сотрудник, bioleaching@yandex.ru,
Хомченкова А. С. – младший научный сотрудник, bioleaching@yandex.ru,
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

V. O. Musikhin, A. V. Kioresku, A. S. Khomchenkova

**THE EXPERIMENTAL INTENSIFICATION OF BIOLEACHING
PROCESSES (IMPACT OF ULTRASOUND, MICROWAVES
AND TOXIC METALS ON AN ACIDOPHILIC CHEMOLITHOTROPHIC
MICROORGANISMS)**

The experimental datas about the impact of ultrasound, microwave and toxic metal's ions on an acidophilic chemolithotrophic microorganisms activity, which apply in the sulfide-copper-nickel ores bioleaching processes, and some other bioleaching parameters were presented in this article. The results of ultrasound impact's study were adduced: about a preliminary pulp's activation and eradiation's influence on the microorganisms oxidizing capacity and proliferative activity. The necessary information about impact microwave energy on a chemolithotrophic bacteria activity were obtained, a preliminary irradiation's optimal duration, which provide a high growth rate and efficiency of metal recovery from ore was determined. The species composition changes (*Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, *Sulfobacillus sp.*, *Ferroplasma sp.*) and culture cells number in the presence of metal ions (Ni, Co, Cu, Mg, As) in a nutrient medium were shown.

Key words: bioleaching, intensification, ultrasound, microwave, toxic metal, acidophilic chemolithotrophic microorganism.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-310-321

AUTHORS

Musikhin V. O., junior scientist, bioleaching@yandex.ru,

Kioresku A. V., junior scientist, bioleaching@yandex.ru,

Khomchenkova A. S., junior scientist, bioleaching@yandex.ru,

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian academy of Science, Russia.

REFERENCES

1. Akopyan. V B. *Osnovy vzaimodeystviya ultrazvuka s biologicheskimi obyektami: Ultrazvuk v meditsine, veterinarii i eksperimentalnoy biologii* (Basics of the interaction of ultrasound with biological objects: Ultrasound in medicine, veterinary and experimental biology). Moscow: MGTU im. N. E. Baumana. 2005. 224 p.
2. Buts V. A., Skibenko K. P. *Biofizika*. 1991. tom 36. vyp. No 5. pp. 263-265.
3. Pers I. F., Zhdanova. L. G. *ZhMEI*. 1964. no 3. 27 p.
4. Simonyan Z G., Kavtaradze Ts.V. *Tr. NI kozhno-venerol. instituta MZGSSR*. 1970. T. 13-14. pp. 381-388.
5. Soroka S. A. *Vibratsiya v tekhnike i tekhnologiyakh*. 2005. no 1. pp. 39–41.
6. Bergman L. *Ultrazvuk i ego primeneniye v nauke i tekhnike* (Ultrasound and its application in science and technology). Per. s nem. pod redaktsiyey V. S. Grigoryevai, L. D. Rozenberga. Moscow: Izd-vo inostrannoy literatury. 1957. 726 p.
7. Demin I. Yu., Pronchatov-Rubtsov N. V. *Elektronnyy kurs lektsiy*.
URL: <http://www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/37.pdf>
8. Musikhin V. O. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 63 «Kamchatka-2». 2015. no 11, pp. 351-355.

9. Barrera-Godinez J. A., Okeefe T. J., Watson J. L., 1992. *Effect of ultrasound on acidified brine leaching of double kiln treated EAF dust*. Miner. Eng. 5. 1365
10. Musikhin V. O. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 63 «Kamchatka-2». 2015. no 11, pp.356-359.
11. Swamy K. M., Narayana K. L., Vibhut. N., Misra. 2005. *Bioleaching with ultrasound*. *Ultrason. Sonochem.* 12. 301–306.
12. Bar R., *Ultrasound-enhanced bioprocesses: cholesterol oxidation by Rhodococcus erythropolis*. *Biotechnol. Bioeng.* 32 (1988) 655–663.
13. Chisti Y. Mass transfer. in: Flickinger M. C., Drew S. W. (Eds.). *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation*. vol. 3. John Wiley, 1999. pp. 1607–1640.
14. Kioresku A. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 1, pp. 313-318.
15. Khaynasova T. S. i dr. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 63 «Kamchatka-2». 2015. no 11, p. 297.
16. Khomchenkova A. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 63. «Kamchatka-2». 2015. no 11, pp. 371-377.
17. Khomchenkova A. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11, pp. 217–222.
18. Kioresku A. V., Musikhin V. O., Khomchenkova A. S., Balykov A. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 63 «Kamchatka-2». 2015. no 11, pp. 360-365.
19. Kioresku A. V., Musikhin V. O., Khomchenkova A. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Spetsialnyy vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11, pp. 272-279.



НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РОЛИ МИКРООРГАНИЗМОВ В БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИИ СУЛЬФИДНОЙ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ

Приведены сравнительные результаты эксперимента по окислению сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатский край) с использованием инокулята бактериальной культуры и отмытой от культуральной жидкости биомассы клеток. Показано положительное влияние присутствия микроорганизмов в данном процессе на извлечение никеля, меди и кобальта в сравнении с абиотическим процессом.

Ключевые слова: биовыщелачивание, сульфидная кобальт-медно-никелевая руда, ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-322-335

Введение

Биовыщелачивание и биоокисление ценных компонентов из руд используют в ряде стран, в том числе, в России. Процессы выполняют кучным, дамповым и чановым способами при участии специфичной группы микроорганизмов – ацидофильных хемолитотрофов (*Acidithiobacillus* sp., *Leptospirillum* sp., *Ferroplasma* sp., *Sulfobacillus* sp., *Sulfobolus* sp., *Acidianus* sp. и других). Микробным технологиям переработки руд посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых [1–18]. Повышенный интерес к биотехнологическому подходу обусловлен ужесточением контроля за состоянием окружающей среды при эксплуатации месторождений и переходом на комплексное и ресурсосберегающее недропользование. Биовыщелачивание – это сложный процесс, представляющий собой совокупность биологически катализируемых химических реакций. Вопросы эффективности его до сих пор остаются актуальными [15].

В настоящей работе приведены некоторые аспекты биовыщелачивания, посвященные выяснению роли микроорганизмов в данном процессе, на примере сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатский край).

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 322–335.

© Т. С. Хайнасова, 2017.

Материалы и методы

Проба руды. В исследовании использовали просеянную сульфидную руду медно-никелевого месторождения Шануч степени измельчения ~100 мкм, состоящую на 60 % из рудных и на 40 % из нерудных минералов. Минеральный состав был представлен пирротинном (85–90 %), пентландитом (5–6 %), халькопиритом (2–5 %), виоларитом (0,2–0,5 %). Процентное содержание металлов насчитывало 7,21 % Ni, 0,91 % Cu, 0,17 % Co, 48,3 % Fe₂O₃. Во избежание выделения посторонних микроорганизмов руду предварительно стерилизовали в течение 1 часа в сухожаровом шкафу при 180 °С.

Микробная культура. В качестве инокулята использовали автохтонную бактериальную культуру, выделенную из окисленной руды месторождения Шануч. Первичное накопление микроорганизмов проводили при температуре 30 °С в колбе Эрленмейера ($V = 0,8$ л) в стационарных условиях с использованием образца руды и питательной среды Сильвермана и Люндгрена (9К) без сульфата железа [19] в соотношении 1:10. Перед экспериментом микробная ассоциация культивировалась в лабораторных реакторах большего объема ($V = 1,5$ л) в агитационных условиях (скорость вращения механической мешалки ~100 об/мин) с сохранением таких параметров, как температура и состав питательной среды, с применением руды, аналогичной образцу, использованному в настоящей работе.

В результате молекулярно-биологических исследований (полимеразной цепной реакции в реальном времени) в составе микроорганизмов обнаруживались представители родов *Acidithiobacillus* (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*) и *Sulfobacillus* (*Sulfobacillus thermosulfidooxidans*).

Условия эксперимента. Биовыщелачивание проводили в периодическом режиме в лабораторных условиях в колбах ($V=0,25$ л) на качалке с контролем в трех повторах. Рабочий объем пульпы включал 150 мл жидкой и 15 г твердой фазы. В состав жидкой фазы входили раствор минеральных солей среды 9К без железа (г/л: (NH₄)₂SO₄ – 3; KCl – 0,1; K₂HPO₄ – 0,5; MgSO₄·7H₂O – 0,5; Ca(NO₃)₂ – 0,01; pH = 1,82) и инокулят. В качестве инокулята в одном из вариантов эксперимента использовали вышеуказанную микробную культуру в объеме 30 мл, в другом – отмытую от культуральной жидкости клеточную суспензию микроорганизмов, подготовленную посредством центрифугирования биомассы при 5 000 об/мин, низкой температуре и двойной промывки клеток подкисленной питательной средой 9К без железа [20, 21]. Суспензию освобождали от культуральной жидкости с целью определения влияния дополнительных химических соединений (глав-

ным образом, сульфата трехвалентного железа и серной кислоты, как основных окислителей минералов сульфидной руды), попадающих с культурой микроорганизмов, на биовыщелачивание. В качестве твердой фазы выступала вышеописанная проба руды. Подкисление пульпы не осуществляли. Температурный режим составлял 30 °С. Перемешивание пульпы – 140 об/мин. В качестве контроля использовали раствор минеральных солей 9К без железа с рудой с добавлением бактерицидной смеси, подавляющей активное выделение аборигенной микрофлоры (состав смеси: 2 % тимол+ 95 % этанол (1:1); 2–3 мл на каждые 100 мл жидкости) [22].

В ходе биовыщелачивания, после осаждения руды в течение 5 минут, осуществляли измерение основных параметров пульпы: pH, Eh, клеточную численность в 1 мл раствора, концентрации Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe_{общ}$, Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} в растворе и промывных водах, процентное содержание Ni, Cu, Co в руде до и после эксперимента.

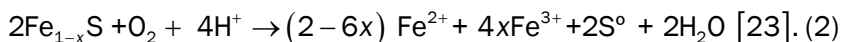
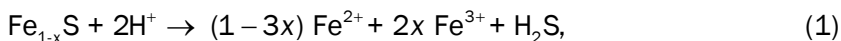
Результаты и обсуждение

Результаты исследования представлены в графическом виде на рис. 1–5 и в табл. 1. Каждому варианту проведения процессов для удобства присвоен порядковый номер: 1 – биовыщелачивание с отмытой от культуральной жидкости суспензией бактериальных клеток, 2 – биовыщелачивание с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью, в которой предварительно они выращивались, 3 – абиотический контроль.

На основании литературных [23] и ранее полученных экспериментальных данных [7], известно, что окисление пирротина, составляющего основную минеральную часть сульфидной руды месторождения Шануч, является потребляющей кислоту реакцией и сопровождается понижением уровня pH. Расход протонов водорода в первые сутки процесса в большей или в меньшей степени также наблюдался во всех вариантах эксперимента, включая абиотический контроль (рис. 1). При этом в отсутствии микроорганизмов расход был более выражен.

В связи с недостатком окисления Fe^{2+} микроорганизмами в первые дни выщелачивания, связанного с их адаптацией к новым условиям после пересева, наблюдалось уменьшение Eh выщелачивающего раствора (рис. 2). Как и в случае с pH, Eh в первые сутки в контроле значительно снижался; в присутствии микроорганизмов изменение окислительно-восстановительного потенциала было менее выражено.

Изменение значений вышеуказанных параметров характеризует первую стадию растворения пирротина и обуславливается комбинацией неокислительных и окислительных реакций (1, 2).



В целом, в ходе всего эксперимента pH характеризовался постепенным и несущественным снижением. В случае использования микроорганизмов с культуральной жидкостью pH был самым низким на протяжении всего эксперимента, достигая к концу процесса значения 2,23 и обнаруживая в период с 1-х по 3-е сутки этап кислотного разложения руды с совместной сероокисляющей активностью микроорганизмов.

Eh на протяжении процесса показывал стабильность параметра для варианта с отмытой суспензией бактериальных клеток и контроля; в случае микроорганизмов с культуральной жидкостью с 9-х суток отмечался значительный прирост значения, превышающий 520 мВ. Он был связан с переходом находящегося в растворе двухвалентного железа в трехвалентную форму.

Важным этапом в выщелачивании является первичный контакт раствора с рудой, инициирующий разрушение железосодержащих минералов (в первую очередь, пирротина) и дальнейший перевод железа в растворенную форму (рис. 3). В установленных условиях концентрация железа в растворе была невысокой к концу процесса, и достигала практически 1,5 г/л в варианте применения микроорганизмов с культуральной жидкостью. Меньшие концентрации (< 1 г/л) отмечались в остальных вариантах эксперимента. При этом перевод железа в трехвалентную форму происходил в основном в случае использования культуры микроорганизмов, не подвергавшейся предварительным манипуляциям с осаждением и промывкой биомассы. Поскольку катион трехвалентного железа, являющийся комплексообразователем, играет роль мощного окислителя, он немедленно вступал в окислительно-восстановительные реакции с последующим формированием нерастворимых вторичных комплексов соединений на поверхности руды. Данное явление в отсутствие принудительного подкисления приводило к уменьшению концентрации общего железа в растворе.

Численность клеток насчитывала в ходе всего процесса 10^8 - 10^9 кл/мл (рис. 4). Поведение культуры характеризовалось прикреплением бактерий к руде (лаг-фаза) на первом этапе процесса с дальнейшим увеличением числа клеток в растворе (с 9-х суток). В случае отмытой суспензии бактерий концентрация планктонных клеток не превышала 10^6 кл/мл. Низкая концентрация и отсутствие значительного прироста бактерий впоследствии, вероятно, были связаны

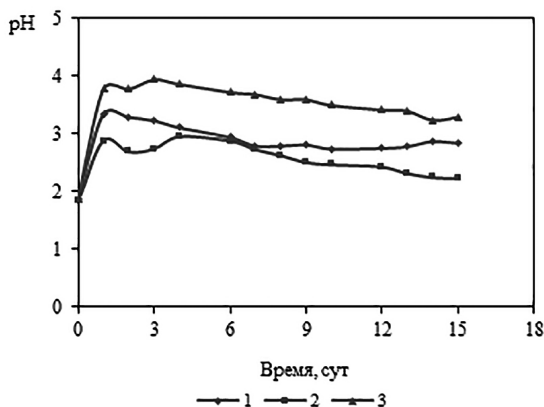


Рис. 1. Изменение pH раствора в процессе выщелачивания: 1 – биовыщелачивание с отмытой от культуральной жидкости суспензией микроорганизмов; 2 – биовыщелачивание с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью; 3 – контроль (без микроорганизмов)

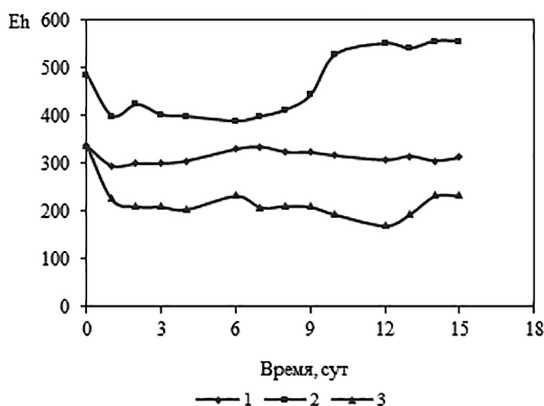


Рис. 2. Изменение Eh раствора в процессе выщелачивания: 1 – биовыщелачивание с отмытой от культуральной жидкости суспензией микроорганизмов; 2 – биовыщелачивание с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью; 3 – контроль (без микроорганизмов)

с влиянием процедуры подготовки культуры к эксперименту. Однако следует отметить, что в начале эксперимента, после смешивания клеточной суспензии с питательной средой, раствор визуально характеризовался белесым опалесцирующим цветом, что подтверждало наличие и влияние микробной составляющей на процесс и, в сравнении с абиотическим контролем, впоследствии был отмечен существенный вклад ее ферментативных систем в окисление руды.

