

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)
Институт Наук о Земле
Кафедра геологии месторождений полезных ископаемых

Гузев Владислав Евгеньевич

**Минералогические и геохимические критерии технологической типизации
золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ**

Магистерская диссертация по направлению 05.04.01 «Геология»

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:
к.г.-м.н., старший преподаватель
Ю.С. Шелухина

« » _____ 2019

Заведующий кафедрой:
к.г.-м.н., доцент И.А. Алексеев

« » _____ 2019

Санкт-Петербург
2019

Оглавление

Введение.....	3
1. Критерии типизации золотоносных руд	5
1.1 Характеристика изучаемых месторождений.....	5
1.2 Степень окисленности.....	8
1.3 Формы нахождения золота	9
1.4 Гранулометрическая характеристика золота	12
1.5 Способ обогащения.....	13
1.6. Обобщение критериев типизации золотоносных руд	14
2. Изучение геологического строения и вещественного состава проб рудопроявления Сикакангас (Sikakangas)	18
2.1. Геологическое строение региона.....	18
2.1.1 Геологическое строение рудопроявления Сикакангас (Sikakangas).....	24
2.2. Химический состав проб рудопроявления Сикакангас.....	25
2.2.1 Макрокомпонентный состав средней пробы.....	26
2.2.2 Микрокомпонентный состав средней пробы (ICP-MS)	28
2.2.3 Микрокомпонентный состав керновых образцов (ICP-AES)	28
2.2.4 Определение содержания золота и серебра методом пробирного анализа.....	30
2.3 Петрографические исследования керновых образцов золотоносных руд рудопроявления Сикакангас	30
2.4 Минераграфические и электронно-микроскопические исследования проб рудопроявления Сикакангас	34
2.5 Прогноз технологических свойств руд рудопроявления Сикакангас.....	37
3. Технологические свойства руд рудопроявления Сикакангас	40
3.1 Результаты гравитационного обогащения руды	40
3.2 Минеральный состав продуктов гравитационного обогащения	44
3.3 Результаты флотационного обогащения руды.....	51
3.4 Результаты гидрометаллургического опыта	53
3.5 Обоснование выбора схемы обогащения	55
Заключение	56
Список литературы.....	57
Приложения.....	60

Введение

На ранних стадиях геологоразведочных работ одним из важнейших факторов прогнозирования способа обогащения является определение вещественного состава золотоносных руд. Вопрос выявления зависимости технологических свойств руды от вещественного состава привлекает к себе внимание исследователей с давних пор. Ранее были установлены закономерности технологической типизации золотоносных руд для отдельных месторождений, однако обобщающих работ по данной теме не было.

Выполненный автором сравнительный анализ различных типов руд позволит обосновать общие закономерности и выявить зависимости их технологических свойств от вещественного состава. Вышеизложенная информация подтверждает актуальность и необходимость изучения данной темы в рамках выпускной квалификационной работы.

При работе над магистерской диссертацией использовались материалы производственных отчетов компании «ЛИМС», любезно предоставленных автору генеральным директором Бороздиным А.П.

Цель работы – выявление критериев технологической типизации золотоносных руд для разработки метода прогноза технологических свойств руд месторождений золота на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Для осуществления поставленной цели были решены следующие задачи:

- Проанализированы данные по ранее изученным компанией «ЛИМС» месторождениям и установлены важнейшие критерии, влияющие на способ обогащения
- На основе полученных данных обоснованы общие закономерности и выявлены зависимости технологических свойств от вещественного состава
- Для проверки полученных результатов изучен вещественный состав проб рудопроявления Сикакангас
- На основе полученных данных и ранее разработанных на других месторождениях критериев дан прогноз способа обогащения изучаемого рудопроявления
- Полученные результаты подтверждены технологическими опытами

Выпускная квалификационная работа состоит из 3 основных глав.

В первой главе обобщаются данные по 7 ранее изученным месторождениям, на которых было отобрано 19 технологических проб. Изучены важнейшие показатели (форма нахождения золота, степень окисленности, гранулометрическая характеристика золота), влияющие на способ обогащения. Составлена сводная таблица, на основе которой выявлены критерии технологической типизации золотоносных руд.

Вторая глава посвящена изучению геологического строения и вещественного состава проб рудопроявления Сикакангас. Исследование включает в себя результаты и

интерпретацию химических анализов, петрографическое описание шлифов, минераграфические и электронно-микроскопические исследования аншлифов. В конце на основе полученных результатов и ранее разработанных на других месторождениях критериев дается прогноз способа обогащения руды.

В третьей главе приведены результаты технологических исследований руды рудопроявления Сикакангас и подведены итоги релевантности разработанных критериев для дальнейшего применения их в прогнозировании способа обогащения золоторудных месторождений.

Хочу выразить искреннюю благодарность за ценные советы и помощь в написании данной работы:

- Бороздину Алексею Павловичу, генеральному директору ООО «ЛИМС»
- Шелухиной Юлии Сергеевне, старшему преподавателю кафедры геологии месторождений полезных ископаемых
- Петрову Сергею Викторовичу, доценту кафедры геологии месторождений полезных ископаемых
- Терехову Артему Валерьевичу, заместителю заведующего отделом металлогении и геологии месторождений полезных ископаемых ФГБУ «ВСЕГЕИ»
- Березину Алексею Васильевичу, доценту кафедры геологии месторождений полезных ископаемых
- Зятюку Владимиру Владимировичу, главному инженеру ООО «ЛИМС»
- Гузевой Алине Валерьевне, аспиранту СПбГУ
- Григорьяну Владимиру Николаевичу, специалисту по оборудованию физических методов анализа «Образовательный ресурсный центр по направлению химия»
- Шиловскому Владимиру Владимировичу, инженеру ресурсного центра «Геомодель»

1. Критерии типизации золотоносных руд

На ранних стадиях геологоразведочных работ одним из важнейших факторов прогнозирования способа обогащения является определение вещественного состава золотоносных руд.

Для разработки метода прогнозирования способа обогащения золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ было решено обобщить данные по 7 ранее изученным месторождениям (Албазино, Елочка, Капан, Невенрекан, Нежданинское, Тамуньер, Пещерный), на которых было отобрано 19 технологических проб. Ниже приводится более подробное их описание (рис.1). На изучаемых месторождениях проведены химические, петрографические, минералогические и электронно-микроскопические исследования технологических проб, а также технологические (гравитационные, флотационные и гидрометаллургические) опыты.

Проанализировав полученные результаты и литературные источники (Изоитко, 1997; Авдохин, 2006) были выделены важнейшие критерии, влияющие на способ обогащения, включающие изучение формы нахождения золота, гранулометрию, степень окисленности. Выполненный автором сравнительный анализ различных типов руд позволяет обосновать общие закономерности и выявить зависимости их технологических свойств от вещественного состава.

1.1 Характеристика изучаемых месторождений

Албазино – находится на левобережье р. Амгунь, в центральной части административного района им. П. Осипенко Хабаровского края. Месторождение расположено в приосевой части Омальского горст-антиклинория, который связан с глубокоэродированной палеокальдерной вулканоструктурой. Среди пород терригенного основания в структуре картируются многочисленные дайки и штоки интрузивных пород преимущественно умеренно-кислого состава. Несколько промышленных рудных зон приурочено к внутренней прибортовой части палеокальдеры, они локализуются в разломных структурах растяжения меридионального и северо-западного простирания. Наиболее значительные концентрации золота связаны с центральными частями ореолов березитизации, с линейными штокверками кварцевых и кварц-карбонатных прожилков с сульфидной минерализацией. Оруденение проявлено как в песчаниках, так и в дайках умеренно-кислого состава. Большая часть золота ассоциирована с арсенопиритом, незначительная часть имеет свободную форму. Кроме золота, в рудах в повышенных концентрациях отмечается серебро, мышьяк и сурьма. Оруденение отнесено к золото-сульфидно-кварцевой формации, золото-малосульфидному минеральному типу. На месторождении применяется схема обогащения: флотация с последующим сорбционным и автоклавным выщелачиванием (Трушин, 2018).



Рис. 1 Месторасположение изучаемых месторождений

Елочка – золото-серебряное месторождение, расположено на востоке Магаданской области примерно в 190 км к северу от поселка Эвенск. Руда относится к кварц-карбонатному вулканогенно-метасоматическому типу. Породообразующие минералы представлены кварцем, кальцитом и родохрозитом, содержание рудных минералов (сульфиды) составляет менее 2%. Родохрозит в карбонатных зонах является более поздним минералом относительно кальцита. Руды местами брекчированы и пересечены многочисленными жилами и прожилками кварцевого, карбонатного и кварц-карбонатного состава. На данный момент на объекте ведутся разведочные работы с оценкой запасов и выбора технологии переработки руды (Полиметалл, 2017).

Капан (Шаумянское) – расположено в городе Капан в юго-восточной части Армении примерно в 320 километрах южнее столицы Еревана. Минерализация месторождения характеризуется маломощными крутопадающими и простирающимся с востока на запад полиметаллическими жилами (Cu-Zn-Pb-Au-Ag), окруженными широкой зоной аргиллизита мощностью до 10-25 м. Минерализация включает в себя: сфалериты, пириты, халькопириты, галениты и борниты, а иногда минеральные ассоциации с тенантитом, тетраэдритом, ковеллином, Bi теллуридами и самородным золотом и серебром (Полиметалл, 2017).

Невенрекан – находится в Северо-Эвенском районе Магаданской области. Оруденение относится к эпitherмальной золото-серебряной формации. В пределах рудного поля было выделено пять рудоносных мегазон, вмещающих прожилково-жильные зоны с золото-серебряной минерализацией (Полиметалл, 2017).

Нежданинское – расположено в Томпонском районе на северо-востоке Якутии примерно в 480 километрах к востоку от Якутска. Вмещающие породы представлены нижне-верхнепермскими глинистыми сланцами и метаморфизованными алевролитами до стадии зеленых сланцев, переслаивающиеся с песчаниками, со значительным содержанием углерода. Тип минерализации – золото-полисульфидно-кварцевый. Месторождение состоит из крупных минерализованных зон, представленных зонами интенсивного брекчирования, состоящих из измельченных, сдвинутых, геотермально измененных осадочных пород, в разной степени обогащенных кварцем. Оруденение представлено двумя типами. На месторождении применяется метод гравитация/флотация с последующим автоклавным выщелачиванием (Perte, 2018).

Тамуньер – находится в 67 км к северу от г. Ивдель, Свердловская область. Месторождение приурочено к Тамуньерской брахиантиклинали, ядро которой сложено раннедевонскими вулканогенно-осадочными породами андезидацитового толщи, а краевые ее части – породами базальтовой толщи, которые рассматриваются в составе единого краснотурьинского базальт-андезит-трахибазальтового комплекса. Руды месторождения представлены прожилково-вкрапленной и гнездовой золото-сульфидной минерализацией, локализованной в метасоматитах, в основном на контактах субвулканического тела дацит-порфиров. Район характеризуется сложной тектонической обстановкой, метасоматиты месторождения частично рассланцованы и принадлежат к березит-лиственитовой формации (Нохрина, 2010).

Пещерное – расположено в Свердловской области вблизи Воронцовского месторождения. Месторождение Пещерный расположено в зоне разломов, штокообразные интрузивные тела, относятся к рудогенерирующему Ауэрбаховскому комплексу. Интрузивы имеют субмеридианальную вытянутость, которая свидетельствует о внедрении интрузивной магмы по тектоническим разломам глубокого заложения. Об этом же свидетельствуют крутые, вертикально уходящие на глубину субпараллельные контакты этих интрузивов. Оруденение на месторождение связывают с гидротермальным низкотемпературным метасоматозом золото-сурьмяно-мышьяково-ртутной формации областей позднепалеозойской тектономагматической активизации в шовных зонах долгоживущих глубинных разломов. Окисленное золото находится преимущественно в гематит-гидрогематите (Гриков, 2016).

1.2 Степень окисленности

Одним из важнейших признаков, влияющих на прогнозирование технологических параметров обогащения золотосодержащих руд, является степень окисленности рудных минералов (Изоитко, 1997).

По степени окисленности руды подразделяют:

- первичные (сульфидные) – не более 10%;
- частично окисленные (смешанные) – 10-50%;
- окисленные – более 50%;

Наибольшее промышленное значение имеют первичные руды, содержащие от десятых долей до 80-90% сульфидов. Частично окисленные руды наряду с первичными содержат как окисленные минералы железа и других металлов, так и сульфиды. Окисленные содержат в значительных количествах оксиды железа, а также оксиды других металлов. Сульфиды в них отсутствуют или присутствуют в незначительном количестве, не имеющем практического значения (Архипов, 2011).