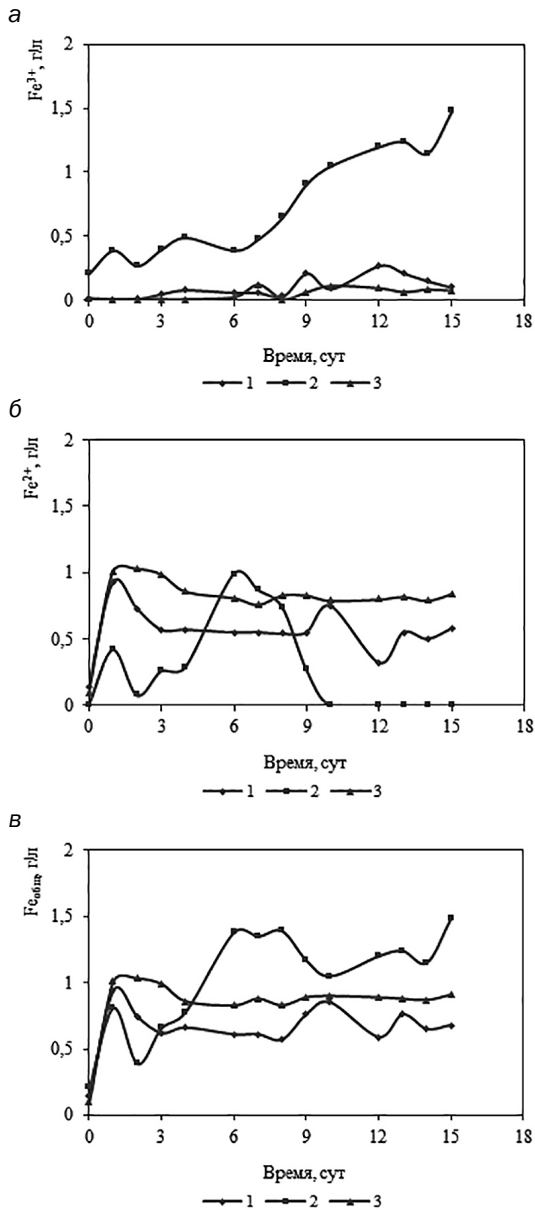


Рис. 3. Изменение концентрации Fe в растворе в процессе выщелачивания: а – Fe^{3+} , б – Fe^{2+} , в – $Fe_{общ}$: 1 – биовыщелачивание с отмытой от культуральной жидкости суспензией микроорганизмов; 2 – биовыщелачивание с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью; 3 – контроль (без микроорганизмов)

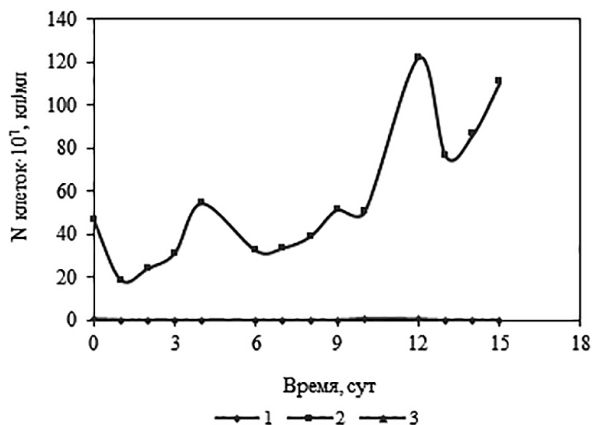


Рис. 4. Изменение концентрации клеток в растворе в процессе выщелачивания: 1 – биовыщелачивание с отмытой от культуральной жидкости суспензией микроорганизмов; 2 – биовыщелачивание с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью; 3 – контроль (без микроорганизмов)

Показано, что бактериально-химическое разложение сульфидной руды в сравнении с абиотическим повышало извлечение никеля, меди и кобальта (рис. 5, табл. 1), позволяя получать растворы с концентрацией Ni 2,8 г/л, Cu 0,11 г/л и Co 0,07 г/л. Как и ожидалось, избирательность растворения прослеживалась в отношении никеля и кобальта, т.е. окислительному воздействию подвергались преимущественно никель- и кобальтсодержащие пирротин и пентландит [24]. Степень извлечения меди была самой низкой, при этом в отсутствие бактерий переход металла в раствор не происходил [25]. Интересным фактом оказалось наибольшее биотическое растворение меди в случае отмытой суспензии бактериальных клеток. Отсутствие планктонных форм бактерий и их активной железоокисляющей активности привело к увеличению концентрации металла в растворе почти на 58 %.

Анализ данных по скоростям выщелачивания металлов (табл. 1) обнаружил факт стадийности (дискретности) в извлечении целевых металлов в биотическом и абиотическом процессах. Данное явление подтверждает электрохимическую природу растворения слагающих руду минералов, ускорение которого обеспечивается каталитическим действием микроорганизмов. Наивысшие скорости выщелачивания по Ni составляли 0,324 г/л·сут для биовыщелачивания с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью, 0,205 г/л·сут для

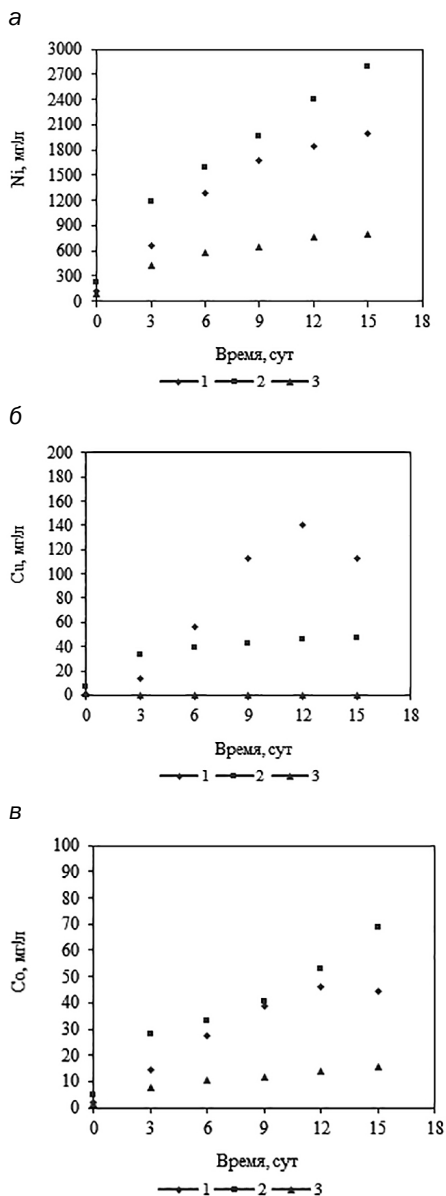


Рис. 5. Изменение концентрации целевых металлов в растворе в процессе выщелачивания: а – Ni^{2+} , б – Cu^{2+} , в – Co^{2+} : 1 – биовыщелачивание с отмытой от культуральной жидкости суспензией микроорганизмов; 2 – биовыщелачивание с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью; 3 – контроль (без микроорганизмов)

биовыщелачивания с отмытой от культуральной жидкости суспензией клеток, 0,111 г/л-сут для абиотического контроля, по Cu, соответственно, – 0,009 г/л-сут, 0,019 г/л-сут, но без учета контроля, в котором отсутствовало выщелачивание металла, по Co – 0,008 г/л-сут, 0,004 г/л-сут и 0,026 г/л-сут.

Таблица 1

Скорость выщелачивания и степень извлечения металлов

Металл	Ni			Cu			Co		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
№ процесса									
Время, сут	Скорость выщелачивания металлов, г/л-сут								
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0,184	0,324	0,111	0,004	0,009	0	0,004	0,008	0,026
6	0,205	0,135	0,053	0,014	0,002	0	0,004	0,002	- 0,023
9	0,133	0,122	0,024	0,019	0,001	0	0,004	0,003	0,001
12	0,052	0,147	0,037	0,009	0,001	0	0,002	0,004	0,001
15	0,053	0,132	0,010	-0,009	0,001	0	0,000	0,005	0,001
Средняя скорость выщелачивания металлов, г/л-сут									
	0,125	0,172	0,047	0,007	0,003	0	0,003	0,004	0,001
Степень извлечения металлов (с учетом промывных вод), %									
	32,86	42,73	12,78	16,24	5,57	0	30,59	47,06	10
<i>Примечание: 1 – биовыщелачивание с отмытой от культуральной жидкости суспензией микроорганизмов; 2 – биовыщелачивание с использованием микроорганизмов с культуральной жидкостью; 3 – контроль (без микроорганизмов).</i>									

Выводы

На основании полученных данных можно заключить следующие основные выводы.

1. Процесс выщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды – совокупность реакций, осуществляющихся по полисульфидному механизму, т.е. за счет совместного воздействия протонов водорода и трехвалентного железа.

2. Биологический компонент, безусловно, обеспечивает извлечение целевых металлов в сравнении с абиотическим процессом, причем для повышения растворения меди достаточным является присутствие неактивной клеточной биомассы микроорганизмов.

3. Ввиду непостоянства и отсутствия экспоненциального роста значений скорости выщелачивания, интенсивность извлечения металлов обнаруживает стадийность данного процесса, обусловленную электрохимической природой растворения слагающих руду минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sand W., Gehrke T., Jozsa P.-G., Schippers A. (Bio)chemistry of bacterial leaching – direct vs. indirect bioleaching // Hydrometallurgy. 2001. V. 59. P. 159–175.
2. Rawlings D. E. Heavy metal mining using microbes // Annual review of microbiology. 2002. V. 56. P. 65–91.
3. Rawlings D. E., Johnson B. D. The microbiology of biomining: development and optimization of mineral-oxidizing microbial consortia // Microbiology. 2007. V. 153. P. 315–324.
4. Каравайко Г. И., Кондратьева Т. Ф. Фундаментальные основы природосберегающей биогидрометаллургической технологии извлечения цветных и благородных металлов технологии из сульфидных руд, концентратов и промпродуктов // Материалы международной конференции «Современные экологические проблемы Севера» (к 100-летию со дня рождения О. И. Семенова-Тянь-Шанского). – Апатиты: изд-во Кольского научного центра РАН, 2006. – Ч. 2. – С. 14–15.
5. Каравайко Г. И., Дубинина Г. А., Кондратьева Т. Ф. Литотрофные микроорганизмы окислительных циклов серы и железа // Микробиология. 2006. Т. 75. № 5. С. 593–629.
6. Рогатых С. В., Докшукина А. А., Хайнасова Т. С., Мурадов С. В., Кофиади И. А. Использование технологии ПЦР в реальном времени для оценки эффективности методов выделения ДНК из культур кислотофильных хемолитотрофных микроорганизмов // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47. № 2. С. 226–230.
7. Трухин Ю. П., Хайнасова Т. С. Исследование кинетики и механизма биовыщелачивания сульфидной Co-Cu-Ni руды в периодическом режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Горная книга. 2011. № 10. С. 111–117.
8. Рогатых С. В., Докшукина А. А., Левенец О. О., Мурадов С. В., Кофиади И. А. Оценка качественного и количественного состава сообществ культивируемых кислотофильных микроорганизмов методами ПЦР-РВ и анализа библиотеки // Микробиология. 2013. Т. 82. № 2. С. 212–217.
9. Левенец О. О., Балыков А. А., Яковишина О. А. Бактериальное выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч в мезофильных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Горная книга. 2013. № 10. С. 89–93.
10. Хайнасова Т. С., Левенец О. О. Бактериально-химическое выщелачивание как экологически безопасный способ переработки сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Разведка и охрана недр (научно-технический журнал). 2015. № 1. С. 49–54.
11. Левенец О. О., Хайнасова Т. С., Балыков А. А., Позолотина Л. А. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды с вариациями питательной среды для хемолитотрофных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – М.: Горная книга. 2015. № 11. С. 291–296.
12. Киореску А. В., Мусихин В. О., Хомченкова А. С., Балыков А. А. Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме //

Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – М.: Горная книга. 2015. – № 11. – С. 360–365.

13. Хайнасова Т. С., Трухин Ю. П. Прикрепление микроорганизмов в ходе биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – М.: Горная книга. 2015. № 11. С. 285–290.

14. Бальков А. А. Разработка технологической схемы бактериально-химического выщелачивания сульфидной руды на основе экспериментальных исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга. 2016. № 11. С. 338–340.

15. Хайнасова Т. С., Левенец О. О., Трухин Ю. П. Применение иммобилизации микроорганизмов в биовыщелачивании // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга. 2016. № 11. С. 235–246.

16. Хайнасова Т. С., Левенец О. О., Бальков А. А. Бактериально-химические процессы переработки руд и их исследование в Камчатском крае // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга. 2016. № 11. С. 223–234.

17. Левенец О. О., Хайнасова Т. С., Позолотина Л. А. Модифицирование питательных сред для микроорганизмов в целях улучшения физико-химических параметров биовыщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга. 2016. № 11. С. 260–271.

18. Хайнасова Т. С., Бальков А. А., Левенец О. О. Исследование иммобилизации микроорганизмов и окисления железа иммобилизованной биомассой клеток // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». – М.: Горная книга. 2016. № 11. С. 247–253.

19. Каравайко Г. И., Росси Дж., Агате А., Грудев С., Авакян З. А. Биоготехнология металлов. Практическое руководство. – М.: центр международных проектов ГКНТ. 1989. 375 с.

20. Third K.A., Cord-Ruwisch R., Watling H. R. The role of iron-oxidizing bacteria in stimulation or inhibition of chalcopyrite bioleaching // Hydrometallurgy. 2000. V.57. P. 325–233.

21. Edwards K. J., Schrenk M. O., Hamers R., Banfield J. F. Microbial oxidation of pyrite: experiments using microorganisms from extreme acidic // American mineralogist. 1998. V. 83. P. 144–145.

22. Cwalina B., Fischer H., Ledakowicz S. Bacterial leaching of nickel and cobalt from pentlandite // Physicochemical problems of mineral processing. 2000. № 34. P. 17–24.

23. Bhatti T. M., Bigham J. M., Carlson L., Tuovinen O. H. Mineral products of pyrrhotite oxidation by Thiobacillus ferrooxidans // Applied and environmental microbiology. 1993. V. 59. № 6. P. 1984–1990.

24. Трухин Ю. П., Хайнасова Т. С. Исследование кинетики и механизма биовыщелачивания сульфидной Co-Cu-Ni руды в периодическом режиме. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Горная книга. 2011. № 10. С. 111–117.

25. Хайнасова Т. С. Биотехнологический потенциал автохтонных хемолитотрофных микроорганизмов медно-никелевого месторождения Шануч (Западная Камчатка) в бактериально-химическом выщелачивании сульфидной кобальт-медно-никелевой руды: автореф. дис. канд. биол. наук: 03.01.06: защищена 17.05.2012 г – Улан-Удэ, 2012. 18 с. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Хайнасова Татьяна Сергеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, khainasova@yandex.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН).

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 322–335.

T. S. Khainasova

SOME ASPECTS OF THE ROLE OF MICROORGANISMS IN THE BIOLEACHING OF SULPHIDE COBALT-COPPER-NICKEL ORE OF THE SHANUCH DEPOSIT

Comparative results of an experiment on the oxidation of sulphide cobalt-copper-nickel ore of the Shanuch deposit (Kamchatka Krai) using inoculum of a bacterial culture and cell biomass which was washed from the culture fluid are presented. The positive effect of the presence of microorganisms in this process on the extraction of nickel, copper and cobalt in comparison with the abiotic process is shown.

Key words: bioleaching, sulphide cobalt-copper-nickel ore, acidophilic chemolithotrophic microorganisms, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-322-335

AUTHOR

Khainasova T. S., Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, khainasova@yandex.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Sand W., Gehrke T., Jozsa P.-G., Schippers A. (*Bio*)chemistry of bacterial leaching – direct vs. indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2001. V. 59. Pp. 159–175.
2. Rawlings D. E. *Heavy metal mining using microbes*. Annual review of microbiology. 2002. V. 56. Pp. 65–91.
3. Rawlings D. E., Johnson B. D. *The microbiology of biomining: development and optimization of mineral-oxidizing microbial consortia*. *Microbiology*. 2007. V. 153. Pp. 315–324.