Обобщая данные по изучаемым месторождениям, была построена таблица 1, которая классифицировала технологические пробы по степени окисленности.

Таблица 1

Классификация технологических проб по степени окисленности

Технологические пробы	Степень окисленности	
ТП-1 (Албазино)	Первичные	
ТП-2 (Албазино)		
ТП-3 (Албазино)		
ТП-4 (Албазино Фариды)		
ТП-5 (Албазино Фариды)		
ТП-1 (Елочка)		
ТП-2 (Елочка)		
ТП-3 (Елочка)		
ТП-1 (Шаумянское)		
ТП-1 (Невенрекан)		
ТП-2 (Невенрекан)		
ТП-1 (Нежданинское)		
ТП-2 (Нежданинское)		
ТП-3 (Нежданинское)		
ТП-4 (Нежданинское)		
ТП-1 (Тамуньер)		
ТП-2 (Тамуньер)		
ТП-3 (Тамуньер)		
ТП-1 (Пещерное)		Окисленные

Из полученной таблицы следует, что кроме единичной окисленной пробы на месторождение Пещерный, во всех других месторождениях присутствуют первичные руды, в которых содержание окисленных сульфидов составляет доли процента.

1.3 Формы нахождения золота

Изучение форм нахождения золота в месторождениях является также важной задачей для прогнозирования технологических параметров обогащения золотосодержащих руд, а также развивает учения о веществе рудных месторождений, закономерностях, условиях и механизмах его формирования (Изоитко, 1997).

Вследствие своей химической инертности золото обычно находится в рудах в виде самородного металла. В природных условиях золото содержится непосредственно в рудообразующей горной породе или в рудных минералах: арсенопирите, пирите, халькопирите и других сульфидах.

Различают следующие формы нахождения золота в коренных месторождениях:

- самородное свободное золото
- рассеянное в сульфидах тонкодисперсное золото
- теллуриды и селениды золота

Под термином «тонкодисперсное золото» понимают частицы золота от долей микрона до 10 микрон. Невидимая форма нахождения золота во вкрапленных сульфидных рудах связана с мелкокристаллическим арсенопиритом и тонкозернистым пиритом. Тонкодисперсное золото широко распространено в сульфидах как собственно золоторудных, так и колчеданных, медно-порфириновых и медно-никелевых месторождениях. Данные по распределению невидимого золота в рудах и отдельных минералах имеют большую ценность для разработки рациональных схем обогащения руд (Волков, 2007).

Теллуриды и селениды распространены гораздо шире, чем это представлялось раньше. Они выделяются в рудах исключительно в микроминеральной или даже наноминеральной форме. Те и Se, наряду с Bi, Sb, As имеют важнейшее значение для геохимии золота и серебра, их транспортировки и концентрации. Они являются также прямыми индикаторами скрытого золотого оруденения, причем наличие селенидов Bi или Ag свидетельствует о слабой эродированности объектов исследования (Савилова, 2016).

Основываясь на данной классификации была составлена таблица 2, характеризующая формы нахождения золота в изученных месторождениях. Для построения таблицы учитывалась степень окисленности рудных минералов.

Анализируя полученные результаты, следует, что в первичных рудах изучаемых месторождений золото находится преимущественно в свободной форме (Елочка, Невенрекан, Тамуньер) и арсенопирите (Албазино, Нежданинское), в меньшей мере

встречается в пирите и других различных сульфидах. Основная масса золота в окисленных рудах сосредоточена в окислах и гидроокислах (Пещерное), немного золота встречается в свободной форме и сульфидах. Для лучшей наглядности и удобства была построена гистограмма (рис. 2).

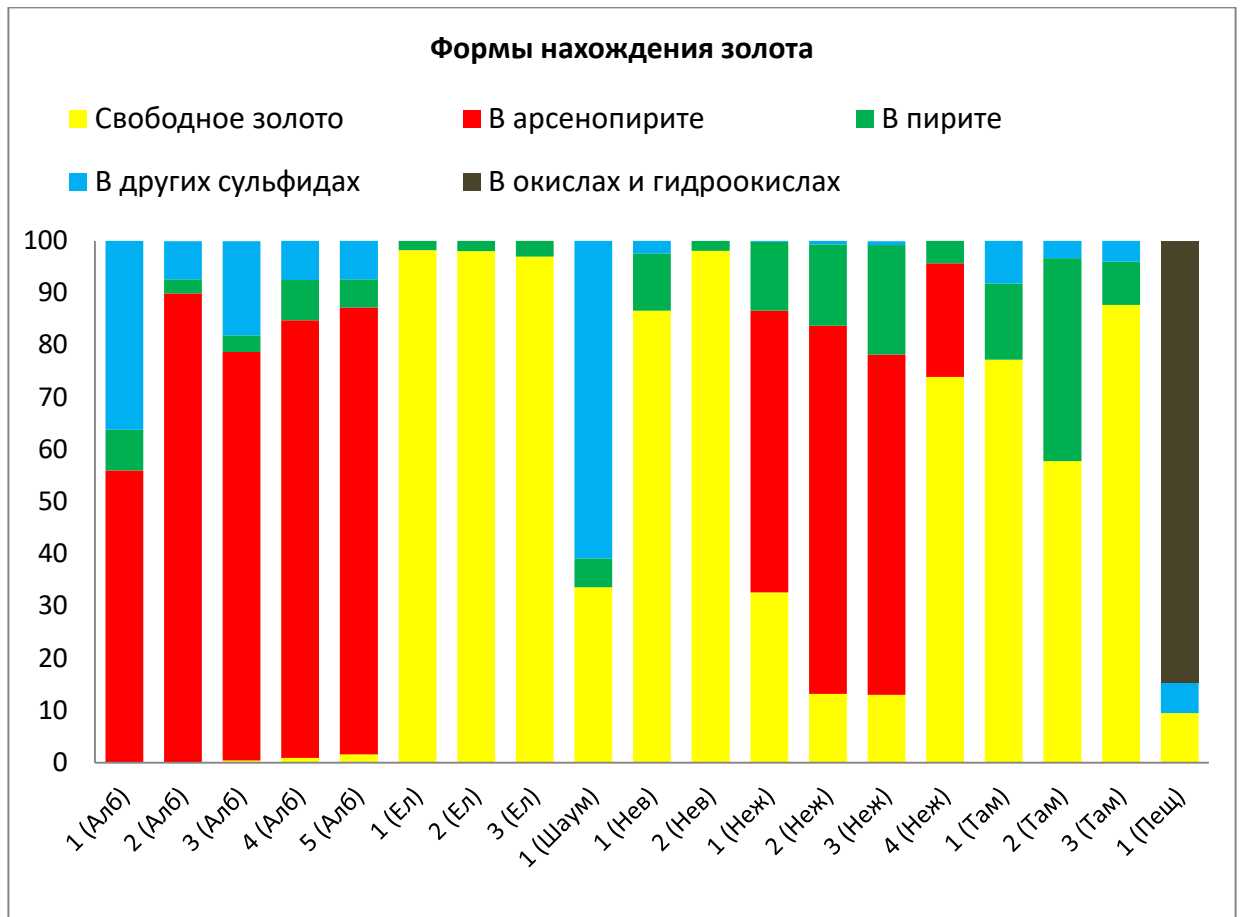


Рис. 2 Формы нахождения золота в изучаемых месторождениях (Алб-Албазино, Ел-Елочка, Шаум-Шаумянское, Нев-Невенрекан, Неж-Нежданинское, Там-Тамуньер, Пещ-Пещерное)

Таблица 2

Распределение золота	Другие сульфиды		Пирит		Арсенопирит		Свободное золото		Степень окисленности
	г/т	%	г/т	%	г/т	%	г/т	%	
ТП-1 (Албазино)	1,54	36,2	0,33	7,8	2,39	56	-	-	Первичные
ТП-2 (Албазино)	0,3	7,3	0,11	2,7	3,69	89,9	-	-	
ТП-3 (Албазино)	1	18	0,18	3,2	4,36	78,3	0,03	0,4	
ТП-4 (Албазино Фарида)	0,53	7,5	0,53	7,7	5,68	83,9	0,06	0,9	
ТП-5 (Албазино Фарида)	0,37	7,4	0,26	5,4	4,22	85,6	0,08	1,6	
ТП-1 (Елочка)	-	-	0,07	1,8	-	-	4,04	98,2	
ТП-2 (Елочка)	-	-	0,17	2	-	-	5,6	98	
ТП-3 (Елочка)	-	-	0,22	3	-	-	7,66	97	
ТП-1 (Шаумянское)	1,69	60,9	0,15	5,51	-	-	0,93	33,6	
ТП-1 (Невенрекан)	0,68	2,4	0,66	11	-	-	5,16	86,6	
ТП-2 (Невенрекан)	-	-	0,18	1,9	-	-	9,55	98,1	
ТП-1 (Нежданинское)	0,01	0,2	0,6	13,2	2,44	54	1,48	32,6	
ТП-2 (Нежданинское)	0,02	0,7	0,46	15,6	2,1	70,5	0,4	13,2	
ТП-3 (Нежданинское)	0,02	0,7	0,63	21	1,93	65,2	0,38	13	
ТП-4 (Нежданинское)	-	-	0,42	4,3	2,14	21,8	7,25	73,9	
ТП-1 (Тамуньер)	0,5	8,2	0,89	14,6	-	-	4,73	77,2	
ТП-2 (Тамуньер)	0,11	3,3	1,26	38,9	-	-	1,87	57,8	
ТП-3 (Тамуньер)	0,09	4	0,18	8,3	-	-	1,93	87,7	
Распределение золота	Сульфиды		Окислы и гидроокислы		Свободное золото		Окисленные		
	г/т	%	г/т	%	г/т	%			
ТП-1 (Пещерное)	0,2	5,9	3,02	84,6	0,34	9,5			

1.4 Гранулометрическая характеристика золота

Крупность золота — одно из его важнейших технологически свойств. Характер крупности и вкрапленности золота влияет на выбор методов и аппаратов для извлечения минеральных форм золота. Золото мелкое и крупное достаточно легко выделяется с применением гравитационных и флотационных методов. Тонкодисперсное и субмикроскопическое золото руд не раскрывается от сростков с другими минеральными формами даже при ультратонком измельчении. Руды с тонкодисперсным золотом называют упорными, для их обогащения применяют специальные методы переработки (Изоитко, 1997). В таблице 3 представлена классификация золота по классам крупности (Архипов, 2011).

Таблица 3

Классификация золота по классам крупности

Классы	Размеры, мкм
крупное	> 70
мелкое	70-1
тонкодисперсное	1-0,1
субмикроскопическое	<0,01

Для определения гранулометрической классификации золота на изучаемых месторождениях, была составлена таблица 4.