4. Karavajko G. I., Kondrat'eva T. F. *Fundamental'nye osnovy prirodosbergayushchej biogidrometallurgicheskoy tekhnologii izvlecheniya cvetnyh i blagorodnyh metallov tekhnologii iz sulfidnyh rud, koncentratov i promproduktov* (Fundamental basis of environmental bihydrometallurgical technology of extracting nonferrous and noble metals technology of sulphide ores, concentrates and intermediate products). *Materialy mezhdunarodnoj konferencii «Sovremennye ehkologicheskie problemy Severa» (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya O. I. Semenova-Tyan'-SHanskogo)*. – Apatity: izd-vo Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2006. CH. 2. pp. 14–15.
5. Karavajko G. I., Dubinina G. A., Kondrat'eva T. F. *Mikrobiologiya*. 2006. T. 75. no 5. pp. 593–629.
6. Rogatyh S. V., Dokshukina A. A., Hajnasova T. S., Muradov S. V., Kofiadi I. A. *Prikladnaya biohimiya i mikrobiologiya*. 2011. T. 47. no 2. pp. 226–230.
7. Truhin YU.P., Hajnasova T. S. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2011. no 10. pp. 111–117.
8. Rogatyh S. V., Dokshukina A. A., Levenec O. O., Muradov S. V., Kofiadi I. A. *Mikrobiologiya*. 2013. T. 82. no 2. pp. 212–217.
9. Levenec O. O., Balykov A. A., YAkovichina O. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2013. no 10. pp. 89–93.
10. Hajnasova T. S., Levenec O. O. *Razvedka i ohrana nedr (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2015. no 1. pp. 49–54.
11. Levenec O. O., Hajnasova T. S., Balykov A. A., Pozolotina L. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk no 63 «Kamchatka-2». 2015. no 11. pp. 291–296.
12. Kioresku A. V., Musihin V. O., Homchenkova A. S., Balykov A. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 63 «Kamchatka-2». 2015. no 11. pp. 360–365.
13. Hajnasova T. S., Truhin YU.P. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 63 «Kamchatka-2». 2015. no 11. pp. 285–290.
14. Balykov A. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11. pp. 338–340.
15. Hajnasova T. S., Levenec O. O., Truhin YU.P. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11. pp. 235–246.
16. Hajnasova T. S., Levenec O. O., Balykov A. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11. pp. 223–234.
17. Levenec O. O., Hajnasova T. S., Pozolotina L. A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11. pp. 260–271.
18. Hajnasova T. S., Balykov A. A., Levenec O. O. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. Special'nyj vypusk 31 «Kamchatka-3». 2016. no 11. pp. 247–253.
19. Karavajko G. I., Rossi Dzh., Agate A., Grudev S., Avakyan Z. A. *Biogeotekhnologiya metallov. Prakticheskoe rukovodstvo (Biogeotechnology metals. A practical guide)*. Moscow: centr mezhdunarodnyh proektov GKNT. 1989. 375 p.
20. Third K.A., Cord-Ruwisch R., Watling H. R. *The role of iron-oxidizing bacteria instimulation or inhibition of chalcopyrite bioleaching*. *Hydrometallurgy*. 2000. V.57. P. 325–233.
21. Edwards K. J., Schrenk M. O., Hamers R., Banfield J. F. *Microbial oxidation of pyrite: experiments using microorganisms from extreme acidic*. *American mineralogist*. 1998. V. 83. P. 144–145.
22. Cwalina B., Fischer H., Ledakowicz S. *Bacterial leaching of nickel and cobalt from pentlandite*. *Physicochemical problems of mineral processing*. 2000. no 34. P. 17–24.

23. Bhatti T. M., Bigham J. M., Carlson L., Tuovinen O. H. *Mineral products of pyrrhotite oxidation by Thiobacillus ferrooxidans*. Applied and environmental microbiology. 1993. V. 59. no 6. P. 1984–1990.

24. Truhin YU.P., Hajnasova T. S. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2011. no 10. pp. 111–117.

25. Hajnasova T. S. *Biotekhnologicheskij potencial avtohtonnyh hemolitotrofnyh mikroorganizmov medno-nikelevogo mestorozhdeniya SHanuch (Zapadnaya Kamchatka) v bakterial'no-himicheskom vyshchelachivanii sul'fidnoj kobal't-medno-nikelevoj rudy (Biotechnological potential of autochthonous microorganisms chemolithotrophic copper-Nickel deposits chanoch (West Kamchatka) in bacterial-chemical leaching of sulphide cobalt-copper-Nickel ores): avtoref. dis. kand. biol. nauk: 03.01.06: zashchishchena 17.05.2012. Ulan-Udeh, 2012. 18 p.*



М. Д. Сидоров, В. В. Таскин

ВОКСЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАЗДРОБЛЕННОСТИ КОРЫ В РАЙОНАХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (КАМЧАТКА)

Представлена модель объемного изображения раздробленности разломами земной коры для района охватывающего геотермальные месторождения вблизи Петропавловска-Камчатского. Модель создана по материалам дешифрирования аэро- и космоснимков. Проведено ее сопоставление с известными проявлениями термоминеральных вод. Модель показывает положение современных и древних проницаемых зон, узлов. Воксельное представление проницаемых участков может быть использовано для прогноза месторождений связанных с миграцией глубинных флюидов.

Ключевые слова: дешифрирование, линеамент, модель, воксель, разлом.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-336-341

Участки и зоны повышенной раздробленности коры образованные служат путями для тепломаппереноса из глубинных горизонтов к поверхности. Исследовать раздробленность и дать количественную оценку можно используя данные дистанционных методов, например космическую и аэро видеоинформацию [1, 3]. Результаты исследования представляются в виде трехмерной матрицы, в узлах которой приведена количественная оценка раздробленности геологической среды. Таким показателем может служить значение удельной длины линеаментов разломов (УДЛ), дешифрированных по аэро и космоснимкам. Для визуализации создается трехмерная матрица объемного изображения (Voxel). Воксельный массив позволяет получать кроме объемного изображения (рис. 1) произвольные горизонтальные и вертикальные сечения, выделять изоповерхности.

Такая воксельная модель построена до глубины –3 км для района месторождений термоминеральных вод – Паратунского, Кеткинского и Налычевского.

Методика построения модели. Модель раздробленности получена в результате геостатистической обработки результатов дешифрирования снимков поверхности земли, на которых выделены линеа-

менты, отождествленные с трещинами разломов [3]. Эмпирически установлено, что трещиноватость одной грани кубика горной породы адекватно отражает степень трещиноватости всего образца [1, 3]. Деформации макроскопического уровня любого объема земной коры могут быть представлены как сумма деформаций многочисленных элементарных объемов (Гзовский, 1975, [2]).

В общем случае коэффициент тектонической раздробленности блока определяется отношением объема трещин в блоке к его объему. Если выделить в исследуемой части земной коры кубические блоки со стороной a , в которых одной из граней является дневная поверхность, то степень раздробленности каждой кубической ячейки будет равна $\Sigma l \cdot b \cdot h / a^3$, где l – длина, b – ширина раскрытия, h – глубина трещин. Ширина и глубина трещин не являются определяемыми по снимкам. Параметр b может быть принят как усредненная величина для некоторой конкретной территории, а значение h приравнено к a . При таких условиях переменными для оценки уровня дизъюнктивности ячейки остаются общая длина трещин в пределах его верхней (совпадающей с дневной поверхностью) грани и длина ребра a . Степенью раздробленности будет значение удельной длины линеаментов (УДЛ) $\Sigma l / a^2$. Для среды с однородными реологическими свойствами значение УДЛ относится к центру ячейки [1, 3].

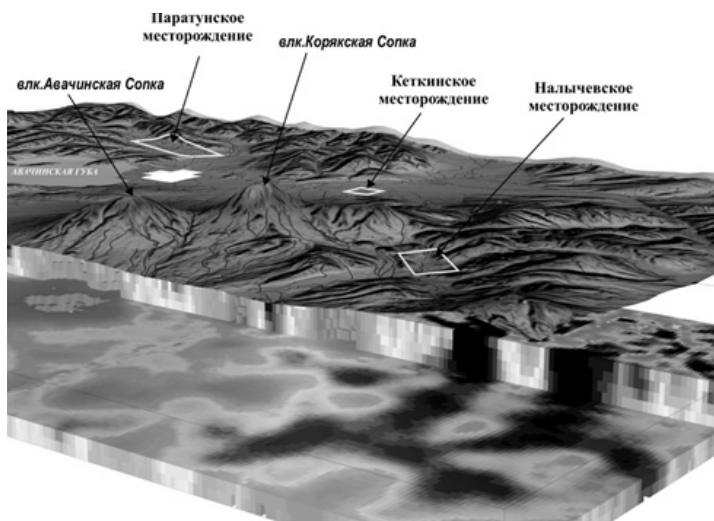


Рис. 1. Воксельная (объемная) модель тектонической раздробленности. Ячейка 0,5x0,5x0,5 км. Вид с северо-востока. Поверхность рельефа поднята на 5 км. Желтым контуром показаны районы месторождений. Шкала интенсивности на рис. 2

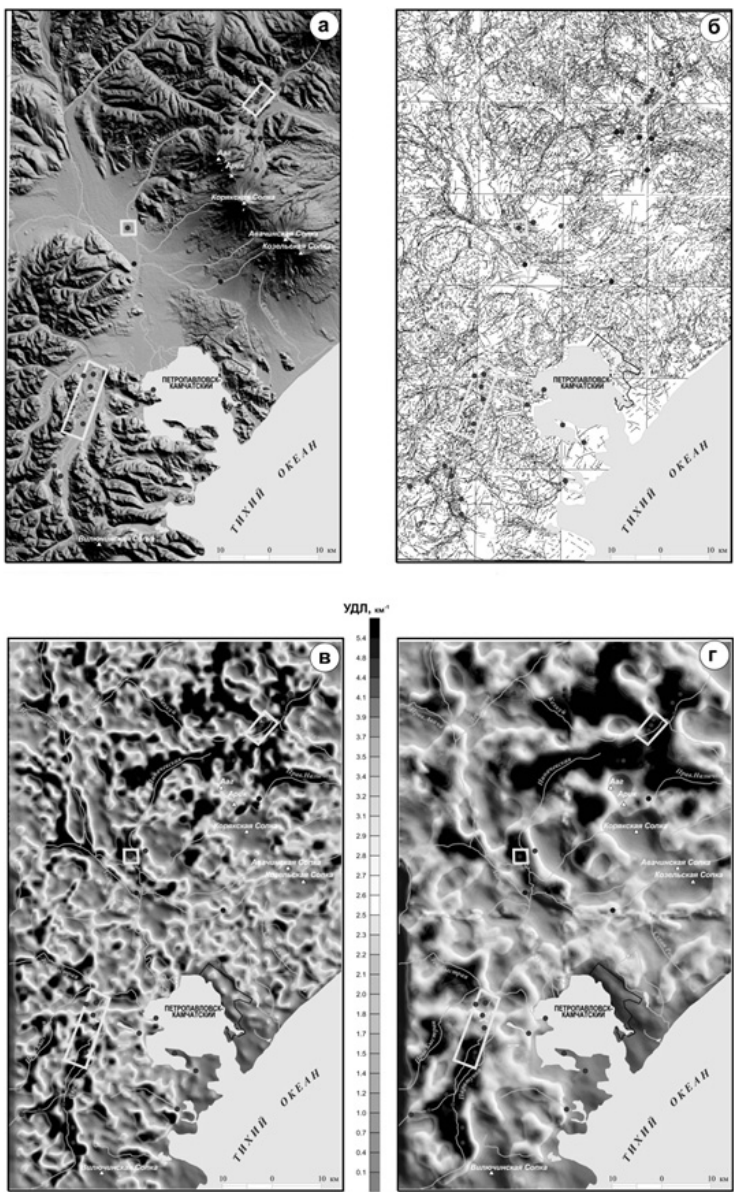


Рис. 2. Схема района исследований (а), карта линейментной сети (б) дешифрирования аэро- и космоснимков (по В. А. Соколку), (Ворожейкина, Скоробогатко, Соколов, 1995, [6]), срезы модели на глубине 500 м (в) и 2000 м (г) ниже уровня моря. Проявления подземных вод: красным цветом показаны термоминеральные, синим холодные

Данные для создания модели получены из карт и схем трещинной тектоники составленные по результатам дешифрирования аэрокосмоснимков различной детальности способом масштабного приближения от регионального уровня к локальному в рамках опытно-методических работ 1989–1995 гг. [6]. Сначала была создана цифровая карта линеаментной сети (рис. 2, б). Затем на исследуемую площадь наложена квадратная сетка с размером ячейки 1 км², в пределах каждой клетки подсчитана суммарная длина линеаментов и нормирована к ее площади. Полученные значения отнесены к центрам кубов с ребром 1 км, одной из граней которых является земная поверхность, ограниченная ячейкой. В результате была составлена матрица распределения УДЛ для глубины 0,5 км. За нулевую отметку принят уровень моря. Далее в каждом последующем цикле расчетов сторона ячейки увеличивалась на 0,2 км. Была построена трехмерная матрица раздробленности на глубину от 0,5 до 3 км для визуализации объемного изображения (Voxel). Цифровая обработка проведена с помощью программ ArcGIS и Oasis montaj. Методика расчетов описана в публикациях [4, 5].

Характеристика модели. Сопоставление модели с известными проявлениями термоминеральных вод (рис. 2) показывает, что почти все они расположены на участках с аномальной трещиноватостью (серая и черная зоны).

Наиболее раздробленные и проницаемые участки расположены в бассейнах рек Паратунка, Карымшина, Правая и Левая Быстрая, Авача, Пиначевская, Налычева, Корякская и Вахталка.

Аномальной трещиноватостью в модели отмечен район у юго-западного подножия вулканов, где ею образованы две линейные зоны северо-западного простирания. Это хорошо проявляется с глубиной (рис. 2, г). Возможно, что эти зоны показывают края Авачинского грабена, выделяемого многими исследователями в этом месте. В одной из них расположено Кеткинское месторождение.

Налычевское месторождение приурочено к обширному узлу аномально высокой трещиноватости на водоразделе рек Правая и Левая Налычева, Пиначева, Кехкуй. В этом районе отмечается наибольшие значения УДЛ.

Паратунское месторождение находится в зоне северо-восточного простирания, трещиноватость в которой заметно увеличивается к юго-западу. Зона в верхних горизонтах расщепляется, конформна в плане с долинами рек Паратунки и Карымшиной (рис. 2, в, г).

Низкими значениями раздробленности охарактеризовались привершинные части действующих вулканов Корякский и Авачинский.

Надо отметить, что термоминеральными источниками характеризуют только «открытую» трещиноватость. Но в модели также представлены трещины разломов «залеченные» после их возникновения (например, кварц-карбонатными жилами, дайками). Фактически модель показывает положение как современных, так и древних проницаемых зон и узлов, что подтверждается при сопоставлении их с известными рудопроявлениями и участками гидротермального метаморфизма горных пород.

Заключение

Таким образом, воксельная модель может служить инструментом для прогноза и поиска как термоминеральных, так и рудных месторождений, генезис которых связан с активностью глубинных флюидов. Вероятно, будет полезно комплексирование ее с подобными моделями, полученными другими дистанционными методами (геофизическими).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатилов О. А., Нечаев Ю. В., Собисевич А. Л. Использование космических технологий для мониторинга геологических структур вулкана Эльбрус // ДАН. – 2002. – Т. 387. – № 3. – С. 1-6.
2. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. – М.:Наука, 1975. – 535 с.
3. Нечаев Ю. В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с.
4. Таскин В. В., Сидоров М. Д. Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеоинформации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 243-252
5. Таскин В. В., Сидоров М. Д. Алгоритм создания трехмерной модели тектонической раздробленности в среде гис по результатам дешифрирования аэро – и космоснимков, оценка ее достоверности // Геоинформатика, 2015, №1, с.21-27
6. Ворожейкина Л. А., Скоробогатко Л. С., Соколов В. А. Отчет об опытно-методических работах по применению геологоструктурных, гидрогеологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях. Петропавловск-Камчатский. 1995 г. 6,7 прил. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Сидоров Михаил Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, smd52@mail.ru,
Таскин Виталий Витальевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, taskin-v@yandex.ru,
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии наук.

M. D. Sidorov, V. V. Taskin

VOXEL MODEL OF THE FRAGMENTATION OF THE CRUST IN AREAS OF THE GEOTHERMAL FIELD (KAMCHATKA)

A model of the volumetric image of fracture by faults of the earth's crust for a region encompassing geothermal deposits near Petropavlovsk-Kamchatsky is presented. The model is based on the interpretation of aerospace and aerial photographs. Its comparison with known manifestations of thermomineral waters is carried out. The model shows the position of modern and ancient permeable zones, nodes. The voxel representation of permeable areas can be used to predict deposits associated with the migration of deep fluids.