Таблица 4

Классификация золота по классам крупности на изучаемых месторождениях

Распределение самородного золота по размеру частиц, мкм	<10	10-50	50-100	>100
ТП-1 (Албазино)	84,3	15,7	-	-
ТП-2 (Албазино)	82,9	17,1	-	-
ТП-3 (Албазино)	88,5	11,5	-	-
ТП-4 (Албазино Фарида)	96,2	3,8	-	-
ТП-5 (Албазино Фарида)	97,6	2,4	-	-
ТП-1 (Елочка)	3,3	83,4	13,3	-
ТП-2 (Елочка)	5,1	82,9	13,2	-
ТП-3 (Елочка)	0,5	15,6	16,6	67,3
ТП-1 (Шаумянское)	26,2	73,8	-	-
ТП-1 (Невенрекан)	4,3	56,9	38,8	-
ТП-2 (Невенрекан)	0,4	24,5	32,1	42,9
ТП-1 (Нежданинское)	39,4	51,4	9,2	-
ТП-2 (Нежданинское)	26,2	66,7	-	7,1
ТП-3 (Нежданинское)	37,5	56	-	6,5
ТП-4 (Нежданинское)	34	44	18	4
ТП-1 (Тамуньер)	0,1	10,3	26,5	63,1
ТП-2 (Тамуньер)	2	39,8	9,9	48,8
ТП-3 (Тамуньер)	0,6	18,6	3,6	77,2
ТП-1 (Пещерное)	28,6	57,2	14,2	-

Для лучшей наглядности по данным таблицы была построена гистограмма (рис. 3). Из нее можно сделать выводы, что основная масса золота в изучаемых месторождениях представлена мелким классом (Албазино, Пещерный, Нежданинское). Только в некоторых пробах золото преимущественно находится в крупном виде (3 Елочка, Тамуньер)

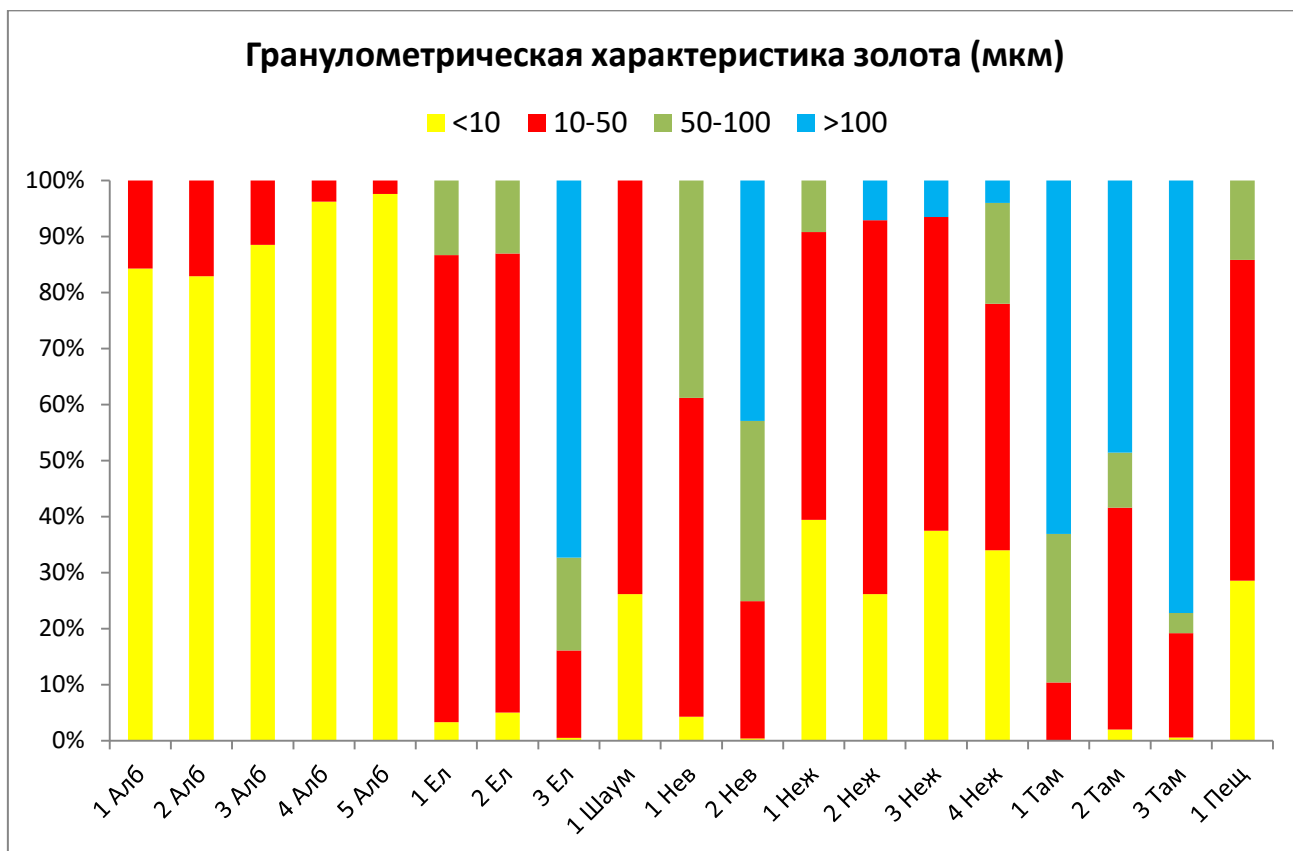


Рис. 3 Гранулометрическая характеристика золота на изучаемых месторождениях (Алб-Албазино, Ел-Елочка, Шаум-Шаумянское, Нев-Невенрекан, Неж-Нежданинское, Там-Тамуньер, Пещ-Пещерное)

1.5 Способ обогащения

После проведения химических, петрографических, минералогических и электронно-микроскопических исследований технологических проб на изучаемых месторождениях, были проведены технологические (гравитационные, флотационные и гидрометаллургические) опыты, с целью определения оптимальных схем обогащения. Полученные результаты представлены в таблице 5.

Оптимальный способ обогащения изучаемых технологических проб

Технологические пробы	Способ обогащения
ТП-1 (Албазино)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-2 (Албазино)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-3 (Албазино)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-4 (Албазино Фарида)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-5 (Албазино Фарида)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-1 (Елочка)	гидрометаллургический
ТП-2 (Елочка)	гидрометаллургический
ТП-3 (Елочка)	гравитационно-гидрометаллургический
ТП-1 (Шаумянское)	флотационный
ТП-1 (Невенрекан)	гравитационно-флотационный
ТП-2 (Невенрекан)	гравитационно-флотационный
ТП-1 (Нежданинское)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-2 (Нежданинское)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-3 (Нежданинское)	флотационно-гидрометаллургический
ТП-4 (Нежданинское)	гравитационно-гидрометаллургический
ТП-1 (Тамуньер)	гравитационно-флотационный
ТП-2 (Тамуньер)	гравитационно-флотационный
ТП-3 (Тамуньер)	гравитационно-флотационный
ТП-1 (Пещерное)	гидрометаллургический

Для всех проб месторождений Албазино и Нежданинское было установлено, что оптимальной схемой обогащения является флотационно-гидрометаллургическая. Для руд месторождений Тамуньер и Невенрекан наиболее эффективным оказался гравитационно-флотационный метод. Пробы с месторождений Елочка и Пещерное предпочтительно обогащать гидрометаллургическим способом. Флотационная схема является наиболее оптимальной для месторождения Шаумянское.

1.6. Обобщение критериев типизации золотоносных руд

На основании сопоставления полученных результатов (табл. 6) можно выявить главные критерии зависимости технологических свойств от вещественного состава, и решить какой метод обогащения будет первоочередным (табл. 7).

Результаты исследований показали, что взаимосвязь между генетическим типом руд и выбором схемой обогащения отсутствует.

Таблица 6

Схема обогащения	Проба	Форма нахождения, %			Гранулометрия, мкм				Степень окисленности	Генетический тип
		Свободное золото	Сульфиды		<10	10-50	50-100	>100		
гравитационно-флотационная	ТП-1 (Тамуньер)	77,2	22,8		0,1	10,3	26,5	63,1	первичные	золото-сульфидный
гравитационно-флотационная	ТП-2 (Тамуньер)	57,8	42,2		2	39,8	9,9	48,8		
гравитационно-флотационная	ТП-3 (Тамуньер)	87,7	12,3		0,6	18,6	3,6	77,2		
гравитационно-флотационная	ТП-1 (Невенрекан)	86,6	13,4		4,3	56,9	38,8	-		
гравитационно-флотационная	ТП-2 (Невенрекан)	98,1	1,9		0,4	24,5	32,1	42,9		
гравитационно-гидрометаллургическая	ТП-4 (Нежданинское)	73,9	26,1		34	44	18	4		золото-полисульфидно-кварцевый
гравитационно-гидрометаллургическая	ТП-3 (Елочка)	97	3		0,5	15,6	16,6	67,3		золото-серебряный
флотационная	ТП-1 (Шаумянское)	33,6	66,4		26,2	73,8	-	-		золото-полиметаллический
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-1 (Албазино)	-	100		84,3	15,7	-	-		золото-сульфидно-кварцевый
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-2 (Албазино)	-	100		82,9	17,1	-	-		
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-3 (Албазино)	0,4	99,6		88,5	11,5	-	-		
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-4 (Албазино)	0,9	99,1		96,2	3,8	-	-		
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-5 (Албазино)	1,6	98,4		97,6	2,4	-	-		
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-1 (Нежданинское)	32,6	67,4		39,4	51,4	9,2	-		золото-полисульфидно-кварцевый
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-2 (Нежданинское)	13,2	86,8		26,2	66,7	-	7,1		
флотационно-гидрометаллургическая	ТП-3 (Нежданинское)	13	87		37,5	56	-	6,5		
гидрометаллургическая	ТП-1 (Елочка)	98,2	1,8		3,3	83,4	13,3	-		золото-серебряный
гидрометаллургическая	ТП-2 (Елочка)	98	2		5,1	82,9	13,2	-		
Схема обогащения	Проба	Форма нахождения, %			Гранулометрия, мкм					Степень окисленности
		Свободное золото	Окислы, гидроокислы	Сульфиды	<10	10-50	50-100	>100		
гидрометаллургическая	ТП-1 (Пещерный)	9,5	84,6	5,9	28,6	57,2	14,2	-	окисленные	золото-сурьмяно-ртутный

Критерии типизации золотоносных руд

Схема обогащения	Форма нахождения, %			Гранулометрия, мкм,%			Окисленность	
	Свободное золото	Окислы и гидроокислы	Сульфиды	<10	10-50	>50	Первичная	Окисленная
Гравитационная	>80	-	-	-	-	>75	✓	-
Гравитационно-флотационная	>50	-	-	-	-	>20	✓	-
Флотационная	>30	-	-	-	>60	-	✓	-
Флотационно-гидрометаллургическая	-	-	>70	>85		-	✓	-
Гидрометаллургическая	>60	>70*	-	>80		-	✓	✓

*Применяется для окисленной руды

- Гравитационный метод.** Обобщая данные литературных источников и результаты изучения месторождений, можно сделать вывод, что применение только гравитационной схемы обогащения золотоносных руд может быть эффективно, если более 80% золота будет находиться в свободной форме, и более 75% частиц золота будет иметь размерность >50 мкм. В связи с тем, что такие условия в коренных месторождениях золота практически отсутствуют, применяют комбинированные схемы обогащения.
- Гравитационно-флотационный метод.** Проанализировав данные изучаемых месторождений, можно сделать вывод, что применение гравитационно-флотационного метода обогащения будет эффективно при условии, если количество золота в свободной форме составит >50%, а гранулометрические характеристики будут соответствовать следующим размерностям: количество частиц >50 мкм составляет более 20%. Главной целью метода является выведение из руды крупного и среднего свободного золота в концентраты. Несомненно, что обогащение золотоносных руд, не выполняющих данные критерии, также возможно. Однако в результате гравитационного обогащения таких руд в концентрате будут накапливаться минералы носители (сульфиды), и получать гравитационный концентрат с высокими содержаниями и приемлемым извлечением будет затруднительно.
- Флотационный метод.** Факторами, влияющими на благоприятный исход флотационного метода, являются: первичные руды, гранулометрия золота > 60% в пределах 10-50 мкм, нахождения золота (более 30%) в свободной форме. Данные показатели показывают оптимальную схему обогащения. Присутствие золота в окисленной руде, в более мелкой размерности, а также имеющего более тесную связь с сульфидными (как носитель «невидимого» золота), мешает максимально эффективному извлечению золота методом флотации. Качество таких концентратов будет не высоким, но допустимым для дальнейшего обогащения сульфидных концентратов.

- **Флотационно-гидрометаллургический метод.** Золото, содержащееся в сульфидах (> 70% объёма при размерности 10-50 мкм >85%), обычно является упорным, поэтому такую руду предварительно обогащают методом флотации или гравитации для дальнейшей переработки (окислительный обжиг, автоклавное выщелачивание или бактериальное окисление). Однако присутствие золота размерностью менее 50 мкм в трещинах сульфидов обеспечивает достаточную проницаемость руд для цианистых растворов, а отсутствие крупного самородного золота (зерна крупнее 50 мкм составляют более 30% объёма) обуславливает его полное растворение.
- **Гидрометаллургический метод.** Применение данного метода покажет высокую эффективность при условии, что руда будет первичной (более 60% золота будет находиться в свободной форме) или окисленной (более 70% золота будет находиться в окислах и гидроокислах), а более 80% частиц золота будет иметь размерность менее 50 мкм. Также положительным фактором обогащения является присутствие золота в трещинах сульфидов.

2. Изучение геологического строения и вещественного состава проб рудопроявления Сикакангас (Sikakangas)

2.1. Геологическое строение региона

Фенноскандинавский (или Балтийский) щит является самым крупным выходом фундамента Восточно-Европейской платформы и расположен в северо-восточной ее части. По возрасту и особенностям формирования континентальной коры в строении Фенноскандинавского щита (рис. 4) с северо-востока на юго-запад выделяются провинции: Мурманская, Кольская, Норботтен, Беломорская, Карельская, Свекофеннская и Свеконорвежская (Егорова, 2017).