Key words: deciphering, lineament, model, voxel, fault.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-336-341

AUTHORS

Sidorov M. D., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, smd52@mail.ru,

Taskin V. V., Candidate of Technical Sciences; Senior Researcher Scientist, taskinv@yandex.ru,

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Bogatikov O. A., Nechaev Yu.V., Sobisevich A. L. *Doklady Akademii nauk*. 2002, vol. 387, no 3, pp. 1-6.
2. Gzovskiy M. V. *Osnovy tektonofiziki* (Basics of tectonophysics), Moscow: Nauka, 1975, 535 p.
3. Nechaev Yu.V. *Lineamenty i tektonicheskaya razdroblennost'. Distantionnoe izuchenie vnutrennego stroeniya litosfery* (Lineaments and tectonic subdivision. Remote sensing of internal structure of lithosphere), Moscow, IFZ RAN, 2010, 215 p.
4. Taskin V. V., Sidorov M. D. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, vol. 11, no 2, pp. 243-252.
5. Taskin V. V., Sidorov M. D. *Geoinformatika*. 2015, no 1, pp. 21-27.
6. Vorozheikina L. A., Skorobogatsko L. S., Sokolkov V. A. *Otchet ob opytno-metodicheskikh rabotakh po primeneniyu geologostrukturnykh, gidrogeologicheskikh, geofizicheskikh i distantsionnykh kriteriev poiska termal'nykh vod na zakrytykh ploshchadyakh* (Report on field trials of application of geological-structural, hydrogeological, geophysical and remote sensing criteria to thermal water search in subsurface), Petropavlovsk-Kamchatsky, 1995.



В. А. Горбач, Л. А. Позолотина

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ САМОИЗЛИВАЮЩЕЙСЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ ГК-1 (ПИНАЧЕВО, КАМЧАТКА)

Режимные наблюдения на скважине ГК-1 и Пиначевских источниках проводятся для сбора данных о проявлении среднесрочных сейсмологических, геодезических и гидрогеологических предвестников сильных землетрясений Камчатки. В статье представлены результаты гидрохимического исследования состава термальной воды скважины и оценена кратность превышения предельно допустимых концентраций ПДК_{рх} в изливающихся на рельеф водах по отдельным компонентам.

Ключевые слова: геотермальный раствор, химические соединения, загрязнение окружающей среды.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-342-346

Наблюдательная скважина ГК-1 находится в районе Пиначевских источников, в верховьях ручья Светлый ключ притока р. Пиначевой, в 35 км от г. Петропавловска-Камчатского у южной границы большого массива возвышенностей андезито-дацитов плиоценового возраста, составляющих предгорья Пиначевского хребта (высота 202.0). Разгрузка гидротерм происходит в зоне влияния Петропавловского глубинного разлома. Вдоль южных и восточных склонов высоты наблюдается интенсивная разгрузка холодных пресных вод. Очаги разгрузки термальных вод представляют собой восходящие источники. [1]. Наблюдение проводится КФ ГС РАН [2]. Комплекс наблюдений включает в себя: замер температуры воздуха и атмосферного давления, измерение расхода и температуры воды, отбор водных и газовых проб. В пробах воды, в лабораторных условиях определяется pH, концентрации основных макрокомпонентов и кислот, концентрации растворённых в воде газов. Результаты наблюдений используются для выявления, систематизации, обобщения данных о проявлении среднесрочных сейсмологических, геодезических и гидрогеологических предвестников сильных землетрясений Камчатки на

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 32). С. 342–346.

© В. А. Горбач, Л. А. Позолотина, 2017.

основе современных теоретических моделей процессов подготовки землетрясений. Режимные наблюдения на скважине и источниках проводятся с 1977 г. Скважина ГК-1 имеет глубину 1261 м, температуру воды на самоизливе – 16,5 °С, дебит скважины – 0,09 л/с.

В табл. 1 представлены результаты гидрохимического исследования состава термальной воды скважины самоизливающейся на рельеф поймы ручья Светлый ключ, выполненного в 2015 г. Анализ вод выполнен масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой (МС) и атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (АЭ). На основе гидрохимической оценки состава вод, показана кратность превышения предельно допустимых концентраций установленных для водоемов рыбохозяйственного значения в изливающихся водах по отдельным компонентам (табл. 2).

Таблица 1

Химический состав воды наблюдательной скважина ГК-1 (Пиначево, Камчатка).

Компонент	Символ	Содержание, мг/л	Компонент	Символ	Содержание, мг/л
pH		7,48	Ниобий	Nb	0,000015
Ионы аммония	NH ₄ ⁺	0,139	Молибден	Mo	0,0015
Фториды	F ⁻	0,11	Рутений	Ru	<0,2
Хлориды	Cl ⁻	5886	Родий	Rh	<1,5
Гидрокарбонат-ионы	HCO ₃ ⁻	175	Палладий	Pd	<0,01
Сульфат-ионы	SO ₄ ²⁻	<0,1	Серебро	Ag	<0,00002
Нитрит-ионы	NO ₂ ⁻	<0,05	Кадмий	Cd	0,00021
Нитрат-ионы	NO ₃ ⁻	8,41	Индий	In	<0,000003
Фосфат-ионы	PO ₄ ³⁻	7,39	Олово	Sn	<0,0001
Борная кислота	H ₃ BO ₃	69,1	Сурьма	Sb	0,0012
Кремниевая кислота	H ₄ SiO ₄	78,2	Теллур	Te	0,00023
Литий	Li	0,81	Цезий	Sc	0,0008
Бериллий	Be	<0,00002	Барий	Ba	8,7
Бор	B	7,7	Лантан	La	0,000089
Натрий	Na	680	Церий	Ce	<0,00001
Магний	Mg	40	Празеодим	Pr	<0,000003
Алюминий	Al	<0,005	Неодим	Nd	<0,000006
Кремний	Si	18	Самарий	Sm	0,000037
Фосфор общий	P _{общ.}	<0,02	Европий	Eu	0,00098
Сера общая	S _{общ.}	9,8	Гадолиний	Gd	<0,000006
Калий	K	110	Тербий	Tb	<0,000002
Кальций	Ca	790	Диспрозий	Dy	<0,000004
Скандий	Sc	<0,004	Гольмий	Ho	<0,000002

Окончание табл. 1

Компонент	Символ	Содержание, мг/л	Компонент	Символ	Содержание, мг/л
Титан	Ti	0,0015	Эрбий	Er	<0,000002
Ванадий	V	0,0065	Тулий	Tm	0,0000094
Хром	Cr	<0,00002	Иттербий	Yb	0,00019
Марганец	Mn	0,97	Лютеций	Lu	0,000076
Железо	Fe	0,2	Гафний	Hf	<0,000003
Кобальт	Co	0,0008	Тантал	Ta	<0,00002
Никель	Ni	0,0093	Вольфрам	W	0,00025
Медь	Cu	0,0027	Рений	Re	<0,000002
Цинк	Zn	0,0048	Осмий	Os	<0,0002
Галлий	Ga	<0,00002	Иридий	Ir	<0,000003
Германий	Ge	0,00086	Платина	Pt	<0,000004
Мышьяк	As	0,026	Золото	Au	0,00012
Бром	Br	11	Таллий	Tl	<0,000003
Селен	Se	0,019	Свинец	Pb	0,00012
Рубидий	Rb	0,0047	Висмут	Bi	<0,000007
Стронций	Sr	67	Торий	Th	<0,000007
Иттрий	Y	0,00043	Уран	U	<0,000006
Цирконий	Zr	<0,00001	-	-	-

Таблица 2

Кратность превышения содержания некоторых компонентов в воде наблюдательной скважины ГК-1 относительно предельно допустимых концентраций установленных для водоемов рыбохозяйственного значения

Компонент	Символ	Кратность превышения	ЛПВ
Калий	K	2,2	сан-токс.
Натрий	Na	5,6	сан-токс.
Кальций	Ca	4,4	сан-токс.
Железо	Fe	2	токс.
Ванадий	V	6,5	токс.
Марганец	Mn	97	сан-токс.
Селен	Se	9,5	токс.
Стронций	Sr	168	токс.
Барий	Ba	11,7	токс.

Выводы

В геотермальных растворах присутствуют химические соединения, которые при высоких температурах и давлении выщелачиваются из пород месторождений и выносятся на поверхность, сбрасываются на рельеф, а затем поступают в водотоки. В гидротермальный раствор входят соединения элементов в концентрациях, значительно превышающих ПДКрх [3, 4].

В результате гидрохимической оценки состава воды наблюдательной скважины ГК-1 (Пиначево, Камчатка) установлено, что содержание отдельных компонентов в составе вод превышает ПДК вредных веществ, установленных для вод водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}). В пробе воды содержание марганца превышает ПДК_{рх} в 97 раз, содержание стронция превышает ПДК_{рх} в 168 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляк Б. Г., Вакин Е. А., Овчинников Е. Н. Гидрогеохимические условия вулканического района Камчатки. М.: Наука, 1965. 96 с.

2. Копылова Г. Н. Анализ влияния сейсмичности на режим Пиначевских термопроявлений на Камчатке (по результатам наблюдений в 1979–1988 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 3–18.

3. Горбач В. А. Проблемы утилизации отработанных геотермальных растворов. Георесурсы. 2014. №3(58). С. 44-48. **ГИАБ**

4. Приказ № 552 от 13 декабря 2016 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Горбач Владимир Александрович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, gorvov@mail.ru,

Позолотина Лилия Андреевна – аспирант, младший научный сотрудник, rozolotina@mail.ru,

Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 342–346.

V. A. Gorbach, L.A. Pozolotina

HYDROCHEMICAL DATA OF SELF-FLOWING OBSERVING GEOTHERMAL WELL GK-1 (PINACHEVO, KAMCHATKA)

The observations regime at the well GK-1 and Pinachevo springs are conducted to collect data on the manifestation of medium-term seismological, geodesic and hydrogeological premonitory

symptoms of strong earthquakes in Kamchatka. The article presents the results of hydrochemical study of the thermal water composition of the well and the multiplicity of the exceedance of maximum permissible concentrations in the outflowing waters of individual components is estimated.

Key words: geothermal solution, chemical compounds, environmental pollution.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-342-346

AUTHORS

Gorbach V. A., Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Science, e-mail: gorvov@mail.ru,

Pozolotina L.A., Postgraduate, junior research scientist, e-mail: nigto@kscnet.ru.

Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Polyak B. G., Vakin Ye. A., Ovchinnikov Ye. N. *Gidrogeokhimiicheskiye usloviya vulkanicheskogo rayona Kamchatki* (Hydrogeochemical conditions of the volcanic area of Kamchatka). Moscow: Nauka, 1965. 96 p.

2. Kopylova G. N. *Vulkanologiya i seysmologiya*. 1992. no 2. pp. 3–18.

3. Gorbach V. A. *Georesursy*. 2014. no 3(58). pp. 44-48

4. *Prikaz № 552 ot 13 dekabrya 2016 «Ob utverzhenii normativov kachestva vody vodnyh ob'ektov rybohozjajstvennogo znachenija, v tom chisle normativov pre-del'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshhestv v vodah vodnyh ob'ektov rybohozjajstvennogo znachenija»* (Order No. 552 of 13 December 2016 «On approval of standards of water quality of water bodies of fishery significance, including maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water objects of fishery»).



А. Г. Нурмухамедов

БАННЫЕ И КАРЫМЧИНСКИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ – ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ НА ЮГЕ КАМЧАТКИ

Изложены результаты исследований, проведенных в 60-ые годы XX столетия в районе Банных и Карымчинских высокотемпературных источников, а также исследований земной коры и верхней мантии геофизическими методами на юге Камчатки в последние десятилетия. На основе анализа комплекса геолого-геофизических данных показано, что энергетический потенциал Больше-Банного месторождения перегретых вод – пароводяной смеси (ПВС) – недооценен. С целью доизучения, а затем и вовлечения в энергетический баланс региона месторождения ПВС и его флангов предлагается реализовать глубинные исследования, с использованием современных геофизических технологий.

Ключевые слова: Толмачевский интрузивный массив, Больше-Банное месторождение, магматический очаг, Мохо

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-347-367

Введение

На Камчатке уже давно активно эксплуатируются известные месторождения термальных вод с целью теплоснабжения небольших населенных пунктов и организации тепличных хозяйств. В шестидесятых годах прошлого столетия на юго-западе полуострова построена Паужетская геотермальная электростанция (ГеоЭС) мощностью 12 МВт – старейшая на территории России, у северных склонов Мутновского вулкана в 2000 г. введена в эксплуатацию Мутновская ГеоЭС-1 мощностью 50 МВт, в этом же районе успешно эксплуатируется Верхне-Мутновская ГеоЭС – 12 МВт.

Есть и другие участки на полуострове, где наблюдается активная гидротермальная деятельность, представляющая большой интерес с точки зрения использования гидротерм в энергетическом балансе региона. И среди них, расположенные на юге Камчатки, в верховьях р. Банной – Малые Банные и Больше-Банные высокотемпературные источники, находящиеся в 65 км к западу от г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1). К югу от них, в долине р. Правой Карымчины, расположены Карымчинские термальные источники.

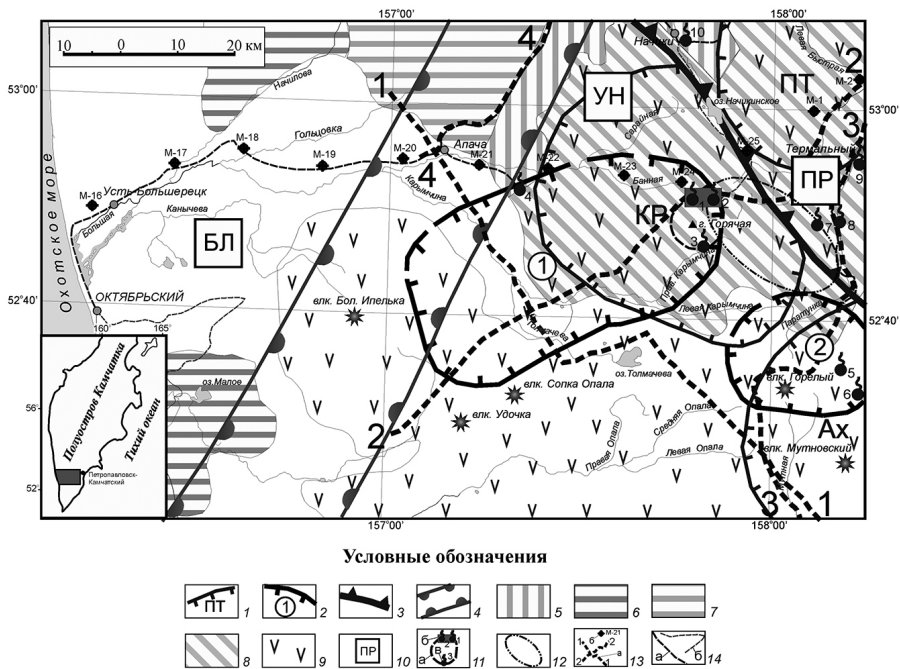


Рис. 1 Фрагмент Тектонической схемы Корьякско-Камчатской складчатой области⁸. Условные обозначения: 1 – вулcano-тектонические структуры и их обозначения (КР – Карымшинская, ПТ – Плотниковская, Ах – Ахомтенская); 2 – границы аномально-низкоомных зон, выделенных в земной коре (1 – зона плавления и частичного плавления – Толмачевский активный магматический центр, 2 – зона частичного плавления в районе вулканов Горелый, Мутновская сопка, Вилучинский); 3 – фрагмент юго-западной границы Крутогоровско-Петропавловской зоны поперечных дислокаций; 4 – Центрально-Камчатская глубинная шовная зона; 5 – Восточно-Камчатская подзона Олюторско-Восточно-Камчатской складчатой зоны; 6 – Западно-Камчатский наложенный прогиб; 7 – Корьякско-Западно-Камчатская складчатая зона; 8 – Курило-Южно-Камчатская островодужная вулканическая зона; 9 – Южно-Камчатский вулканический пояс; 10 – обозначение структур: БЛ – Большерецкое поднятие, УН – Ункановичский горст, ПР – прибрежный горст; 11 – примерные контуры палеовулкана сопки Горячей (а), район Банных термальных источников (б), гидротермальные источники и месторождения гидротерм (в): 1 – Малые Банные, 2 – Больше-Банные, 3 – Карымчинские, 4 – Апачинские, 5 – Верхне-Жировые, 6 – Скалистые, 7 – Карымшинские, 8 – Верхне-Паратунские, 9 – Средне-Паратунские, 10 – Начикинские; 12 – кальдера Карымшина [10]; 13 – а) фрагменты региональных геофизических профилей МОВЗ-МТЗ и их названия: 1-1 – п. Апача – бух. Мутная, 2-2 – г. Опала – р. Вахиль, 3-3 – бух. Ходутка – с. Николаевка, 4-4 – п. Апача – п. Крапивная; б) точки МТЗ и их номера на профиле п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский; 14 – капитальные (а) и грунтовые (б) дороги