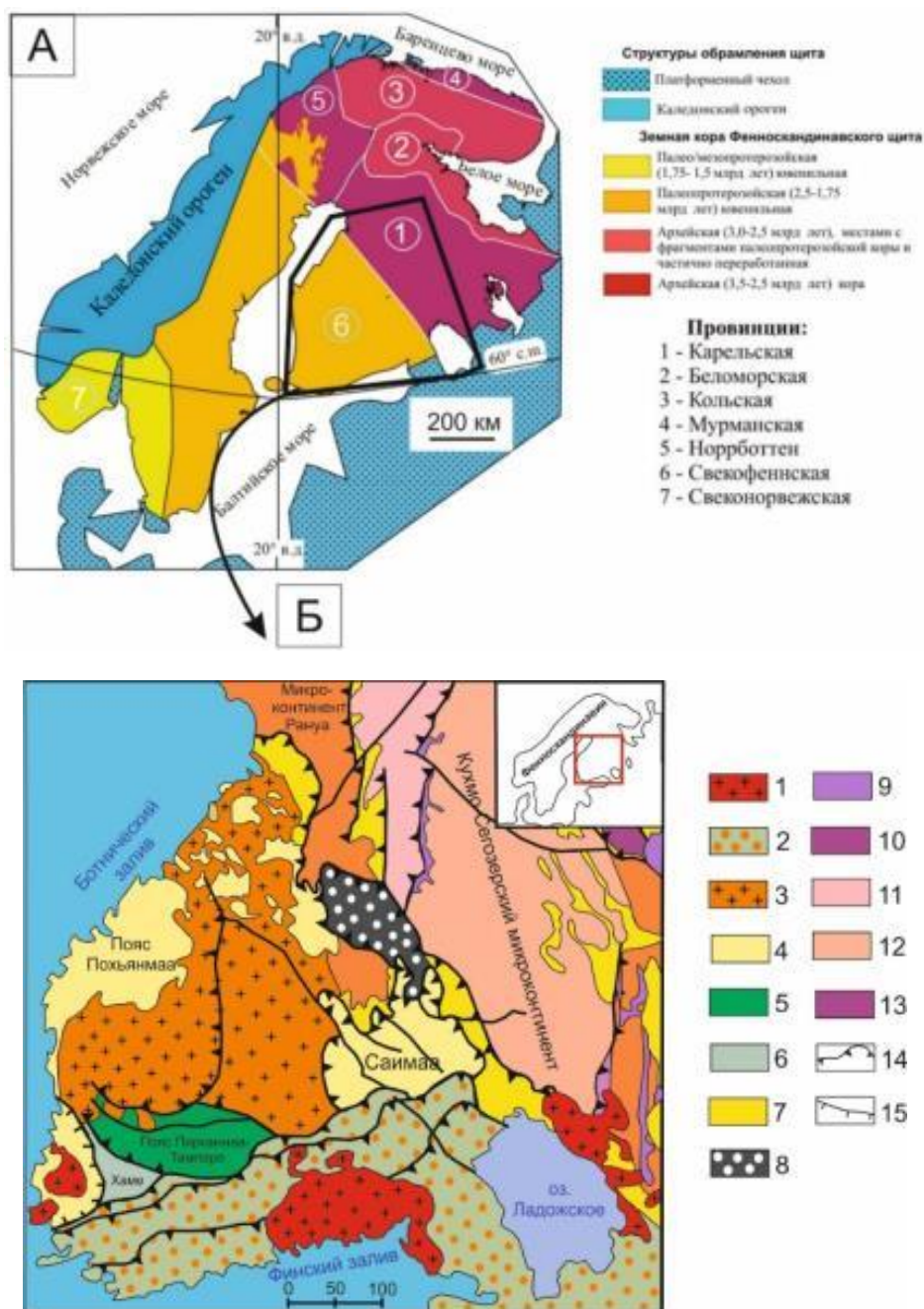


Рис. 4 Схема тектонического районирования Фенноскандинавского щита (А) и главные тектонические единицы его юго-восточной части (Б) (Слабунов, 2008; Минц, 2018)

Б. 1–7 – палеопротерозой: 1 – граниты-рапакиви, 2 – Южно-Финляндский гранулитогнейсовый пояс (гнейсы гранулитовой и амфиболитовой фации, граниты), 3 – Центрально-Финляндский гранитоидный комплекс, 4–7 – вулканогенно-осадочные пояса: 4 – Похьянмаа, Саво, Саимаа, 5 – Пирканмаа-Тампере, 6 – Хаме, 7 – Ладога-Ботнический (пассивная окраина Карельского кратона); 8–13 – архей: 8 – гранулитогнейсовый пояс Варнаисъярви, 9 – зеленокаменные пояса (Суомуссалми-Кухмо-Типасъярви и др.), 10–13 – микроконтиненты (гранит-зеленокаменные области): 10 – Рануа, Иисалми и Водлозерский, 11 – Кианта, 12 – Кухмо-Сегозерский, 13 – Ковдозерский. 14–15 – тектонические границы: 14 – надвиги и взбросо-надвиги, 15 – сбросы.

Данные провинции разделены глубинными разломами или швами, по которым они были спаяны. Каждый из блоков имеет индивидуальную внутреннюю структуру, а часто и вещественный состав, дисгармонирующий со смежными тектоническими единицами.

Карельская провинция расположена в юго-восточной части Фенноскандинавского щита и сложена главным образом архейскими гранитоидными, зеленокаменными и парагнейсовыми комплексами, в подчиненном количестве представлены высокометаморфизованные (гранулитовые) комплексы. Карельская провинция объединяет в своем составе несколько крупных террейнов палео-, мезо- и неoarхейского возраста, каждый из которых характеризуется особенностями эволюции земной коры (Егорова, 2017).

Мурманская провинция расположена в крайней северо-восточной части Фенноскандинавского щита и протягивается в северо-западном направлении на 600 км в виде полосы шириной 60-70 км. Основную часть провинции (до 80%) составляют тоналиты и плагиограниты, возраст которых не превышает 3 млрд лет, диорит-плагиограниты и анатектит-граниты, в значительно меньшем объеме представлены ксенолиты гнейсов, эндербитов (с возрастом около 2.8 млрд лет) и чарнокитов. Наиболее молодыми образованиями Мурманской провинции являются палингенно-метасоматические граниты, занимающие в настоящее время обширные площади, дайки и интрузии комплекса габброноритов-габбро-лабрадоритов и массивы субщелочных гранитов. Палеопротерозойский и палеозойский этапы в пределах Мурманской провинции связаны с обширным проявлением внутриплитного магматизма и характеризуются внедрением роев даек базитов, широко распространенных по всей площади провинции, а также с формированием небольших интрузий щелочно-ультраосновных пород (Егорова, 2017).

Провинция Норботтен - наиболее слабо изученная, в связи с плохой обнаженностью, расположена в северной части Фенноскандинавского щита и представляет собой тектонический коллаж из пластин архейского и палеопротерозойского возраста. Наиболее древние с возрастом 3.2 млрд лет комплексы провинции Норботтен установлены

на северо-западе структуры и представлены ортогнейсами. Возраст фрагментов зеленокаменных и парагнейсовых комплексов, установленных среди гнейсов, составляет 2.9-2.8 млрд лет. Преобладающими в строении провинции являются неоархейские (с возрастом 2.8-2.72 млрд лет) ортогнейсы и гранитоиды. Возраст наиболее молодых архейских образований, представленных лейкогранитами и жилами пегматитов оценивается в 2.7-2.6 млрд лет (Егорова, 2017).

Кольская провинция расположена в северо-восточной части Фенноскандинавского щита и охватывает преобладающую часть Кольского полуострова, представляет собой сложный тектонический ансамбль, сформировавшийся в палеопротерозое в связи с развитием Лапландско-Кольского орогена и является его северо-восточным форландом. Преобладающими в строении Кольской провинции являются не претерпевшие существенных изменений в постархейское время мезо- и неоархейские гранатбиотитовые парагнейсы и гранитогнейсы, гранулиты, эндрбиты и гиперстеновые диориты Кольско-Норвежского террейна и интенсивно метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации в период 1.97-1.93 млрд лет неоархейские гранитогнейсы, кислые метавулканиды, щелочные граниты, парасланцы, кварциты и конгломераты Кейвского террейна (Егорова, 2017).

Беломорская провинция располагается между Карельской и Кольской провинциями и представляет собой докембрийский полиметаморфический складчатый пояс, породы которого неоднократно метаморфизованы в условиях высокого давления, как в архее, так и в протерозое. В палеопротерозое Беломорская провинция входила в состав Лапландско-Кольского орогена и выступала его юго-западным форландом (Егорова, 2017).

Свеконорвежская провинция расположена в западной части Фенноскандинавского щита и характеризуется развитием ювенильной континентальной коры палео- и мезопротерозойского возраста. От соседней Свекофеннской провинции она отделена протяженным Транскандинавским поясом (Егорова, 2017).

Свекофеннская провинция представляет собой палеопротерозойский 1.9-1.8 млрд лет ороген, сложенный палеопротерозойскими вулканно-плутоническими и осадочными породами. В составе Свекофеннской провинции отсутствуют породы архейского возраста, а наиболее древними (с возрастом 1.92 млрд лет) являются риолиты из бимодального комплекса примитивной вулканической дуги, развитой в районе Пюхисалми. Преобладающими в пределах Свекофеннской провинции являются гранитоиды (тоналитовые гнейсы с возрастом 1.92 млрд лет, тоналит-гранодиоритовые комплексы с возрастом 1.90-1.86 млрд лет, гранитоиды с возрастом 1.83-1.77 млрд лет, граниты-рапакиви с возрастом 1.64-1.47 млрд лет), в меньшей степени представлены сланцы и гнейсы. Супракрупальные образования, формирующие около 30 % от общего объема пород, представлены

метатурбидитами, которые содержат метаморфизованные черные сланцы и метавулканы мафитового состава. В пределах Свекофеннской провинции выделяется два этапа метаморфизма: раннесвекофеннский (с возрастом 1.89-1.87 млрд лет) и познесвекофеннский (с возрастом 1.83- 1.79 млрд лет). Условия метаморфизма достигали амфиболитовой и гранулитовой фаций (Егорова, 2017).

Исследуемое рудопроявление Сикакангас (Sikakangas) расположено в Свекофеннской провинции, сланцевом поясе Похьянмаа. Сланцевый пояс можно разделить на 3 структурные подразделения (Рис. 2). Северная часть состоит из гранитного комплекса Вааса (1,88-1,87 млрд. лет), средняя - из сланцевого пояса Похьянмаа (1,90–1,87 млрд лет), а южная часть представлена Центрально-Финляндский гранитоидным комплексом (Isomaа 2010).

Гранитоидный комплекс Вааса (Vaasa) расположен в западной части Финляндии вокруг города Вааса, и охватывает площадь 7000 км². Комплекс Вааса представлен батолитом, который кристаллизовался 1,88-1,87 млрд лет назад во время кульминации свекофеннского орогенеза. Комплекс в основном сложен гранодиоритами, но также встречаются граниты и толеиты (Рекка 2008).

Центрально-Финляндский гранитоидный комплекс (ЦФГК) представляет собой полого лежащее силлообразное тело, мощность которого варьирует от 10 до 20 км. Изотопно-геохронологические данные фиксируют в гранитоидах свидетельства корового источника с возрастом ~2,1–2,0 млрд лет. В составе комплекса преобладают «синорогенные» известково-щелочные гранодиориты, тоналиты, граниты, монцониты и сиениты и их метаморфизованные аналоги, датированные 1,89– 1,87 млрд лет. Принято выделять «синкинематические» (~1,89–1,88 млрд лет) и «посткинематические» (~1,89–1,87 млрд лет) интрузивы. Посткинематические гранитоиды демонстрируют признаки 40 бимодальной (мафитовой-фельзической) магматической ассоциации, типичной для обстановок растяжения. Петрологические и геохимические данные свидетельствуют, что посткинематические гранитоиды кристаллизовались из «сухих» высокотемпературных магм А-типа и/или магм чарнокит-эндербитовой серии (Минц, 2018).

Сланцевый пояс Похьянмаа (Pohjanmaa) приблизительно овальной формы протяженностью около 180 км образован метаосадками, датированными 1,90–1,87 млрд лет: граувакками, кварцитами, песчаниками, слюдяными сланцами, графит- и/или сульфидсодержащими сланцами и парагнейсами с линзами и прослоями амфиболитов (мафитовых метавулкаников). Литологические и геохимические характеристики предполагают формирование пород в задуговом или междуговом бассейне (Минц, 2018).