Особый интерес у исследователей вызывают Больше-Баннные источники, в которых температура воды у дневной поверхности местами превышает 100°C . В шестидесятые годы здесь планировалось строительство геотермальной электростанции мощностью не менее 15 МВт. В настоящее время есть потенциальные потребители электроэнергии. Так, сравнительно недалеко от Больше-Баннных источников открыто золото-серебряное месторождение Порожистое, а непосредственно в районе гидротерм – ряд перспективных проявлений Карымшинского рудного узла того же содержания (рис. 2). Уже проводятся геологоразведочные работы по доизучению Порожистого месторождения и реализуется комплекс поисково-разведочных работ на объектах рудного узла. Кроме этого, на территории, примыкающей к термальным источникам, расположены месторождения нерудных полезных ископаемых – перлита, обсидиана, пегматитов, минеральных красок и др., которые также ждут своего освоения. Ко всему, район характеризуется наличием многочисленных проявлений гидротерм,

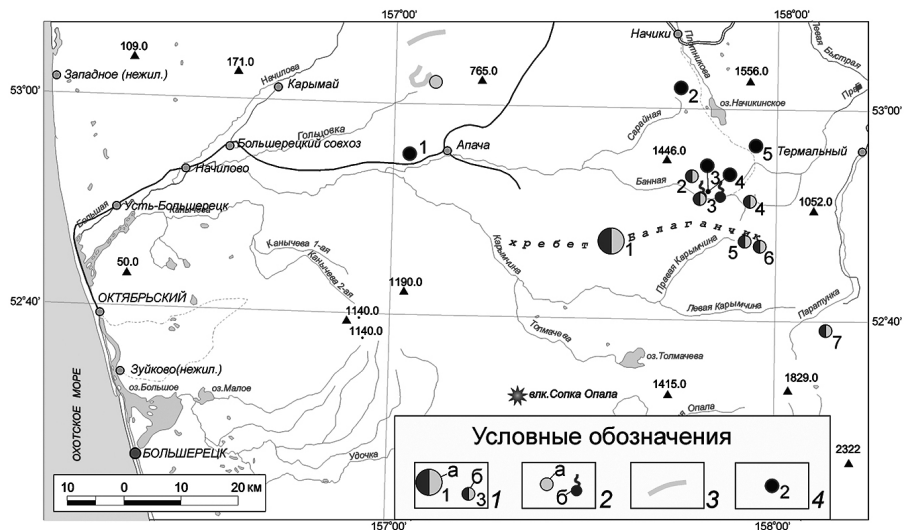


Рис. 2. Месторождения и проявления полезных ископаемых в районе Баннных гидротерм и их ближайшего окружения. Условные обозначения: 1 – месторождение (а) и проявления (б) золото-серебряной формации: 1 – Порожистое, 2 – Ягодка, 3 – Банное, 4 – Верхне-Быстринское, Малыш, 5 – Геофизическое, 6 – Карымшинское, 7 – Рогатка, Быстринское; 2 – Гольцовское рудопоявление золота (а), Баннные источники гидротерм (б); 3 – проявления россыпного золота; 4 – иные нерудные полезные ископаемые: 1 – Апачинское месторождение песчано-гравийной смеси, 2 – Начикинское месторождение обсидиана и перлита, 3 и 4 – Ягоднинские месторождения туфов вулканических и цеолитов, 5 – Начикинское месторождение минеральных красок

и уникальных природных объектов, что весьма благоприятно для развития туризма. К северу от Банных источников расположен п. Начики, где в настоящее время восстанавливается бальнеологический санаторий на термоминеральных водах.

Вовлечение Больше-Банного месторождения перегретых вод, а, возможно, и других месторождений пароводяной смеси (ПВС) в энергетический баланс района способствовало бы развитию горнопромышленного комплекса Южной Камчатки и освоению его рекреационных ресурсов.

Краткий обзор исследований, ранее выполненных в районе термальных источников

Ещё с начала XVIII века Банные гидротермы привлекали к себе внимание исследователей. История изучения источников достаточно полно представлена в ряде публикаций [7, 9, 10, 20 и др.]. Отметим лишь, что в 1737-1740 гг. впервые подробно описал источники выдающийся исследователь Камчатки С. П. Крашенинников. В XX веке детальные исследования провели П. Т. Новограбленов (1924) и Б. И. Пийп (1934). В 1952 г. в районе рр. Банная, Карымчина и Паратунка под руководством В. П. Мокроусова проведена комплексная геолого-гидрогеологическая съемка м-ба 1:500 000, а в 1959 г. исследуемая площадь покрыта геологической съемкой м-ба 1:200 000. В результате впервые была разработана строгая стратиграфическая схема (Бондаренко В. Н., 1960).

В 1960 г. сотрудниками Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР (начальник отряда Е. А. Вакин) было высказано предположение о большой перспективности использования Больше-Банного месторождения ПВС в качестве источника энергии на юге Камчатки. Позднее вопросами гидротермального метаморфизма и структурной локализации месторождения занимались сотрудники Института вулканологии: Ю. П. Трухин, Э. Н. Эрлих, В. В. Петрова. Результаты работ отражены в научном отчете¹ и статье [21].

Но наиболее детальное изучение Больше-Банного месторождения проводилось Камчатским территориальным геологическим управлением (КТГУ) в 1961–1969 гг. В работе принимал участие большой коллектив гидрогеологов, геофизиков, геологов: Г. Д. Гинсбург, В. Я. Коваленко, А. Д. Евтухов, Ц. Э. Ахиезер, Ю. А. Краевой, В. Г. Охапкин, А. И. Сережников, И. И. Зальцманович и многие другие. Результаты работ

¹ Трухин Ю.П., Эрлих Э.Н., Петрова В.В. Окончательный отчет по теме: «Гидротермальный метаморфизм и вопросы структурной локализации Больше-Банного и Паратунского месторождений гидротерм». Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии СО АН СССР, 1969. 358 с.

отражены в ряде производственных отчетов^{2,3,4,5} и публикаций [8, 9]. Целью работ являлось определение эксплуатационных запасов перегретых вод для строительства геотермальной электростанции или создания большого тепличного хозяйства. Был реализован широкий комплекс исследований, в том числе выполнены геологическая и гидрогеологическая съемки (м-бы 1:100 000 и 1:25 000), наземные геофизические работы, которые начиная с 1961 г. на исследуемой территории проводились впервые. Общие контуры участка геофизических работ 1961-1965 гг. представлены на рис. 3.

В процессе работ была выявлена четкая зависимость уровня удельного сопротивления вмещающих пород от температуры вод, циркулирующих в них. В отчете Коваленко В. Я. и др. (1968)⁵ показано, что увеличение температуры от 50 °С до 160-170 °С приводит к аномальному понижению сопротивления среды с 200 Ом·м до 10 Ом·м. Таким образом, выявление аномально низкоомных зон являлось одним из основных критериев обнаружения и оконтуривания зон с перегретыми водами.

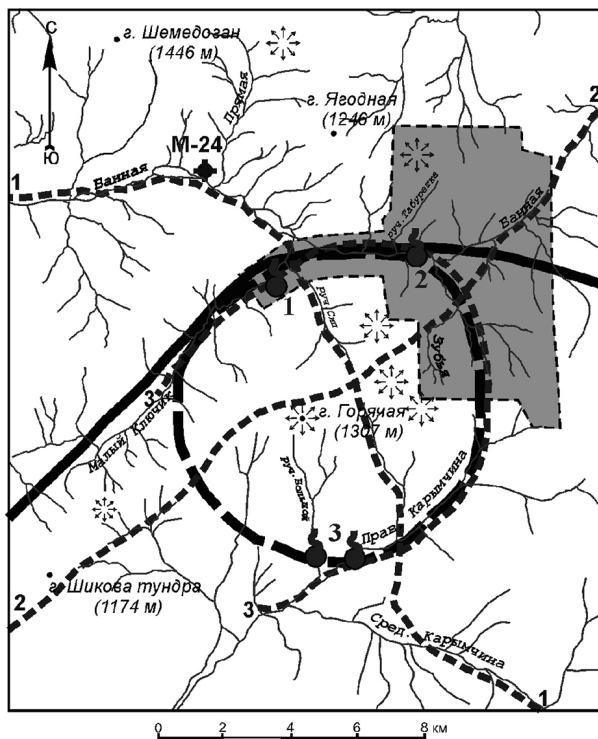
Всего на площади порядка 2 кв. км, вытянутой вдоль р. Банной, было пробурено 44 скважины общим метражом более 23 тыс. пог. м. Доминирующая глубина проходки 500-600 м. Судя по созданным картам распределения температур на различных глубинных срезах, максимальные температуры (165-170 °С) отмечены на глубинах 0-200 м в скважинах, расположенных к югу от р. Банной, где наблюдается концентрация выходов гидротерм на дневную поверхность. По состоянию на 01.08.1970 г. верхняя граница перегретых вод отмечена в интервале глубин 390-450 м [9]. Учитывая, что абсолютные отметки высот в районе месторождения находятся на отметках 420-450 м, становится ясным, что перегретые воды залегают близко от дневной поверхности.

² Гинсбург Г.Д., Диланян В.Е., Зальцманович И.И., Миндлин В.Я. Отчет о работе Больше-Банной гидрогеологической партии в 1961 году (том 1). Петропавловск-Камчатский: КрайГРУ, 1962. 172 с.

³ Коваленко В.Я., Зальцманович И.И. Промежуточный отчет о результатах буровых и геофизических работ на больше-Банном месторождении термальных вод в 1962 году. Петропавловск-Камчатский: КрайГРУ, 1963. 106 с.

⁴ Соловьев В.К. Отчет о работе Больше-Банного геофизического отряда за 1965 год. Елизово: Геофизическая экспедиция КГУ, 1966. 80 с.

⁵ Коваленко В.Я., Евтухов А.Д., Спиченкова М.В. и др. Отчет о поисково-разведочных и разведочных работах на Больше-Банном месторождении перегретых вод на полуострове Камчатка за 1962-1968 гг. Том I. (подсчет запасов на 1 декабря 1968 г.). Петропавловск-Камчатский: Южно-Камчатская геологоразведочная экспедиция КГУ, 1968. 378 с.



Условные обозначения

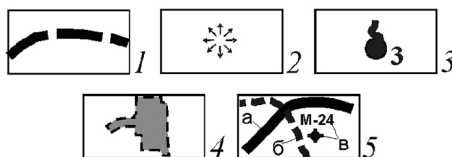


Рис. 3 Обзорная схема района Банная и Карымчинских гидротерм и их флангов. Условные обозначения: 1 – примерные границы палеовулкана сопки Горячей; 2 – эндогенные вулканические купола; 3 – источники гидротерм: 1 – Малые Банные, 2 – Больше-Банные, 3 – Карымчинские; 4 – контуры площади геофизических работ 1961–1965 гг.; 5 – геофизические профили: фрагмент регионального профиля МОВЗ-МТЗ г. Опаля – р. Вахиль (а); профили МТЗ, рекомендуемые к отработке (б); точка МТЗ на геофизическом профиле п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский и её номер [15]

В этот же период времени (1961–1969 гг.) в районе Карымчинских термальных источников проведен комплекс гидрогеологических съемок и специальных аэрофотогеологических исследований [9].

Здесь, по сравнению с Больше-Банными источниками, гидротермальная деятельность проявлена незначительно. Возможно, этот фактор послужил одной из причин по которой геофизические работы в этом районе не проводились.

Комплекс геолого-гидрогеологических данных показывает, что по своим характеристикам Больше-Банное месторождение относится к месторождению трещинно-жильного типа. В целом же Банная и Карымчинская гидротермальные системы приурочены к Верхнекарымчинской зоне верхнемиоцен-плиоценового вулканизма, где «... отчетливо намечается пространственная ассоциация проявлений кислого вулканизма и современной гидротермальной деятельности» [9].

В 1968 г. проведен подсчет балансовых эксплуатационных запасов Больше-Банного месторождения ПВС по категориям *B* (156.3 кг/с), *C₁* (104.7 кг/с) и *C₂* (139.0 кг/с). Результаты подсчетов были представлены на рассмотрение Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ). Предполагалось⁵, что при таких запасах ПВС возможно строительство геотермальной электростанции (ГеоЭС) мощностью не менее 15 МВт. Но после оценки месторождения Экспертной комиссией, ГКЗ⁶ принимает решение исключить из авторского подсчета запасы по категориям *C₁*, *C₂* как необоснованные, а запасы по категории *B* перевести в группу *забалансовых*.

Казалось, на этом можно было бы поставить точку в деле освоения Больше-Банного месторождения ПВС, но материалы региональных геофизических работ говорят о том, что энергетический потенциал Банной и Карымчинской гидротермальных систем *недооценен*. Месторождение по-прежнему можно относить к разряду перспективных. Положительный опыт постановки комплекса геофизических методов, который был реализован с целью доизучения Мутновского месторождения ПГТ с использованием современных технологий, подтверждает это [16].

Анализ результатов региональных геофизических исследований

Территория Южной Камчатки достаточно хорошо изучена региональными геофизическими работами – вся площадь покрыта гравиметрической, аэромагнитной съёмками м-ба 1:200 000 и значительная ее часть – аэромагнитной съёмкой м-ба 1:50 000. По материалам гравиметрической и геологической съёмок построена структур-

⁶ Протокол № 5657 заседания Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР (ГКЗ) от 11 апреля 1969 г. Больше-Банное месторождение высокотермальных подземных вод.

но-формационная карта⁷, опубликован ряд статей, в том числе, статья о тектоническом районировании Центральной и Южной Камчатки [2].

С 1979 по 2010 гг. на территории Камчатки, включая ее Южные районы, проводились глубинные исследования земной коры и верхней мантии методом обменных волн дальних землетрясений (МОВЗ) и методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ)⁸. Работы выполнялись по системе региональных профилей, фрагменты которых представлены на рис. 1. После обработки геофизических материалов были построены глубинные сейсмические [11, 12, 17] и геоэлектрические [13-15] разрезы, рассчитаны слоисто-блоковые геоплотностные модели [11, 17]. В результате комплексной интерпретации полученных данных вдоль каждого профиля подготовлены глубинные геолого-геофизические модели⁸ [11, 12].

В структурно-геологическом плане район Банных и Карымчинских гидротерм расположен в пределах Восточно-Камчатской подзоны Олюторско-Восточно-Камчатской складчатой зоны, которая с запада ограничена Центрально-Камчатской глубинной шовной зоной (рис. 1). К востоку исследуемая территория примыкает к западной границе Крутогоровско-Петропавловской зоны поперечных дислокаций (ЗПД). Район характеризуется наличием ареального вулканизма (рис. 3) и активной гидротермальной деятельности в виде разгрузки горячих вод на дневную поверхность (рис. 1). И Банные, и Карымчинские гидротермальные системы расположены в пределах Карымшинской вулканотектонической структуры (ВТС), в центральной части которой находится плиоценовый [5] палеовулкан с центром сопки Горячей [8]. По периметру палеовулкана расположены названные гидротермальные источники (рис. 1, 3).

Юг Камчатки относится к регионам, где активно протекают современные геодинамические процессы. В прошедшие годы исследуемому району уделено пристальное внимание ученых. В 1980 г. издана монография, посвященная долгоживущему центру эндогенной активности Южной Камчатки [5], в северной части которого и находится рассматриваемая площадь.

⁷ *Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н.* Отчет по обобщению материалов гравиметрической съемки масштаба 1:200 000 с целью составления структурно-формационной карты Южной Камчатки масштаба 1:500 000. Елизово: ЕГФЭ, 1986. 303 с.

⁸ *Нурмухамедов А.Г.* Отчет о результатах работ по объекту «Создание схемы сейсмостектонического районирования Корякско-Камчатской складчатой области на основе обобщения глубинных геолого-геофизических работ». В 2-х книгах и 1-й папке. Петропавловск-Камчатский: ОАО «Камчатгеология», 2013. 511 с.

Геодинамические процессы можно рассмотреть на примере Толмачевского интрузивного массива (рис. 4). Его выделение подтверждается комплексом геофизических методов^{8,9}. Так, обобщённые контуры площади распространения интрузивных образований неоген-четвертичного возраста во многом совпадают с контурами магнитной аномалии напряженностью более 300 нТл¹⁰. В глубинных разрезах МОВЗ по профилям г. Опала – р. Вахиль и п. Апача – бух. Мутная это место фиксируется отсутствием в земной коре коррелируемых сейсмических границ [17]. По результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных определен состав интрузивного массива – он преимущественно гранодиоритовый [11]. Массив входит в более значительную по масштабам аномально-низкоомную область (5 Ом-м), выделенную работами МТЗ в интервале глубин 10-35 км. Природа аномалии объясняется циркуляцией в земной коре гидротермальных растворов, наличием зон плавления и частичного плавления [11, 13–15].

Весьма наглядным показателем высокой степени электропроводности в районе Толмачевского массива служат индукционные векторы – векторы Шмукера (рис. 4), рассчитанные на периоде вариаций магнитотеллурического поля (МТ-поля) 100 с по профилю п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский [15]. Действительная часть индукционных векторов (ИВ) в точках МТЗ, расположенных ближе к береговой линии, развернута в сторону Охотского моря, демонстрируя, таким образом, наличие мощного индукционного эффекта (берегового эффекта), формируемого в акватории моря. По мере удаления от береговой линии ИВ все больше «начинают чувствовать» влияние коромантийного проводника и от точки к точке происходит разворот действительной части векторов в сторону аномально-низкоомной зоны. В точках М-23, М-24 размеры ИВ уменьшаются, так как пункты наблюдения находятся *над* проводником, при этом угол между действительной и мнимой частями приближается к прямому, указывая на наличие в разрезе трехмерной (изометрической) геоэлектрической среды [19].

⁹ Мишин В.В., Нурмухамедов А.Г. Отчет о результатах геофизических исследований на Петропавловск-Шипунском прогностическом полигоне и региональном профиле г. Опала - р. Вахиль. Елизово: ГП "ЕГФЭ", 1994. 207 с.

¹⁰ Априлков С.Е., Ольшанская О.Н. Отчет по обобщению материалов гравиметрической съемки масштаба 1:200 000 с целью составления структурно-формационной карты Южной Камчатки масштаба 1:500 000. Елизово: ЕГФЭ, 1986. 303 с.

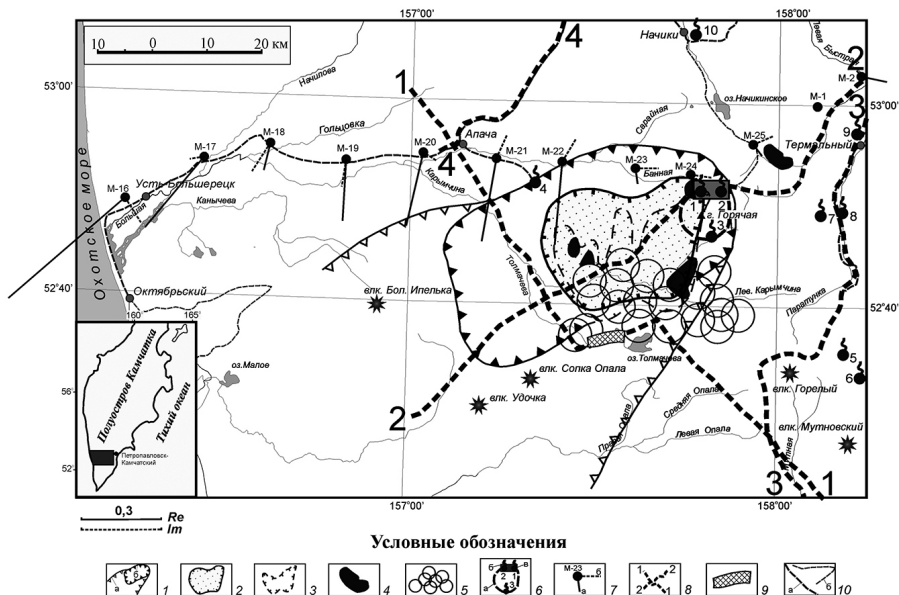


Рис. 4 Толмачевский интрузивный массив и его фланги. Условные обозначения: контуры объектов, выделенных в земной коре: 1 – области высоких температур и возможно частичного плавления (а), зоны плавления и частичного плавления (б), 2 – контуры интрузивного массива; 3 – контуры аномалии магнитного поля напряженностью более 300 нТл; 4 – миоценовые интрузивные образования; 5 – эпицентры местных землетрясений в Толмачевской эпицентральной зоне (данные за 1987-1988 гг.) – глубина гипоцентров 8 ± 5 км; 6 – примерные контуры палеовулкана сопки Горячей (а); район Банных термальных источников (б); гидротермальные источники и месторождения гидротерм (в): 1 – Малые Банные, 2 – Больше-Банные, 3 – Карымчинские, 4 – Апачинские, 5 – Верхне-Жировые, 6 – Скалистые, 7 – Карымшинские, 8 – Верхне-Паратунские, 9 – Средне-Паратунские, 10 – Начикинские; 7 – точки МТЗ и их номера на профиле п. Усть-Большереец – п-ов Шипунский, действительная (а) и мнимая (б) части индукционных векторов Шмукера (масштаб векторов показан под рисунком слева); 8 – фрагменты региональных геофизических профилей (МОВЗ-МТЗ) и их названия: 1-1 – п. Апача – бух. Мутная, 2-2 – г. Опала – р. Вахиль, 3-3 – бух. Ходутка – с. Николаевка, 4-4 – п. Апача – п. Крапивная; 9 – Толмачевская ГЭС; 10 – капитальные (а) и грунтовые (б) дороги

Обнаружение значительного по масштабу глубинного аномального объекта объясняется существованием здесь долгоживущего магматического центра [15]. Этот вывод подкрепляется признаками магматизма неоген-четвертичного возраста. Закартированные ин-

трузии гранодиоритового состава миоценового возраста, вероятно, унаследованы от апикалий, имеющих корневую основу в виде значительного по масштабам интрузивного массива гранодиоритового состава, сформированного в ослабленной зоне.

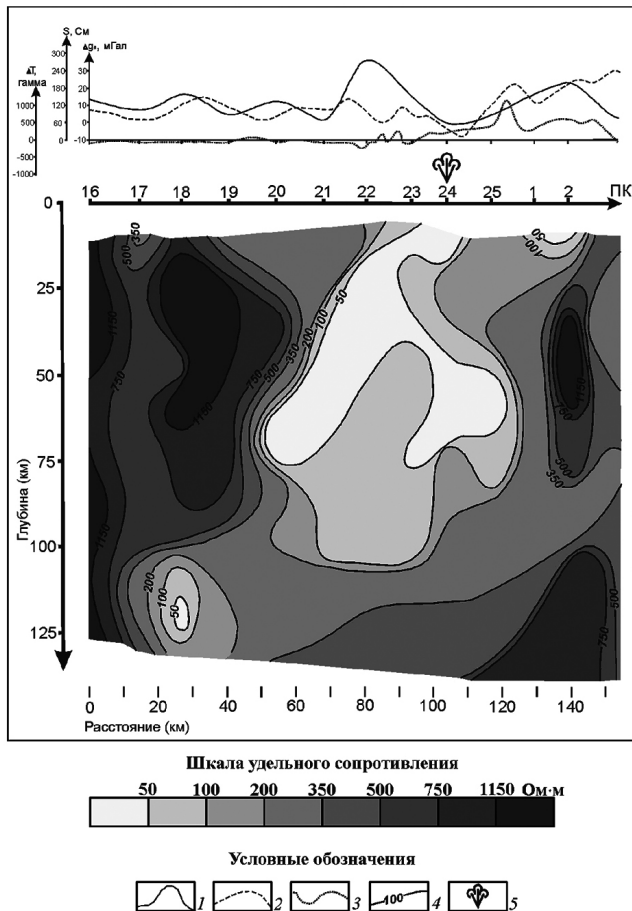


Рис. 5 Фрагмент геоэлектрического разреза вдоль профиля п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский [15]. Условные обозначения: 1 – график суммарной продольной проводимости; 2 – график поля силы тяжести (в редукции Буге, уровень условный); 3 – график напряженности магнитного поля; 4 – изолинии удельного электрического сопротивления (Омм); 5 – район Банных источников

Глубинная аномалия электропроводности имеет связь с верхними слоями земной коры. Это подтверждает геоэлектрический разрез (рис. 5), полученный вдоль профиля МТЗ п. Усть-Большерецк – м. Ши-

пунский (рис. 1, 4). Профиль пересекает северные фланги Толмачевского интрузивного массива. Построение геоэлектрического разреза выполнено с необходимой процедурой S-нормализации кривых с целью снижения искажающего влияния приповерхностных латеральных неоднородностей на кривые МТЗ [15]. Локализация аномалии фиксируется на относительно малых глубинах в районе точки М-24, расположенной недалеко от Банных источников. Авторы статьи [15] считают, что, исходя из принципа геодинамического соответствия [4], для более молодых очагов закономерно уменьшение их размеров и глубины залегания, при этом плотность теплового потока, необходимого для плавления пород, увеличивается, достигая максимума в так называемых *горячих точках*. Вероятно, из-за мощного потока тепла в земной коре образуется очаговая область *выплавления*, которая периодически инициирует продвижение магмы к дневной поверхности. Наличием этой области (области выплавления) можно объяснить и состав интрузивного массива: он не основного, а среднекислого состава. Предполагаемый магматический материал поднимается не с глубин верхней мантии, а выплавляется на месте – в очаговой области.

На Тектонической схеме (рис. 1) район Толмачевского интрузивного массива обозначен как «Толмачевский активный магматический центр». Подтверждением его продолжающейся геодинамической активности может служить рой землетрясений, зафиксированный в южном обрамлении интрузивного массива, получивший название Толмачёвской эпицентральной зоны (ТЭЗ)^{8,9}. Глубина гипоцентров землетрясений составляет 8 ± 5 км, что, примерно, соответствует глубине до кровли Толмачёвского интрузивного массива. Землетрясения интерпретируются как вулканотрясения, связанные с продвижением вулканического расплава по ослабленным зонам. Косвенным подтверждением этому является пространственная приуроченность ТЭЗ к предполагаемой зоне плавления (рис. 4).

Существование долгоживущего магматического центра можно объяснить наличием здесь значительной по масштабам ослабленной (проницаемой) зоны между земной корой и верхней мантией.

Действительно, в результате региональных геофизических исследований земной коры и верхней мантии методом МОВЗ, в районе выделен локальный участок (60×70 км) изометрической формы, где мощность земной коры достигает 40-45 км на фоне 30-35 км [17] (рис. 6). В плане он совпадает с низкоомной аномалией, объясняемой наличием в земной коре зон плавления (рис. 1, 4). Похожий по своим параметрам участок ~ (70×90 км) выделен и в районе Ключевской

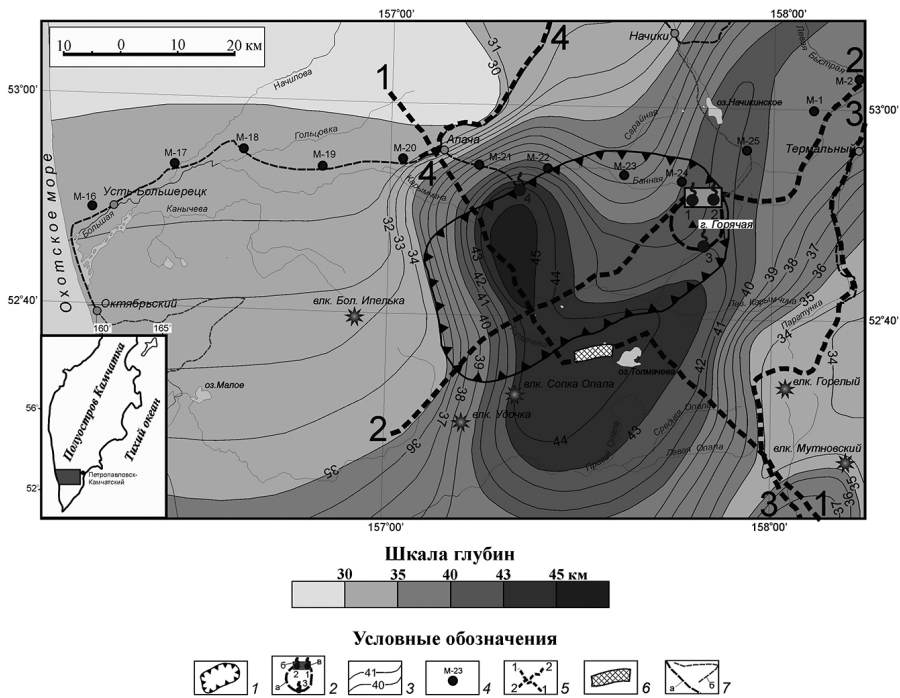


Рис. 6. Фрагмент Схемы глубин до границы Мохоровичича по данным МОВЗ (по материалам статьи [17]). Условные обозначения: 1 – контуры участка плавления (частичного плавления) вещества земной коры; 2 – примерная граница палеовулкана с центром сопка Горячая (а); район Банных термальных источников (б); гидротермальные источники и месторождения гидротерм (в): 1 – Малые Банные, 2 – Больше-Банные, 3 – Карымчинские, 4 – Апачинские; 3 – изолинии глубин (км) до границы Мохоровичича; 4 – точки МТЗ и их номера на профиле п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский; 5 – фрагменты региональных геофизических профилей (МОВЗ-МТЗ) и их названия: 1-1 – п. Апача – бух. Мутная, 2-2 – г. Опала – р. Вахиль, 3-3 – бух. Ходутка – с. Николаевка, 4-4 – п. Апача – п. Крапивная; 6 – Толмачевская ГЭС; 7 – капитальные (а) и грунтовые (б) дороги

группы вулканов [17]. Глубина до раздела Мохоровичича (Мохо) там достигает 35-43 км. Такое локальное увеличение мощности земной коры в упомянутых участках может быть объяснено не столько контрастным погружением границы Мохо на значительную глубину, сколько увеличением мощности *переходного слоя* земная кора – верхняя мантия в районе действующих вулканов и зон ареального

вулканизма. По мнению С. Т. Балесты и Л. И. Гонтовой [3] мощность такой зоны может достигать 20 км. На это указывают результаты глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) в районе Ключевской группы вулканов [1]. Вероятно, в районе анализируемого долгоживущего магматического центра в качестве раздела Мохо принята граница, отделяющая верхнюю мантию от подошвы переходного слоя [17]. Наличие «плавного» перехода земная кора – верхняя мантия указывает на то, что здесь на протяжении длительного геологического времени (начиная с позднего палеогена (?)) сформировалась пронизываемая зона, с которой и связан тепловой поток из глубин верхней мантии, локализующийся ближе к верхним слоям земной коры.

Исследуемый район характеризуется сложной морфологией высокоградиентного поля силы тяжести (ПСТ)¹¹. Непосредственно в районе Больше-Баннх источников отмечается контрастное понижение ПСТ, а к югу от них выделяется изометрическая по форме аномалия разуплотнения, которая своим очертанием совпадает с контурами палеовулкана сопки Горячая (рис. 1, 3, 4, 6).

В результате работ, выполненных в шестидесятые годы была предложена «гипотетическая схема» [9] формирования Больше-Банной и Карымчинской гидротермальных систем, в соответствии с которой в недрах вулкана сопки Горячей, на глубине 6-8 км находится высокотемпературный источник – магматический очаг. На схеме [9] показано направление движения инфильтрационных вод, выделены зоны их взаимодействия с высокотемпературным очагом и область разгрузки перегретых вод.

Предложена вполне приемлемая рабочая модель формирования гидротермальных систем вокруг палеовулкана, которая, все же, требует экспериментального подтверждения – проведения детальных геофизических исследований в районе вулканического аппарата и его флангов.

Выводы и рекомендации

На основании вышеизложенного можно сделать ряд выводов:

1. Палеовулкан сопки Горячей (рис. 1, 3, 4, 6) расположен в восточной части Толмачевского долгоживущего магматического центра (рис. 4).
2. Предполагаемый неостывший магматический очаг под сопкой Горячей может быть апофизом долгоживущего магматического центра.