Типичными минерализациями, встречающимися в южной и восточной части пояса, являются Sb, Au, Li, Sn, Nb-Ta, W, Ti и P (Isomaa, 2010).

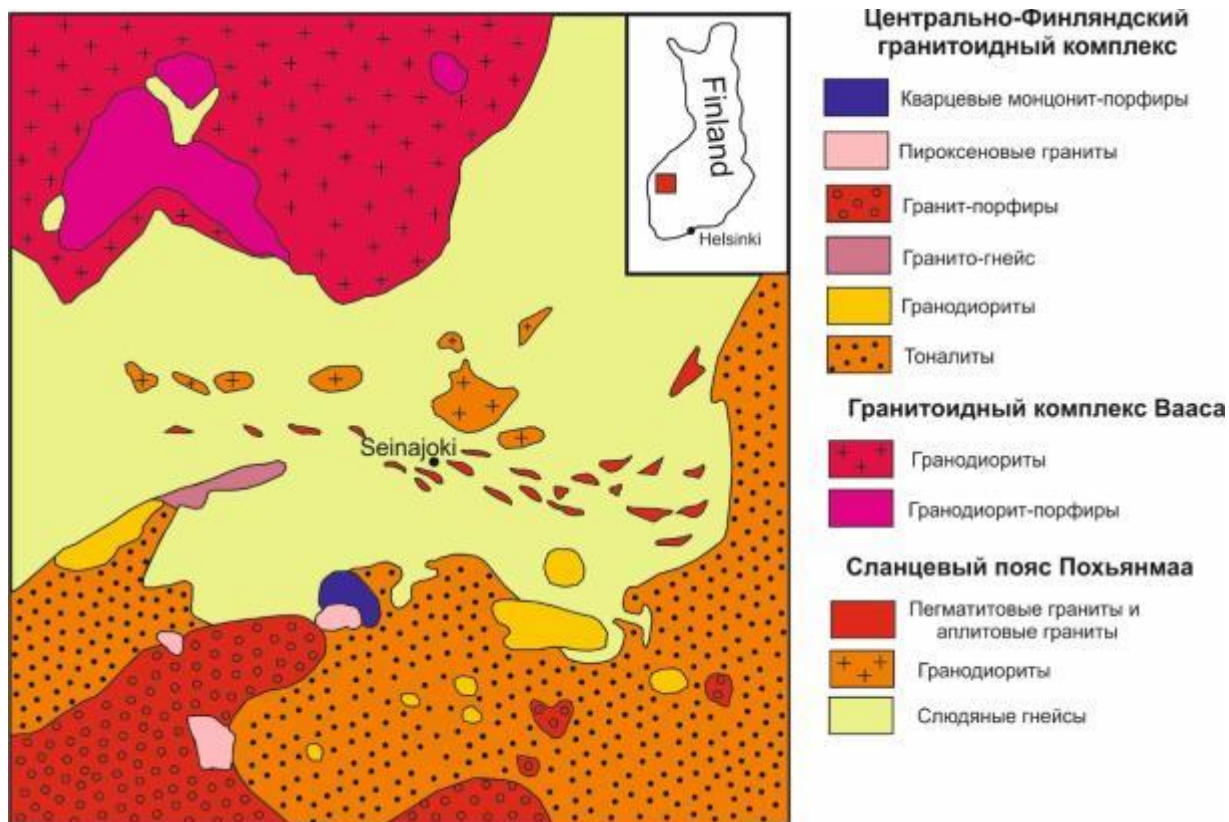


Рис. 5 Схема геологического строения Сланцевый пояс Похьянмаа

Свекофеннская эпоха развития области в целом характеризуется несколькими этапами рудогенеза, в результате которых были сформированы разные по генезису и масштабам месторождения золота. Систематизировав большое количество фактических и литературных данных, В.И. Иващенко (2007) выделил основные генетические типы золоторудной минерализации Свекофенского складчатого пояса: 1-орогенный мезотермальный; 2-порфировый (intrusion-related); 3-колчеданный; 4-эпитермальный. (Ларионова, 2008)

По литературным данным исследуемое рудопроявление Сикакангас относится к орогенно-мезотермальному генетическому типу (Eilu, 2010). Под термином «месторождения орогенного мезотермального типа», предложенного Д.И Гроувсом с соавторами, понимается широкая группа месторождений и рудопроявлений золота, основные черты которых сведены в таблице 8 (Ларионова, 2008).

Основные характеристики месторождений золота мезотермального орогенного типа

<i>Время формирования</i>	От архея до фанерозоя
<i>Рудовмещающие породы</i>	Метаморфизованные (от зеленосланцевой до гранулитовой фации) вулcano-плутонические комплексы, осадочные породы
<i>Рудоконтролирующие структуры</i>	Региональные тектонические нарушения, сдвиговые зоны
<i>Иные названия данного типа месторождений в мировой литературе</i>	Mesothermal gold, metamorphic gold, gold-only, lode gold, shear-zone hosted, structurally-controlled deposits, greenstone-hosted
<i>Морфология и тип рудных тел</i>	Жильные тела разнообразной морфологии, жильные зоны, пластообразные тела и залежи.
<i>Гидротермальные изменения околорудных пород</i>	Карбонатизация, сульфидизация, серицитизация, щелочной метасоматоз
<i>Жильные минералы и минералы зоны околорудных метасоматитов</i>	Кварц, кальцит, доломит, анкерит, полевые шпаты, актинолит, серицит, фуксит, турмалины, хлорит, эпидот; Амфибол, диопсид, гранат для амфиболовой и гранулитовой стадии метаморфизма
<i>Пробность Au</i>	750-990
<i>Au:Ag</i>	10:1, 5:1, редко 1:1
<i>Типичные рудные минералы – спутники</i>	Пирит, пирротин, магнетит, халькопирит, галенит, сфалерит, молибденит, арсенопирит, шеелит
<i>T-P условия рудного процесса</i>	В среднем 350-250 ⁰ С при давлении 1-3 кбар; для наиболее малоглубинных месторождений - 150 ⁰ С и 0.5 кбар; для наиболее глубинных – более чем 5 кбар и 700 ⁰ С
<i>Формы переноса золота</i>	Бигидросульфидный комплекс Au(HS) ₂ ⁻ и моногидросульфидный комплекс Au(HS)
<i>Примеры месторождений</i>	Колар (Индия), Голден Майк, Калгурли (Австралия), Доум, Кампбелл-Рэд Лэйк, Сигма (Канада), Мурунтау (Узбекистан), Сухой Лог, Олимпиада (Россия)

Для месторождений мезотермального орогенного типа предлагалось множество гипотез образования: магматогенно-гидротермальная, метаморфогенно-гидротермальная, осадочно-гидротермальная, метеорная. В последнее время наиболее широкое развитие получила гипотеза о метаморфогенном генезисе золоторудной минерализации, согласно которой в процессе метаморфизма из пород амфиболитовой фации золото выносится флюидами по тектоническим сдвиговым зонам и отлагается среди вышезалегающих пород зеленосланцевой фации (Ларионова, 2008).

Помимо этого в рудном районе Сейняйоки открыт новый минерал, состав которого выражается формулой Sb_2AsS_2 . Минерал назван пяккёненитом, в память о недавно умершем финском геологе Вейкко Пяккёнене, внесшем большой вклад в изучение месторождений этого района. В ходе изучения флюидных включений была выяснена основная причина формирования уникальных сурьмяных руд рудопроявления Сейняйоки с необычной

минеральной ассоциацией (пьяккёненит и сейняйокит) – низкая активность серы в рудообразующих растворах (Балицкий, 1975).

2.1.1 Геологическое строение рудопроявления Сикакангас (Sikakangas)

Рудопроявление Сикакангас (Sikakangas) расположено в западной части Финляндии, в провинции Этеля Похьянмаа вблизи города Сейняйоки (Рисунок 6). С геологической точки зрения район Сейняйоки представлен орогенно Au±Sb минерализацией. О наличие самородной сурьмы было известно еще с 1950-х годов, однако о присутствии золота узнали в конце 80-х годов. Рудопроявление Сикакангас было открыто в 1989 году (Isomaa, 2010).

Помимо изучаемого рудопроявления в районе Сейняйоки насчитывается около 10 недостаточно изученных золотых минерализаций. Одним из них является золотая минерализация Тулисильма, расположенная в 1 км к северо-востоку от Сикакангас. Корреляция между Au-минерализациями Тулисильма и Сикакангас не изучена, но, согласно увеличению Au в нескольких скважинах между областями, они могут быть взаимосвязаны (Isomaa, 2010).

Исследуемая территория находится в лесной местности на небольшом холме, примерно в 10 км к югу от центра города. Разведанная площадь составляет около 2х2 км² (Isomaa, 2010).

Сикакангас расположен в области с пологими мелководными моренными холмами и заболоченной землей между ними. Коренные породы довольно хорошо обнажены в северной части, однако в южной вскрыша увеличивается до 5 метров. Толщина торфа в заболоченной местности колеблется в пределах 3-5 метров. Исследуемая площадь в основном лежит на высоте 80 м над уровнем моря, а вершина холма находится на высоте 95,2 м над уровнем моря. Рудопроявление находится недалеко от контакта пояса Похьянмаа и Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса (Isomaa, 2010).

Коренные породы Сикакангаса представлены уралит-плагиоклазовыми порфиритами датированными 1,89 млрд. лет. Однако изучаемые керновые образцы с рудопроявления Сикакангас, не позволяют идентифицировать так горную породу. В ходе петрографических исследований было установлено, что породы представлены амфибол-биотитовым плагиогнейсом (см. гл. 2.3). Образование плагиогнейса рассматривается как силл в метаосадочных слюдяных гнейсах. По данным геофизики и бурения нижний контакт его плавно погружается на юг, мощность его изменяется от 44.8м на севере до 130 м в южной части (Isomaa, 2010).

В плагиогнейсе наблюдается локально биотитизация, а также наличие кварцевых жил, вторичными минералами являются хлорит и карбонаты. Часто вокруг кварцевых жил наблюдается сульфидная минерализация. В соответствии с химическим составом

плаггиогнейс представлен гранодиоритом, который без четких контактов сменяется уралитовыми плаггиогнейсами и менее распространенными кварцевыми плаггиогнейсами (Isomaa, 2010).

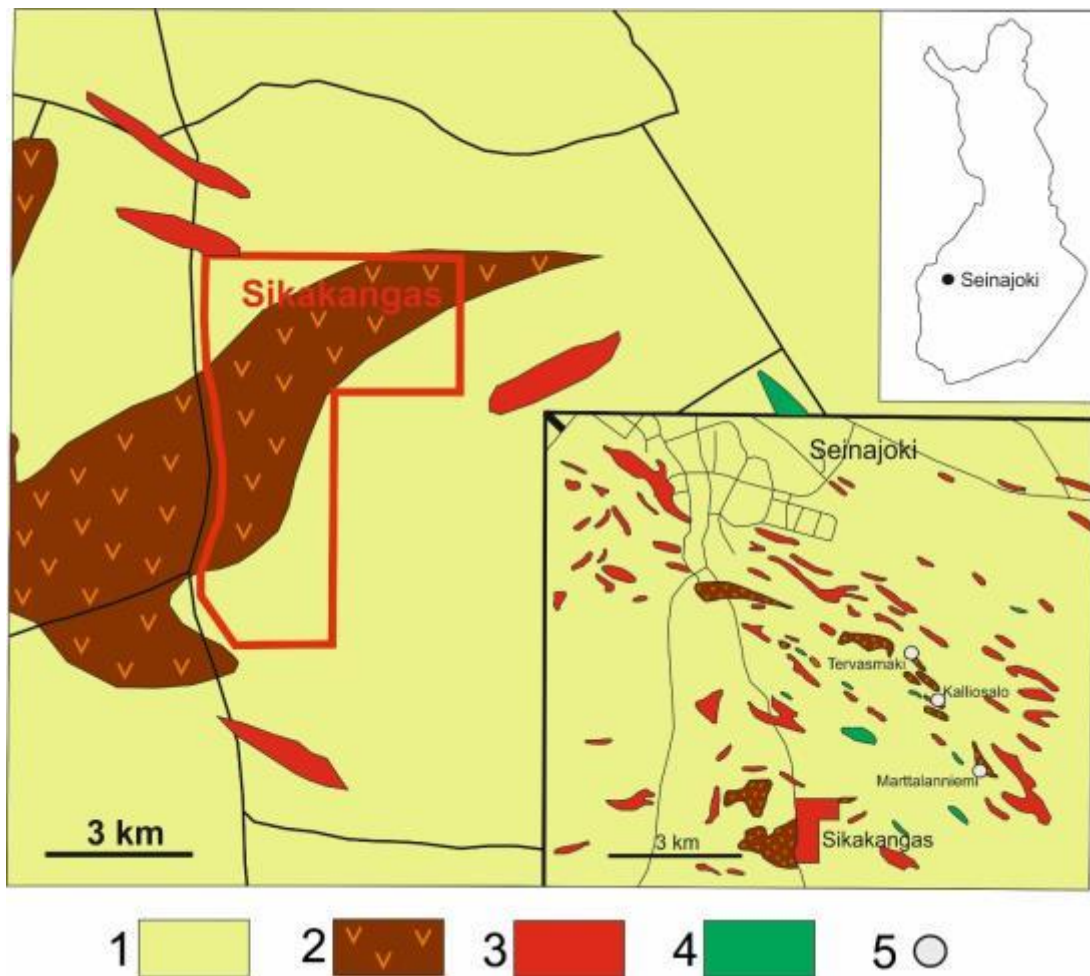


Рис. 6 Схема геологического строения южной части города Сейняйоки. (1 – слюдяные сланцы и гнейсы, 2 – амфибол-биотитовый плаггиогнейс, 3 – пегматиты, 4 – амфиболиты, 5 – золотые минерализации)

Слюдяными гнейсы представлены мигматитами, мигматитовыми гнейсами. Кроме того, порфириты и слюдяные гнейсы прорваны гранитными пегматитами и амфиболитами (Lehtonen, 2005).

Наиболее распространенными рудными минералами являются арсенопирит, пирротин, пирит и местами халькопирит. Золото встречается в кварцевых жилах преимущественно в арсенопирите, и иногда в виде очень мелких зерен. По подсчетам «ГТК» руды Сикакангаса содержат 220 кг золота. Второстепенными минералами являются ильменит, леллингит, галенит, сфалерит (Isomaa, 2010).

2.2. Химический состав проб рудопроявления Сикакангас

Для выполнения химических анализов средней пробы рудопроявления Сикакангас были подготовлены аналитические навески. Пробоподготовка выполнялась автором в лаборатории ООО «ЛИМС». Исходная проба S-1 массой 30 кг была предварительно

измельчена до крупности -1+0 мм, затем тщательно перемешивалась, после чего выделена навеска 1 кг. Далее данная навеска измельчалась до крупности 200 меш. и было отквартовано 200 г для химических исследований. (Приложение 1)

Истертые пробы делились на 4 части – для силикатного анализа (50 г), анализа ICP-MS на микроэлементы (50 г), атомно-абсорбционного пробирного анализа на благородные металлы (100 г).

Помимо этого, было подготовлено 4 аналитической навески (50 г) из керновых образцов рудопоявления Сикакангас (КО-1, КО-2, КО-3, КО-4) массой 1 кг для анализа содержания микрокомпонентов на приборе ICP-AES. Пробоподготовка проходила аналогичным способом.

2.2.1 Макрокомпонентный состав средней пробы

Определение макрокомпонентного состава было выполнено на приборе ARL-9800 методом рентгено-спектрального флуоресцентного анализа (РСФА) в Центральной аналитической лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» им. А. П. Карпинского. РСФА выполнялся из плавленных таблеток: проба смешивалась с флюсом (50 % метабората лития и 50 % тетрабората лития) в отношении 1:9; далее смесь плавилась в золото-платиновых тиглях на установке «Qasse Fluxer-Bis» фирмы «Claisse Fluxer» (Канада). Результаты силикатного анализа приведены в табл. 9.

Таблица 9

Макрокомпонентный состав средней пробы (%)

Оксид	S-1	Оксид	S-1
SiO ₂	65,9	K ₂ O	2,38
Al ₂ O ₃	15,2	P ₂ O ₅	0,091
TiO ₂	0,42	Fe ₂ O ₃	0,92
MnO	0,077	FeO	4,75
MgO	2,31	Na ₂ O	3,5
CaO	3,65	п.п.п.	0,8
Сумма	100		

На основании полученных результатов силикатного анализа были посчитаны петрологические параметры пробы S-1 (табл. 10).

Таблица 10

Петрологические параметры пробы S-1

Проба	Na ₂ O+K ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O	A/NK	A/CNK
S-1	5,88	1,47	2,6	1,6
Na ₂ O+K ₂ O – щелочность общая Na ₂ O/K ₂ O – тип щелочности			A/NK=(Al ₂ O ₃ /Na ₂ O+K ₂ O) A/CNK=(Al ₂ O ₃ /CaO+Na ₂ O+K ₂ O)	

На TAS-диаграмме (рис.7) фигуративная точка химического состава средней пробы S-1 попадает в поле гранодиоритов.

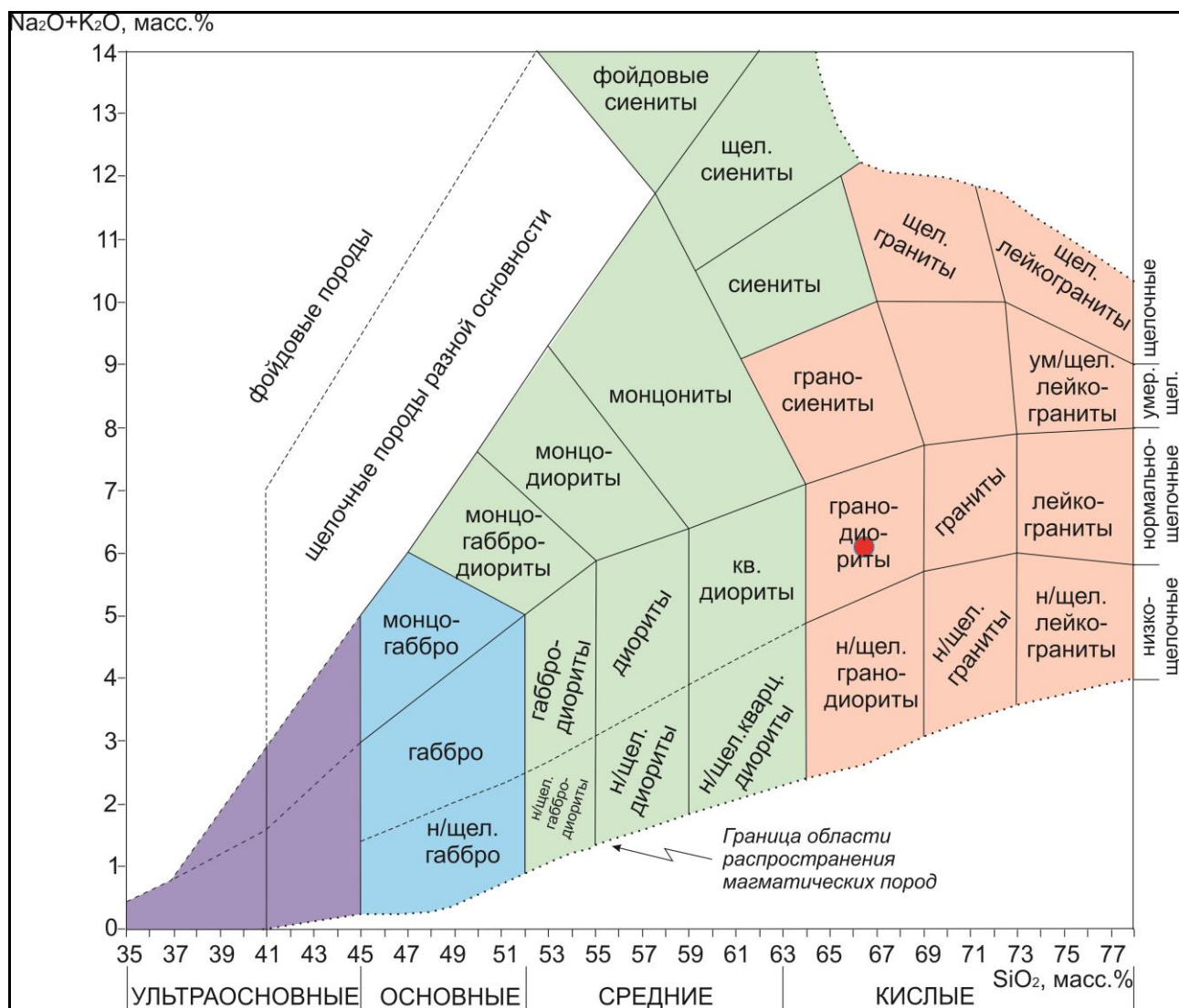


Рис. 7 Положение фигуративной точки химического состава пробы S-1 на TAS-диаграмме

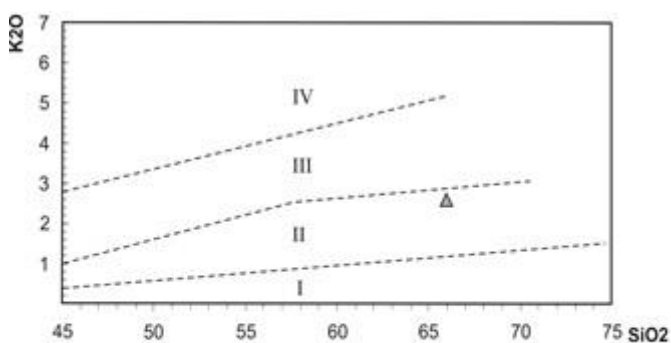


Рисунок 8 Положение средней пробы S-1 месторождения Сикакангас на диаграмме Уайтфорда.
Серии пород: I – толенитовая; II – известково-щелочная; III – высококальциевая; IV – щелочная.

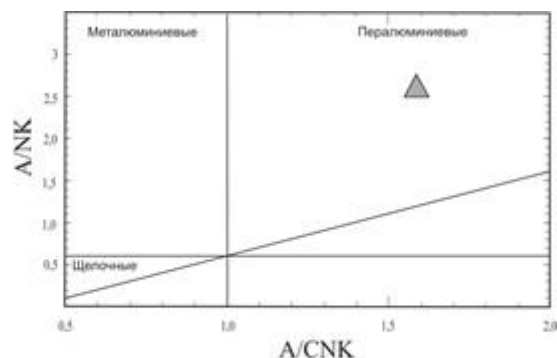


Рисунок 9 Диаграмма в координатах A/NK (Al_2O_3/Na_2O+K_2O) – A/CNK ($Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$) для средней пробы S-1 месторождения Сикакангас.

На диаграмме Уайтфорда (рис.8) средняя проба S-1 рудопроявления Сикакангас попадает в точку в области известково-щелочной серии. На диаграмме в координатах A/NK –

A/CNK (рис.9) фигуративная точка пробы S-1 попадает в точку в области пералюминиевых (высокоглиноземистых) пород.

2.2.2 Микрокомпонентный состав средней пробы (ICP-MS)

Определение микроэлементов произведено масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в Центральной аналитической лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» им. А. П. Карпинского на приборе ELAN-DRC-6100 под руководством В.Л. Кудряшова. Подготовка пробы к анализу включает предварительное ее высушивание (105°C), взятие аналитической навески и разложение её в HCl в присутствии HNO₃, затем плавиковой кислотой, далее производится упаривание с отгонкой фтора при добавлении HClO₄ до влажных солей, после чего идет выщелачивание 6-нормальной HCl и доведение до требуемого объема (100 мл) деионизированной водой. Результаты ICP-MS определения микроэлементов приведены в табл. 11.

Таблица 11

Микрокомпонентный состав средней пробы (г/т)

Элемент	S-1	Элемент	S-1
Li	26,5	Cr	41,5
Sc	8,06	Rb	62,6
Co	9,12	Sr	402
Ni	9,86	Y	9,09
Cu	27,2	Zr	157
Zn	102	Nb	9,43
As	4630	Mo	1,56
Sb	48,4	Sn	2,12
Te	<0.2	Ta	0,66
Re	<0.005	W	4,41
Pb	24,7	Th	2,77
Bi	0,28	U	1,04
V	48,8	Be	1,31
Ba	344	Fe	35 292
Ga	29	Mn	437

По результату анализа средней пробы рудопроявления Сикакангас, было выявлено повышенное содержание мышьяка и сурьмы. Повышенное содержание данных элементов объясняется наличием в пробах самородной сурьмы, арсенопирита и леллингита.