¹¹ Белоусов С.П. Объяснительная записка к гравиметрической карте Камчатской области масштаба 1:500000. Руководство пользователю. Елизово Камчатской области: ФГУП «Елизовская геофизическая экспедиция», 2001. 19 с.

3. Недра Земли в районе Банных и Карымчинских гидротермальных систем характеризуются наличием неограниченного по запасам и доступного для практического использования глубинного тепла Земли.

4. На данной территории сформированы благоприятные условия для накопления больших запасов метеорных вод [7, 9], которые через зону инфильтрации вступают во взаимодействие с высокотемпературной средой по периферии магматического очага.

5. Зоны разгрузки перегретых вод сформированы вблизи дневной поверхности по периметру палеовулкана. Однако, опыт геолого-геофизических исследований [16, 18 и др.], реализованных в районе других месторождений гидротерм на Камчатке, показывает, что разгрузка гидротерм может быть скрытой, а формирование изолированных природных резервуаров с перегретой водой может происходить на значительных глубинах и не иметь каких-либо внешних признаков на дневной поверхности.

Рассмотрим для сравнения, уже ставшее известным, Мутновское месторождение парогидротерм (МППТ). Результаты геолого-геофизических исследований показывают, что собственно месторождение представлено зонами (природными камерами), где в условиях значительных глубин и высокого давления происходит накопление *перегретых вод* [16]. Снятие давления (например, проходкой и испытанием продуктивной скважины) приводит почти к взрывному расширению воды и ее подъему в виде огромного фонтана ПВС. Именно такая картина наблюдалась при расконсервировании скв. 042 летом 2004 г. и при вскрытии продуктивных интервалов (1133–1280 и 1740–1940 м) в процессе испытания наклонной скважины Гео-1 в 2008 году.

Геотермальная электростанция ГеоЭС-1 расположена в непосредственной близости от изначально эксплуатируемой части Мутновского МППТ. В этом месте наблюдается активная гидротермальная деятельность и, в соответствии с модельными данными¹², максимальные значения температуры на абсолютной отметке глубин – 250 м достигают 260–270 °С. В данном районе на начальном этапе освоения месторождения пробурено значительное количество скважин и именно здесь наблюдается наиболее высокая плотность их расположения. Но эта часть месторождения на протяжении геологи-

¹² Кирюхин А.В. Отчёт по Договору №30 от 16.04.03 «На получение дополнительной геологической информации по Мутновскому месторождению парогидротерм в целях обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 мВт». Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 2003.

ческого времени подвергалась интенсивной гидротермальной обработке. Трещины и проницаемые зоны в значительной степени уже залечены термоминеральными растворами и, поэтому, вскрытие мощных притоков ПВС в этом месте ожидать вряд ли придется.

Наиболее мощные притоки ПВС были выявлены к северо-востоку от электростанции, на расстоянии порядка 1–2 км там, где внешние признаки гидротермальной деятельности практически отсутствуют, но где на глубине 3–3.5 км по геофизическим данным выделен значительный по масштабам очаг плавления [16]. Здесь мощные продуктивные зоны вскрыты на *значительных* глубинах – от 650–1250 м (скв. 048) до 1600–2200 м (скв. 047). Есть убедительные примеры глубинных притоков ПВС и по другим скважинам в этой части месторождения.

Вернемся к Больше-Банному месторождению ПВС. Здесь значительная часть скважин сконцентрирована на площади, не превышающей 0.5 кв. км. В наиболее продуктивных скважинах интервалы притоков ПВС охватывают глубины (от устья скв.) от первых десятков до 400–500 метров [9] – то есть, зоны притоков вскрыты на относительно незначительных глубинах. К разбуриванию месторождения приступили в тех местах, где наблюдалась наиболее интенсивная гидротермальная деятельность³ и где широко распространены гидротермально измененные породы. Очевидно, в таких местах, где термальные воды уже «пробились» на дневную поверхность, трещинно-жильные зоны могут быть или уже залеченными, или залеченными в значительной степени.

Иная картина наблюдается в районе Карымчинских термальных источников. В этом месте внешне гидротермальная деятельность проявлена незначительно и породы подвержены гидротермальным изменениям в меньшей степени, чем в районе Больше-Банных источников. Вероятно, здесь можно ожидать наличие скрытой разгрузки и обнаружение природных «резервуаров» с перегретой водой на значительных глубинах. Можно предположить, что такая же обстановка существует и на Малых Банных источниках, где внешне гидротермальная деятельность также проявлена незначительно.

При продолжении работ на Банной площади задача исследователей заключается в том, чтобы уточнить положение магматического очага под палеовулканом сопки Горячей, выявить зону его взаимодействия с инфильтрационными водами и локализовать природные резервуары с перегретыми водами в пределах глубин 2–3 км, достигаемых для бурения. Таким образом, на современном этапе требуются *глубинные* исследования. С учетом прогнозируемой глубины

расположения магматического очага глубинность не должна быть менее 7-10 км. При этом, объектом доизучения может стать не только Больше-Банное месторождение ПВС, но и вся территория, охватывающая район сопки Горячей и её фланги (рис. 3). Общая площадь работ может составить не менее 300–350 км².

Для решения поставленных задач рекомендуется постановка комплекса геофизических методов, например, электроразведки МТЗ и гравиразведки с выходом в далекие фланги исследуемой территории.

Результатом работ МТЗ может стать создание 3D-геоэлектрической модели палеовулкана и его флангов, где будут выделены геоэлектрические неоднородности, характеризующиеся различным уровнем удельного сопротивления, в том числе, относительно низкоомный участок, отождествляемый с магматическим очагом.

Предполагается, что в районе сопки Горячей разность плотностных характеристик пород магматического очага и вмещающего пространства будет способствовать структурным построениям, в том числе, локализации магматического очага. Опыт постановки гравиразведочных работ в районе Авачинского вулкана показывает, что зона периферического очага, расположенного на глубине порядка 2 км от дневной поверхности, характеризуется повышенной плотностью. По одним сведениям эта плотность составляет 2.75 г/см³ [22], по другим – 2.88 г/см³ [6], что близко к показателям плотности пород среднего-основного состава. Фоновое значение вмещающих пород составляет 2.45-2.6 г/см³ [22]. Такая разность плотностей способствует проведению количественной интерпретации гравиметрических данных, включая уточнение положения периферического очага.

Постановка комплекса геофизических и гидрогеологических исследований даст возможность разработать трехмерную геолого-геофизическую модель исследуемой территории, выделить перспективные участки для вскрытия высокотемпературного энергоносителя, выбрать оптимальное место под бурение скважин и определить параметры их проходки. Положительный опыт организации таких работ в районе Мутновского месторождения ПГТ указывает на высокую эффективность выбранного комплекса, где в результате проведенных исследований были рекомендованы места под бурение глубоких скважин. Первая же наклонная скважина Гео-1, пробуренная в 2008 г., вскрыла мощные притоки ПВС [16] в интервале глубин (по вертикали) 990–1130 и 1540–1710 м. Пробуренные затем ещё несколько скважин также оказались весьма продуктивными.

В заключение отметим, что на Камчатке имеется значительное число примеров удачной постановки метода МТЗ с целью поиска и разведки высокотемпературных энергоносителей. К изложенному

следует добавить, что рекомендуемый к постановке в районе Банных и Карымчинских источников комплекс геофизических работ в настоящее время реализуется в районе Авачинского вулкана и его ближайших флангов [18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аносов Г. И., Биккенина С. К., Попов А. А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.

2. Апрельков С. Е., Ольшанская О. Н. Тектоническое районирование Центральной и Южной Камчатки по геологическим и геофизическим данным // Тихоокеанская геология. 1989. № 1. С. 53-65.

3. Балеста С. Т., Гонтовая Л. И. Сейсмическая модель земной коры Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 83-90.

4. Василевский М. М., Вакин Е. А., Кутыев Ф. Ш. и др. Принципы геодинамического соответствия возраста и глубинности в вулканических, плутонических, метаморфических и рудообразующих процессах // Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский, 1974. С. 51-59.

5. Геологическое строение, новейший вулканизм и современная структура Южной Камчатки // Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Отв. ред. Масуренко Ю. П. М.: Наука, 1980. С. 7-78.

6. Зубин М. И., Козырев А. И. Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 81-94.

7. Кононов В. И., Поляк Б. Г. Большие Банные источники на Камчатке // Гидрогеотермические условия верхних частей земной коры. М.: Наука, 1964. – С. 52–71.

8. Краевой Ю. А., Коваленко В. Я., Евтухов А. Д. Больше-Банная гидротермальная система на Камчатке // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 246-253.

9. Краевой Ю. А., Охупкин В. Г., Сержников А. И. Результаты гидрогеологических и геотермических исследований Большебанной и Карымчинской гидротермальных систем // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 179-211.

10. Леонов В. Л., Rogozin A. H., Соболевская О. В. Результаты термометрической съёмки Больше-Банной термальной системы (Южная Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 197-206.

11. Мишин В. В. Глубинное строение и типы земной коры юга Камчатки // Тихоокеанская геология. 1996. № 1. С. 110-119.

12. Мишин В. В. Геолго-геофизическое строение Камчатки // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 4. С. 64-70.

13. Мороз Ю. Ф., Нурмухамедов А. Г., Лощинская Г. А. Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 127-138.

14. Мороз Ю. Ф., Нурмухамедов А. Г., Лощинская Т. А. Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Физика Земли. 1996. № 11. С. 49–57.

15. Нурмухамедов А. Г., Смирнов В. С. Результаты глубинных электромагнитных исследований на Южной Камчатке // Геология и полезные ископаемые Корякско-Камчатской складчатой области (материалы V Камчатской геологической конференции). Петропавловск-Камчатский. 1985. С. 69 – 82.

16. Нурмухамедов А. Г., Чернев И. И., Алексеев Д. А. и др. Трёхмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм // Физика Земли. 2010. № 9. С. 15-26.

17. Нурмухамедов А. Г., Неядько В. В., Ракитов В. А. и др. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. № 29. С. 35-52.

18. Нурмухамедов А. Г. Исследование геотермальных ресурсов Авачинской группы вулканов и её флангов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Камчатка-3. М.: Горная книга, 2016. Специальный выпуск 31. С. 453-477.

19. Рокитянский И. И. Исследования аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наукова думка, 1975. С. 280.

20. Соболевская О. В. Больше-Банские источники: история изучения, современное состояние // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. № 4. С. 130-135.

21. Трухин Ю. П., Петрова В. В. Геохимический эффект гидротермального метасоматоза и изменение состава термальных растворов во времени (на примере Больше-Банного геотермального месторождения на Камчатке) // Гидротермальные минералообразующие растворы области активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 191-201.

22. Шеймович В. С., Сидоров М. Д. Строение фундамента вулканического пояса // Вулканология и сейсмология. 2000. № 5. С. 68-75. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Нурмухамедов Александр Гарифович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, nurmukhamedov1949@mail.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017.
No. 12 (special'nyj vypusk 32), pp. 347–367.

A. G. Nurmukhamedov

BATH AND KARYMSHINSKIE HYDROTHERMAL SYSTEMS – ENERGY SOURCES IN THE SOUTH OF KAMCHATKA

Presents the results of studies conducted in the 60s of the XX century in the district of Bath and Karimchinski high temperature sources, and studies of the earth's crust and upper mantle

by geophysical methods in the South of Kamchatka in the last decade. Based on the analysis of geological-geophysical data shows that the energy potential More-Banna deposits of overheated water - steam-water mixture (PVA) is undervalued. With the aim of examining and then engaging in the energy balance of the region deposits of PVA and its flanks is proposed to realize in-depth studies using modern geophysical technologies.

Key words: Tolmachevsky Intrusive array,-Bath Deposit, magmatic hearth, Moho.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-32-347-367

AUTHOR

Nurmukhamedov A.G., candidate of geological-mineralogical Sciences, leading researcher, nurmuxamedov1949@mail.ru research geotechnological center, far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. Anosov G. I., Bikkenina S. K., Popov A. A. i dr. *Glubinnoe sejsmicheskoe zondirovanie Kamchatki* (Deep seismic sounding of Kamchatka). Moscow: Nauka, 1978. 130 p.
2. Aprelkov S. E., Ol'shanskaja O. N. *Tihookeanskaja geologija*. 1989. no 1. pp. 53-65.
3. Balesta S. T., Gontovaja L. I. *Vulkanologija i sejsmologija*. 1985. no 4. pp. 83-90.
4. Vasilevskij M. M., Vakin E. A., Kutjev F. Sh. i dr. *Geodinamika, magmoobrazovanie i vulkanizm*. Petropavlovsk-Kamchatskij, 1974. pp. 51-59.
5. *Geologicheskoe stroenie, novejsij vulkanizm i sovremennaja struktura Juzhnoj Kamchatki. Dolgozhivushhij centr jendogennoj aktivnosti Juzhnoj Kamchatki* (Geological structure, volcanism newest and modern structure of southern Kamchatka. Long-lived center of endogenic activity in southern Kamchatka). Otv. red. Masurenko Ju. P. Moscow: Nauka, 1980. pp. 7-78.
6. Zubin M. I., Kozyrev A. I. *Vulkanologija i sejsmologija*. 1989. no 1. pp. 81-94.
7. Kononov V. I., Poljak B. G. *Gidrogeotermicheskie uslovija verhnih chastej zemnoj kory* (Hydro-geo-thermal conditions of the upper parts of the crust). Moscow: Nauka, 1964. pp. 52-71.
8. Kraevoj Ju. A., Kovalenko V. Ja., Evtuhov A. D. *Bol'she-Bannaja gidrotermal'naja sistema na Kamchatke. Vulkanizm i glubiny Zemli* (More-Banna hydrothermal system in Kamchatka. The Volcanoes and the depths of the Earth). Moscow: Nauka, 1971. pp. 246-253.
9. Kraevoj Ju. A., Ohapkin V. G., Serezhnikov A. I. *Rezul'taty gidrogeologicheskij i geotermicheskij issledovanij Bol'shebannoj i Karymchinskij gidrotermal'nyh sistem. Gidrotermal'nye sistemy i termal'nye polja Kamchatki* (The results of the hydrogeological and geothermal investigations Volshebnoi and Karimchinski hydrothermal systems. Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka). Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1976. S. 179-211.
10. Leonov V. L., Rogozin A. N., Sobolevskaja O. V. *Rezul'taty termometriceskoy s#jomki Bol'she-Bannyh termal'nyh istochnikov (Juzhnaja Kamchatka)* (Results of thermometric shooting More-Bath thermal springs (southern Kamchatka)). Materialy ezhegodnoj konferencii, posvjashhennoj Dnju vulkanologa. Petropavlovsk-Kamchatskij: IViS DVO RAN, 2008. pp. 197-206.
11. Mishin V. V. *Tihookeanskaja geologija*. 1996. no 1. pp. 110-119.
12. Mishin V. V. *Tihookeanskaja geologija*. 1997. T. 16. no 4. pp. 64-70.
13. Moroz Ju. F., Nurmuhamedov A. G., Loshhinskaja G. A. *Vulkanologija i sejsmologija*. 1995. no4-5. pp. 127-138.
14. Moroz Ju. F., Nurmuhamedov A. G., Loshhinskaja T. A. *Fizika Zemli*. 1996. no 11. pp. 49-57.
15. Nurmuhamedov A. G., Smirnov V. S. *Rezul'taty glubinnyh jelectromagnitnyh issledovanij na Juzhnoj Kamchatke* (Results of deep electromagnetic investigations at the South Kamchatka). Geologija i poleznye iskopaemye Korjasko-Kamchatskoj skladchatoj oblasti (materialy V Kamchatskoj geologicheskoy konferencii). Petropavlovsk-Kamchatskij. 1985. pp. 69 - 82.