2.2.3 Микрокомпонентный состав керновых образцов (ICP-AES)

Определение микроэлементов произведено атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) на базе ресурсного центра по направлению химия СПбГУ на приборе Shimadzu ICPE 9000 под руководством В.Н. Григоряна. Разложение проб

и приготовление холостой пробы осуществлялось в микроволновой печи минерализаторе по методике М-МВ-80-2008 (см. таблицу 12).

Таблица 12

Методика для валового разложения проб

Стадия	Масса навески, г	Реагенты	Объем, см ³	Температура, °С	Мощность, Вт	Давление, кПа (бар)	Время, мин
I	0,5	HNO ₃ конц.	5	210	1200	17500 (175)	20
		HF конц.	4				
		HCl конц.	1				
		H ₂ O	10				
II		H ₃ BO ₃ (4%)	30	170	1200	10000 (100)	5

Данный способ подготовки проб в закрытой посуде под воздействием микроволнового излучения позволяет избежать потерь летучих компонентов. Результаты ICP-AES определения микроэлементов приведены в табл. 13.

Таблица 13

Микрокомпонентный состав керновых образцов (г/т)

Проба	КО-1	КО-2	КО-3	КО-4
As	<0.1	<0.1	1 540	1 528
Ba	170	518	518	241
Cr	22	20	23	22
Cu	35	25	38	37
Fe	35 812	33 332	34 492	35 612
Ga	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Li	27	31	38	36
Mn	562	530	450	506
Ni	16	16	16	17
Sb	<0.01	<0.01	349	<0.01
Sr	368	283	244	331
V	48	46	50	47
Zn	92	47	105	68
Sn	45	25	26	28

Концентрации Bi, Cd, Mo, Pb, Se, Tl, Co оказались ниже предела обнаружения метода. Пороги обнаружения химических элементов для данных измерений представлены в таблице 14.

Пороги обнаружения химических элементов при анализе методом ICP AES

Химический элемент	Bi	Cd	Mo	Pb	Se	Tl	Co
Порог обнаружения (mg/l)	<1	<0.001	<0.01	<0.01	<0.1	<0.1	<0.001

По результатам анализов наблюдается повышенное содержание мышьяка в пробах КО-3 и КО-4 и сурьмы в КО-3. Повышенное содержание данных элементов объясняется наличием в пробах самородной сурьмы, арсенопирита и леллингита.

2.2.4 Определение содержания золота и серебра методом пробирного анализа

Для анализа благородных металлов средней пробы рудопроявления Сикакангас был выполнен атомно-абсорбционный пробирный анализ.

Анализ был выполнен в лаборатории анализа благородных металлов ЗАО «Региональный аналитический центр «Механобр Инжиниринг Аналит» под руководством к.х.н. Л.А. Ушинской. ИАЦ «ЗАО «РАЦ МИА» аккредитован в национальной системе аккредитации в качестве испытательного центра на соответствие ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009, аттестат аккредитации №RA.RU. 21АВ83, выдан 25.06.2015 г. Анализ выполнен пробирным методом по методике НСАМ № 497-ХС, атомно-абсорбционным методом по МВИ 1402.151.12-2014. Результаты анализа приведены в таблице 15.

Таблица 15

Содержания золота и серебра в пробе S-1 рудопроявление Сикакангас

Проба	Наименование продукта	Массовая доля г/г	
		Au	Ag
S-1	Исходная руда	2,36	0,52

2.3 Петрографические исследования керновых образцов золотоносных руд рудопроявления Сикакангас

Для исследования петрографических особенностей проб рудопроявления Сикакангас были изготовлены прозрачные шлифы из керновых образцов. Петрографические шлифы изготавливались в шлифовальной лаборатории ООО «ЛИМС». Всего было исследовано 4 шлифа.

Петрографические исследования и микрофотодокументация выполнены в лаборатории оптических методов анализа компании «ЛИМС» с применением поляризационного микроскопа Альтами ПОЛАР-3, оснащенного видеокамерой и системой захвата и обработки изображений Altami Studio 3.4.

В ходе петрографических исследований было установлено, что породы представлены амфибол-биотитовым плагиогнейсом. Ниже приведена краткая характеристика каждого шлифа (табл. 16).

Таблица 16

Краткая характеристика пород рудопроявления Сикакангас

№ шлифа	Петрографический минеральный состав шлифа, количество (в %)	Структура; текстура	Примечания	Название породы
КО-1	Хлорит – 1-2; Биотит – 2-5; Амфиболит – 2-6; Плагиоклаз – 14-17; Кварц – 64-67; КПШ <1	гетеробластовая структура, массивная текстура	вторичные изменения: хлоритизация, биотитизация;	амфибол-биотитовый плагиогнейс
КО-2	Биотит – 4-7; Хлорит – 1-2; Амфибол – 2-5; Плагиоклаз – 17-20; Рудные – 1-3; Кварц – 67-70; Титанит <1; КПШ <1	гетеробластовая структура, массивная текстура	вторичные изменения: хлоритизация, биотитизация;	амфибол-биотитовый плагиогнейс
КО-3	Биотит – 4-7; Хлорит – 1-2; Рудные – 1-2; Амфиболит – 1-3; Плагиоклаз – 17-19; Кварц – 67-70; Титанит <1; КПШ <1	гетеробластовая структура, массивная текстура	вторичные изменения: хлоритизация, биотитизация;	амфибол-биотитовый плагиогнейс
КО-4	Биотит – 5-7; Хлорит – 1-2; Амфиболит – 2-4; Плагиоклаз – 18-20; Кварц – 68-71; КПШ <1	гетеробластовая структура, массивная текстура	вторичные изменения: хлоритизация, биотитизация;	амфибол-биотитовый плагиогнейс

Порода окрашена неравномерно, на темно-сером фоне выделяются хаотично расположенные пятна темного и темно-зеленого цвета. Структура гетеробластовая, текстура массивная. В шлифах главным различием являются количественные соотношения главных породообразующих минералов, а именно кварца, плагиоклаза, амфибола, биотита и хлорита. В качестве акцессорных минералов отмечаются титанит, рудные минералы и КПШ. Ниже приведена подробная характеристика главных минералов:

Кварц является ведущим минералом в данных шлифах, его количество варьирует от 64 до 70% объёма всей породы (рис. 10). Кварц установлен в виде свободной формы ксеноморфных округлых мелких зерен, относительно равномерно распределен в шлифах. Размер кварцевых зерен варьирует от первых микрон до 800 мкм. В шлифе кварц бесцветен, показатель преломления больше, чем у канадского бальзама, характерно дымчатое погасание.

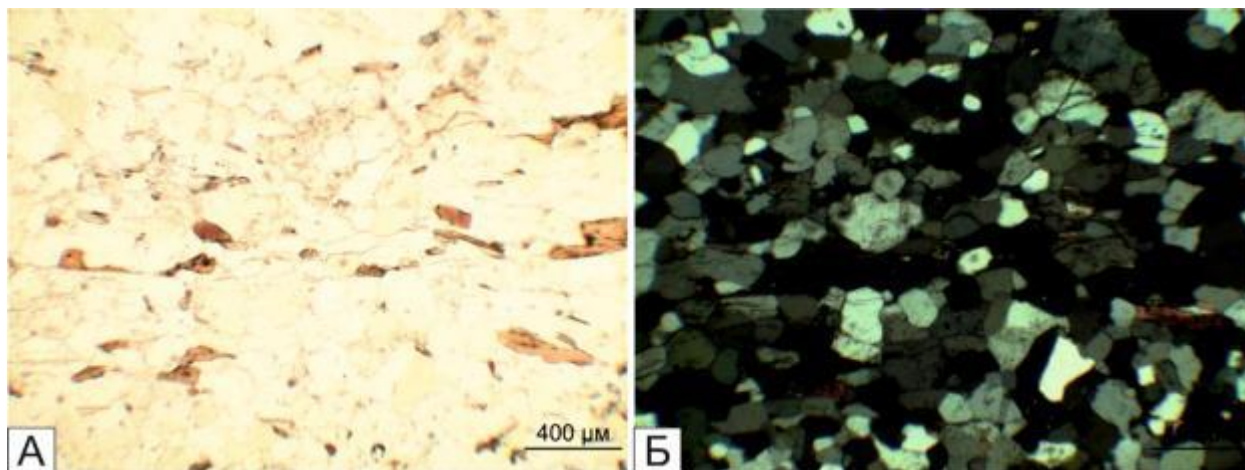


Рис. 10 Ксеноморфные мелкие зерна кварца, шлиф КО-2. Проходящий свет: а) без анализатора; б) с анализатором.

Полевые шпаты представлены плагиоклазом, характерной чертой которых в данных породах является наличие полисинтетических двойников, однако встречается зерна и без двойников. Методом Мишеля-Леви плагиоклаз был определен как олигоклаз (Маракушев, 2000). Для полевого шпата характерны как гипидиоморфные формы выделения, так и ксеноморфные выделения, которые беспорядочно распределены. Размеры кристаллов могут достигать 1300 мкм. Количество плагиоклаза в породе варьирует от 14 до 19% объёма всей породы (рис. 11).

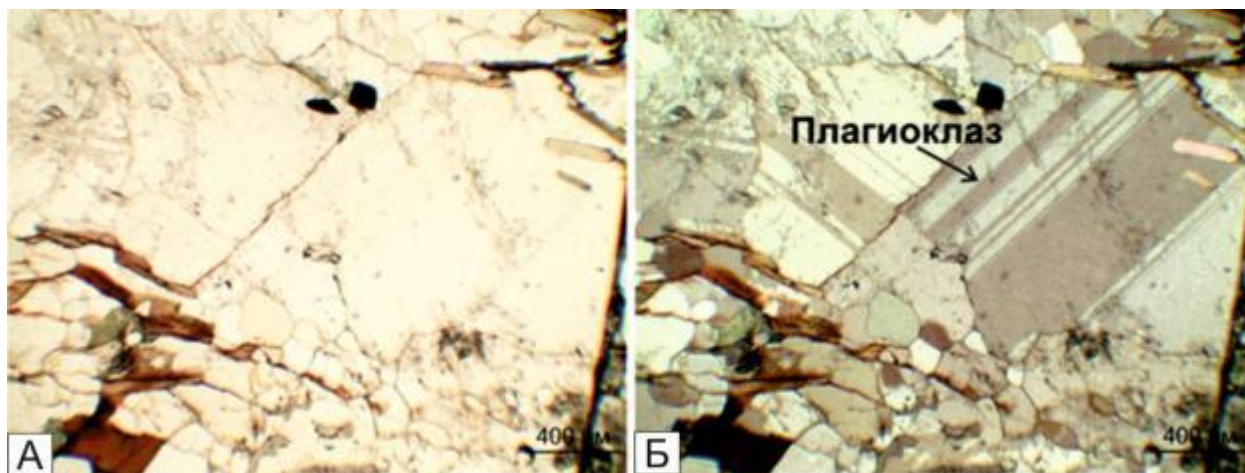


Рис. 11 Полисинтетические двойники плагиоклаза, шлиф КО-2. Проходящий свет: а) без анализатора; б) с анализатором.

Биотит является второстепенным минералом, представлен ксеноморфными кристаллами, имеет буроватый оттенок, в породе мало распространен (рис. 12). Количество биотита варьирует от 2 до 6%. Биотит плеохроирует в коричневато-зеленых тонах. Размеры кристаллов варьируют от 25 до 900 мкм.