16. Nurmuhamedov A. G., Chernev I. I., Alekseev D. A. i dr. *Fizika Zemli*. 2010. no 9. pp. 15-26.
17. Nurmuhamedov A. G., Nedjad'ko V. V., Rakitov V. A. i dr. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2016. no 1. Vyp. 29. pp. 35-52.
18. Nurmuhamedov A. G. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. Kamchatka-3. 2016. Special'nyj vypusk 31. pp. 453-477.
19. Rokitjanskij I. I. *Issledovanija anomalij jelektroprovodnosti metodom magnitovariacionnogo profilirovanija* (Study of electrical conductivity anomalies by the method of magnetovariational profiling). Kiev: Naukova dumka, 1975. p. 280.
20. Sobolevskaja O. V. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2004. no 4. pp. 130-135.
21. Truhin Ju. P., Petrova V. V. *Geohimicheskij jeffekt gidrotermal'nogo metasomatoza i izmenenie sostava termal'nyh rastvorov vo vremeni (na primere Bol'she-Bannogo geotermal'nogo mestorozhdenija na Kamchatke)* (Geochemical effect of hydrothermal metasomatism, and changes in the composition of thermal solutions in time (for example, More-Bannaya geothermal field in Kamchatka)). *Gidrotermal'nye mineraloobrazujushhie rastvory oblasti aktivnogo vulkanizma*. Novosibirsk: Nauka, 1974. pp. 191-201.
22. Shejmovich V. S., Sidorov M. D. *Vulkanologija i sejsmologija*. 2000. no 5. pp. 68-75.



СОДЕРЖАНИЕ

Новаков Р. М., Чубаров В. М., Кунгурова В. Е. РОГОВООБМАНКОВЫЕ И ФЛОГОПИТОВЫЕ ПЕРИДОТИТЫ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ ФОРМАЦИЙ КАМЧАТКИ	5
Новаков Р.М. СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ И РУДНЫХ МИНЕРАЛАХ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ ФОРМАЦИЙ КАМЧАТКИ	18
Паламарь С. В., Новаков Р. М. ГИС «НИКЕЛЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ»	30
Паламарь С. В., Новаков Р. М., Трухин Ю. П. КОЛЛЕКЦИЯ ОБРАЗЦОВ И ПРОБ ИЗ НИКЕЛЕНОСНЫХ ОБЪЕКТОВ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА	41
Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Степанов В. А., Новаков Р. М. МИНЕРАЛЬНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ.....	49
Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Степанов В. А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОЗОНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЛАВНЫХ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ РУД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ	66
Кунгурова В. Е., Трухин Ю. П., Степанов В. А. НЕКОТОРЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ.....	83
Кунгурова В. Е., Степанов В. А., Трухин Ю. П. К СРАВНИТЕЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ РУД КАМЧАТСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ	100
Кунгурова В. Е., Новаков Р. М., Сидоров М. Д., Степанов В. А. О ПЕРСПЕКТИВАХ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ДУКУКСКОГО РУДНОГО РАЙОНА.....	116
Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕТАЛЛОВ ПО ПЛОТНОСТНЫМ МОДЕЛЯМ ИНТРУЗИЙ.....	121
Таскин В. В. КРАТКИЙ ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА В ГЕОЛОГИИ	138

Сидоров М. Д. НАХОЖДЕНИЕ ФОРМЫ И ОБЪЕМА НИКЕЛЕНОСНЫХ ИНТРУЗИЙ ПО ПЛОТНОСТНЫМ МОДЕЛЯМ	145
Степанов В. А. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАМЧАТСКОЙ И СТАНОВОЙ НИКЕЛЕНОСНЫХ ПРОВИНЦИЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА.....	157
Степанов В. А. ПЛАТИНО-ЗОЛОТО-РУТУНАЯ И МЕДНО-НИКЕЛЕВАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ КАМЧАТКИ.....	168
Степанов В. А. ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАМЧАТКИ И ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ.....	180
Степанов В. А., Кунгурова В. Е. СОСТАВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ФУНДАМЕНТА КОЛПАКОВСКОГО ПОТЕНЦИАЛЬНО НИКЕЛЕНОСНОГО РАЙОНА.....	191
Паламарь С. В., Новаков Р. М. ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ НИКЕЛЕНОСНОСТИ КАМЧАТКИ.....	204
Белова Т. П., Ершова Л. С., Ратчина Т.И. ОСАЖДЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩАЯ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ	210
Белова Т. П., Ершова Л. С., Ратчина Т.И. ГИДРОЛИТИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩАЯ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД.....	216
Хомченкова А. С. СОВОКУПНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА НА РОСТ КУЛЬТУРЫ АЦИДОФИЛЬНЫХ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ... ..	222
Хомченкова А. С. ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩИЕ МИКРООРГАНИЗМЫ (ОБЗОР).....	228
Киореску А. В. ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ СВЧ-ВОЛНАМИ КУЛЬТУРЫ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.....	237
Киореску А. В. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ НЕТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИКРООРГАНИЗМЫ.....	248

Мусихин В. О. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЗИ НА КУЛЬТУРУ АЦИДОФИЛЬНЫХ ХЕМОЛИТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В СРЕДЕ 9К СИЛЬВЕРМАНА И ЛУНДГРЕНА С ДОБАВЛЕНИЕМ FE(II).....	256
Мусихин В. О. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА МИКРООРГАНИЗМЫ В ПРОЦЕССЕ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ	264
Левенец О. О. ОСОБЕННОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИКЕЛЯ ИЗ СУЛЬФИДНОЙ РУДЫ ПОСРЕДСТВОМ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ПРИ РАЗНЫХ ПЛОТНОСТЯХ ПУЛЬПЫ И ТЕМПЕРАТУРАХ	271
Рогатых С. В. ВАЛИДАЦИЯ ПЦР-ТЕСТ-СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННОГО И КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА СООБЩЕСТВ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ (КАМЧАТКА).....	278
Рогатых С. В., Мурадов С. В. РАЗРАБОТКА ВИДОСПЕЦИФИЧНЫХ ПРАЙМЕРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВА ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ АЦИДОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ (КАМЧАТКА).....	285
Рогатых С. В. УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕСТ-СИСТЕМА, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО-БИОЛОГИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СУЛЬФИДНЫХ РУД	295
Белова Т. П., Ратчина Т. И., Ершова Л. С. СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩАЯ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД.....	303
Мусихин В. О., Киореску А. В., Хомченкова А. С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ (ВОЗДЕЙСТВИЕ УЗИ, СВЧ И ТОКСИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА АЦИДОФИЛЬНЫЕ ХЕМОЛИТОТРОФНЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ).....	310
Хайнасова Т. С. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РОЛИ МИКРООРГАНИЗМОВ В БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИИ СУЛЬФИДНОЙ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ	322
Сидоров М. Д., Таскин В. В. ВОКСЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАЗДРОБЛЕННОСТИ КОРЫ В РАЙОНАХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (КАМЧАТКА)	336

Горбач В. А., Позолотина Л. А. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ САМОИЗЛИВАЮЩЕЙСЯ НАБЛЮДА- ТЕЛЬНОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ ГК-1 (ПИНАЧЕВО, КАМ- ЧАТКА).....	342
Нурмухамедов А. Г. БАННЫЕ И КАРЫМЧИНСКИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ – ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ НА ЮГЕ КАМЧАТКИ.....	347

CONTENT

Novakov R. M., Chubarov V. M., Kungurova V. Ye. HORNBLLENDE AND PHLOGOPITE PERIDOTITES OF MAFITE-ULTRAMAFITE FORMATIONS OF KAMCHATKA	5
Novakov R.M. NICKEL CONTENT IN ROCK-FORMING AND ORE MINERALS OF MA- FITE-ULTRAMAFITE FORMATIONS OF KAMCHATKA.....	18
Palamar S. V., Novakov R. M. GIS «NIKEL MINERALIZATION OF EAST KAMCHATKA».....	30
Palamar S. V., Novakov R. M., Trukhin Yu. P. COLLECTION OF SAMPLING MATERIAL FROM NIKELFERROUS OB- JECTS OF THE KAMCHATKA REGION.....	41
Kungurova V. Ye., Trukhin Yu.P., Stepanov V. A., Novakov R. M. MINERAL VARIETIES OF DIFFERENT TYPES OF COPPER-NICKEL ORES OF THE KAMCHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE.....	49
Kungurova V. Ye., Trukhin Yu.P., Stepanov V. A. COMPARATIVE ANALYSIS OF MICROPROBE RESEARCHES OF THE MAIN SULFIDE MINERALS OF THE ORES OF THE KAMCHATKA NICKE- LIFEROUS PROVINCE.....	66
Kungurova V. Ye., Trukhin Yu. P., Stepanov V. A. GEOCHEMICAL FEATURES OF ORE-HOSTING ORES OF THE KAM- CHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE.....	83
Kungurova V. Ye., Trukhin Yu.P., Stepanov V. A. FOR COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ORES OF THE KAMCHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE	100

Kungurova V. Ye., Novakov R. M., Sidorov M. D., Stepanov V. A. ABOUT PERSPECTIVES OF COPPER-NICKEL OBJECTS INDICATION IN THE SOUTH-WESTERN PART OF THE DUKUK ORE REGION	116
Sidorov M. D., Kungurova V. Ye. THE DEFINITION OF THE RESOURCE POTENTIAL OF METALS ACCORD- ING TO DENSITY MODELS OF INTRUSIONS.....	121
Taskin V. V. SHORT OVERVIEW OF FOREIGN EXPERIENCE OF LINEAMENT ANALY- SIS EXPLOITATION IN A SPHERE OF GEOLOGY	138
Sidorov M. D. THE DEFINITION OF THE RESOURCE POTENTIAL OF METALS ACCORD- ING TO DENSITY MODELS OF INTRUSIONS.....	145
Stepanov V. A. COMPARATIVE CHARACTERISTIC OF THE KAMCHATSKY AND STANO- VOY NICKELIFEROUS PROVINCES OF THE FAR EAST	157
Stepanov V. A. PLATINO-GOLD-MERCURY AND COPPER-NICKEL METALLOGENIC SPECIALIZATION OF KAMCHATKA.....	168
Stepanov V. A. CHARACTERISTIC FEATURES OF COPPER AND NICKEL DEPOSITS OF KAMCHATKA AND WESTERN COAST OF NORTH AMERICA	180
Stepanov V. A., Kungurova V. Ye. THE COMPOSITION OF METAMORPHIC ROCKS OF BASAL COMPLEX OF THE KOLPAKOV POTENTIAL NICKELIFEROUS REGION	191
Palamar S. V., Novakov R. M. THE PROBLEMS OF INFORMATION TECHNOLOGIES APPLICATION IN RESEARCHES OF NICKELIFEROUS MINERALIZATION OF KAMCHATKA.....	204
Belova T. P., Ershova L. S., Ratchina T. I. IRON PRECIPITATION FROM PRODUCTIVE SOLUTIONS OF BACTERIAL- CHEMICAL LEACHING OF COBALT-COPPER- NICKEL ORES USING CALCIUM CARBONATE	210
Belova T. P., Ershova L. S., Ratchina T. I. HYDROLYTIC IRON PRECIPITATION FROM PRODUCTIVE SOLUTIONS OF BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING OF COBALT-COPPER-NICKEL ORES.....	216
Khomchenkova A. S. A CUMULATIVE EFFECT OF NICKEL AND COBALT ON AN ACIDOPHILIC CHEMOLITHOTROPHIC MICROORGANISMS CULTURE'S GROWTH.....	222
Khomchenkova A. S. THE HEAVY METALS AND LEACHING MICROORGANISMS (A REVIEW).....	228

Kioresku A. V. INFLUENCE OF THE DURATION OF PRELIMINARY IRRADIATION WITH MICROWAVE WAVES OF CULTURE OF CHEMOLITHOTROPHIC MICRO- ORGANISMS ON THE EFFICIENCY OF BIOLEACHING PROCESSES	237
Kioresku A. V. MOLECULAR MECHANISMS OF A NON-THERMAL INFLUENCE OF MI- CROWAVE RADIATION ON MICROORGANISMS	248
Musikhin V. O. INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ULTRASOUND ON THE CULTURE OF AXIDOPHILIC CHEMOLITHROPHIC ORGANISMS IN 9K SILVERMAN AND LUNDGREN ENVIRONMENT WITH ADDITION OF FE (II) ...	256
Musikhin V. O. INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE USE ON THE CULTURE OF AXIDOPHILIC CHEMOLITHROPHIC ORGANISMS IN 9K SILVERMAN AND LUNDGREN ENVIRONMENT WITH ADDITION OF FE (II).....	264
Levenets O. O. FEATURES OF NICKEL EXTRACTION FROM SULFIDE ORES THROUGH BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING AT DIFFERENT PULP DENSITIES AND TEMPERATURES	271
Rogatykh S. V. VALIDATION OF THE PCR-TEST SYSTEMS FOR ESTIMATION OF QUALITATIVE AND QUANTITATIVE COMPOSITION OF COMMUNITIES OF CHEMOLOTOTROPHIC MICROORGANISMS OF FIELD SHANUCH (KAMCHATKA)	278
Rogatykh S. V., Muradov S. V. DEVELOPMENT OF VIDOSPECIFIC PRIMERS IN THE EVALUATION OF THE STRUCTURE OF THE COMMUNITY OF THE CHEMOLITHOTROPHIC ACYDOPHILE MICROORGANISMS OF THE SHANUCH DEPOSIT (KAM- CHATKA)	285
Rogatykh S. V. UNIVERSAL TEST SYSTEM USED FOR MOLECULAR BIOLOGICAL ANALYSIS OF MICROBIAL COMMUNITIES OF SULFIDE ORE DEPOSITS.....	295
Belova T. P., Ratchina T. I., Ershova L. S. SORPTION NICKEL RECOVERY FROM PRODUCTIVE SOLUTIONS OF BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING OF COBALT-COPPER-NICKEL ORES	303
Musikhin V. O., Kioresku A. V., Khomchenkova A. S. THE EXPERIMENTAL INTENSIFICATION OF BIOLEACHING PROCESSES (IMPACT OF ULTRASOUND, MICROWAVES AND TOXIC METALS ON AN ACIDOPHILIC CHEMOLITHOTROPHIC MICROORGANISMS)	310

Khainasova T. S. SOME ASPECTS OF THE ROLE OF MICROORGANISMS IN THE BIOLEACHING OF SULPHIDE COBALT-COPPER-NICKEL ORE OF THE SHANUCH DEPOSIT	322
Sidorov M. D., Taskin V. V. VOXEL MODEL OF THE FRAGMENTATION OF THE CRUST IN AREAS OF THE GEOTHERMAL FIELD (KAMCHATKA)	336
Gorbach V. A., Pozolotina L. A. HYDROCHEMICAL DATA OF SELF-FLOWING OBSERVING GEOTHER- MAL WELL GK-1 (PYNACHEVO, KAMCHATKA).....	342
Nurmukhamedov A. G. BATH AND KARYMSHINSKIE HYDROTHERMAL SYSTEMS – ENERGY SOURCES IN THE SOUTH OF KAMCHATKA.....	347



Секретариат ГИАБ

Н.А. Голубцов

Рабочая группа:

Руководитель *Н.А. Голубцов*

Подготовка макета *И.А. Вершинина*

Дизайн оформления *В.Ю. Котов, Е.Б. Капралова*

Инвестиционные проекты *Н.А. Голубцов*

Государственное свидетельство
о регистрации ГИАБ в Роскомнадзоре
ПИ № ФС77-36292 от 19.05.2009

Решением Президиума ВАК журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук

Все статьи ГИАБ рецензируются.

Редакция принимает решение о публикации по результатам рецензирования и имеет право отклонить статью без объяснения причин

Статьи публикуются в авторской редакции

Редакция не ведет переписки с авторами
и не дает справок о прохождении статей

При перепечатке ссылка на ГИАБ обязательна

Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Роспечать» — 46466

Подписано в печать 20.10.2017. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная. Гарнитура «Franklin Gothic Book».

Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,5. Тираж 500 экз.

Изд № 0000 Заказ № 0000

119049 Москва, Ленинский проспект, 6,
издательство «Горная книга»
тел. (499) 230-27-80; (495) 737-32-64

Отпечатано в ГУП МО «Коломенская типография»,
140400 Московская область, г. Коломна,
ул. III Интернационала, д. 2А





К ♦ Н ♦ И ♦ Г ♦ И

**ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА
И ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»**

можно приобрести

- ◆ в Издательстве «Горная книга»
(м. Октябрьская-кольцевая, Ленинский просп.
д. 6, стр. 7, офис 3, 1-й этаж)

заказать

- ◆ через систему «Книга—почтой»; заказы в произвольной форме направляйте:

по адресу: **119049 Москва, Ленинский
проспект, 6, Издательство «Горная книга»;**

по телефонам: **(499) 230-27-80,
(495) 737-32-64**

по e-mail: **info@gornaya-kniga.ru**

с сайта: **www.gornaya-kniga.ru**

**Распространение книг осуществляет
издательство «Горная книга»**

**Подробная информация размещена
на сайте www.gornaya-kniga.ru**