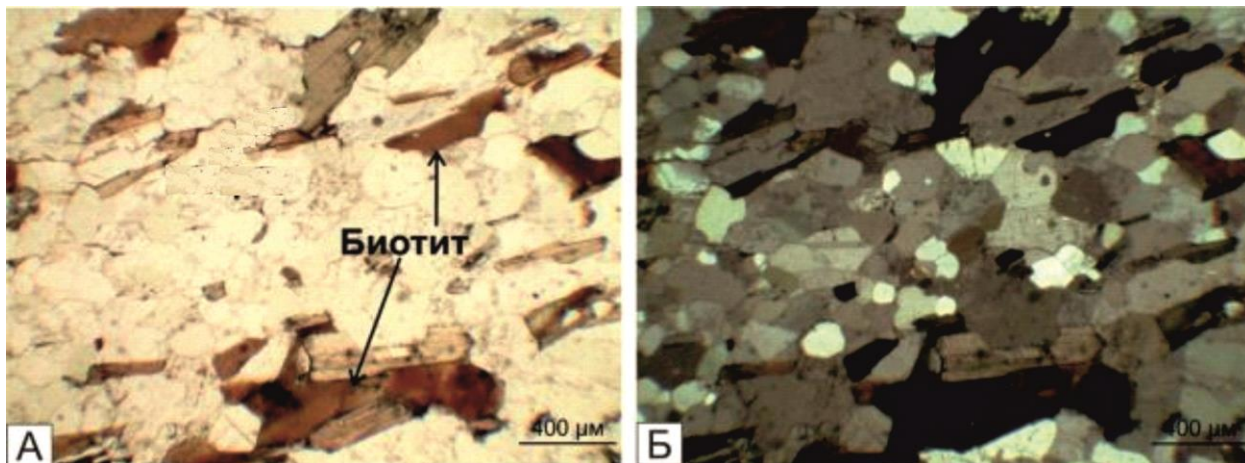


Рис. 12 Беспорядочно расположенные кристаллы биотита, шлиф КО-1. Проходящий свет: а) без анализатора; б) с анализатором.

Хлорит является второстепенным минералом в породах месторождения Сикакангас. Развивается по биотиту, имеет зеленоватую окраску, диагностируется по аномальным ржаво-бурым тонам в скрещенных николях. Количество хлорита варьирует от 1 до 2%. Размеры кристаллов варьируют от 20 до 90 мкм (рис. 13).

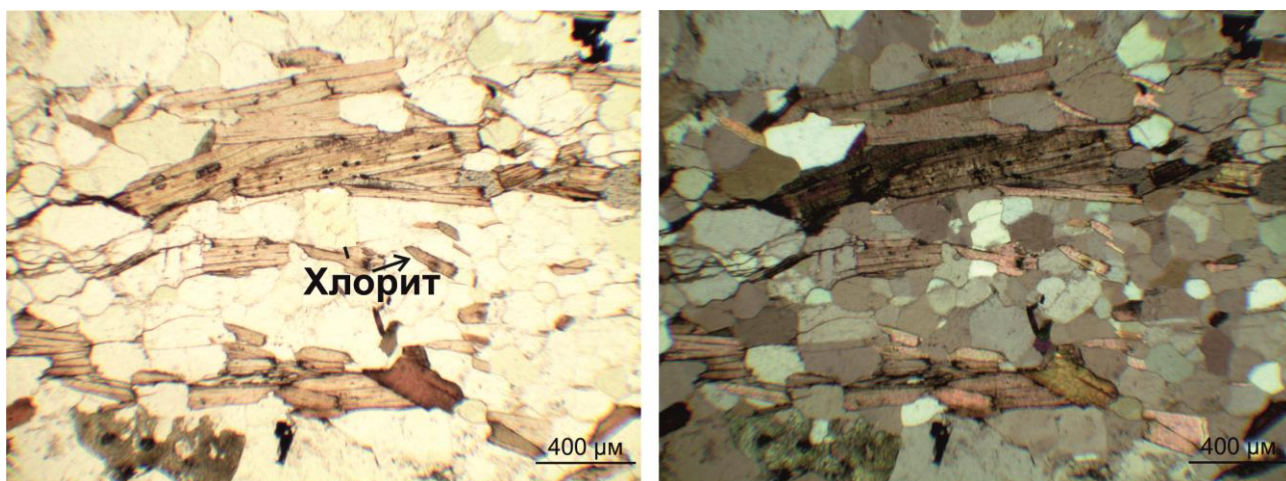


Рис. 13 Небольшие кристаллы хлорита, шлиф КО-2. Проходящий свет: а) без анализатора; б) с анализатором.

Амфибол сложен ксеноморфными зёрнами, расположен в породе неравномерно (рис. 14). Имеет светло-желтую окраску, в скрещенных николях - от желтой до фиолетовой окраски. Размеры кристаллов могут достигать до 1400 мкм. В многих местах амфибол хлоритизирован и биотитизирован. Рельеф минерала высокий, шагреньевая поверхность хорошо проявлена (Маракушев, 2000). Количество амфибола в породе не превышает 6%.

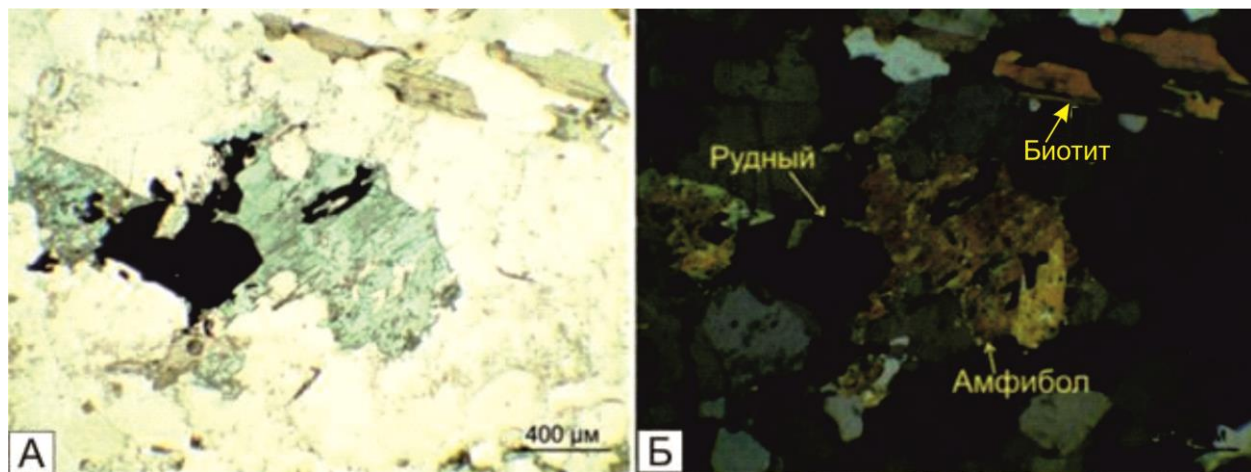


Рис. 14 Замещение амфибола рудными минералами, шлиф КО-2. Проходящий свет: а) без анализатора; б) с анализатором.

Рудные минералы распределены в породе неравномерно. Количество рудных минералов не превышает 2% в данной породе (рис. 15).

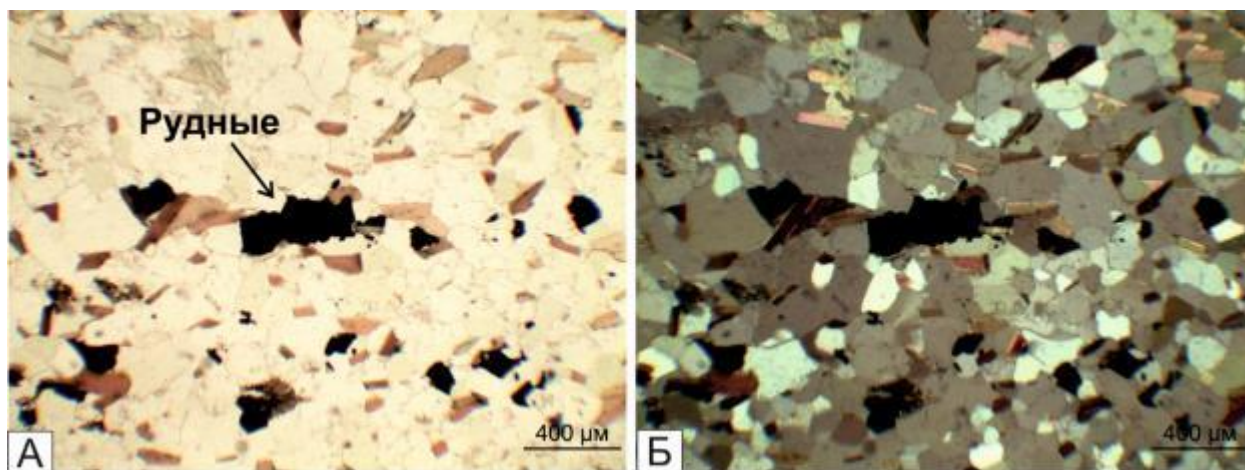


Рис. 15 Хаотично расположенные рудные минералы, шлиф КО-3. Проходящий свет: а) без анализатора; б) с анализатором.

2.4 Минераграфические и электронно-микроскопические исследования проб рудопроявления Сикакангас

Минераграфические исследования были выполнены с применением поляризационного микроскопа Olympus BX53 (оснащенного системой захвата изображения) в лаборатории оптических методов анализа ООО «ЛИМС».

Электронно-микроскопические исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный энерго-дисперсионным спектрометром Oxford X-Max, условия съемки 20 кВ, ток 1,5 нА, 25 сек на точку накопления, с помощью программного обеспечения AzTec. Исследования проходили на базе ресурсного центра «Геомодель», аналитик Шиловских В.В. Обработка результатов выполнялась автором.

В результате минераграфических и электронно-микроскопических исследований 4 аншлифов были установлены следующие минералы: пирротин, арсенопирит, самородная сурьма и самородное золото.

Детальное описание минералов, их структурно-текстурные особенности, а также характеристика химического состава минералов приведена ниже.

Пирротин является одним из главных рудных минералов, присутствует преимущественно в виде ксеноморфных выделений, размеры которых варьируют от первых микрон до 400 мкм (рис.16) Также образует сростания с арсенопиритом, что указывает на их близодновременное формирование.

Оптически идентифицируется по кремово-розовому цвету, слабому двуотражению ($R=42-36\%$), сильной анизотропии от желтовато-серого до серого с красноватым оттенком (Исаенко 1986). Химический состав приведен в таблице 17.

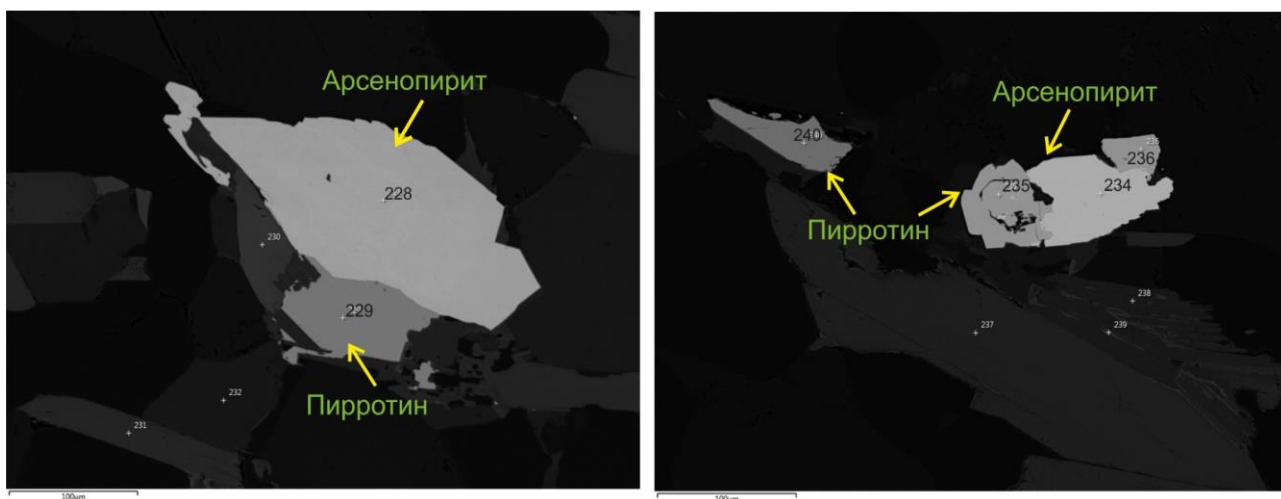


Рис. 16 Крупные свободные зерна арсенопирита и пирротина, а также их совместные сростания, аншлиф 2, РЭМ-фото.

Таблица 17

Химический состав пирротина

№ аншлифа	Анализ	Fe	S	Сумма
		Содержания элементов, масс. %		
2	Спектр 229	61,44	38,56	100
2	Спектр 235	61,27	38,73	100
2	Спектр 236	60,87	39,13	100
2	Спектр 240	60,59	39,41	100

Арсенопирит совместно с пирротином являются главными рудными минералами месторождения Сикакангас (рис.16). Арсенопирит образует кристаллы высокой степени идиоморфизма, их размеры варьируют от первых микрон до 450 мкм по удлинению. Зерна

неправильной формы, чаще встречаются в виде свободных зерен, реже образуют сростания с пирротинном.

Минерал диагностируется по белому цвету с желтоватым оттенком, сильному отражению ($R=55\%$), отчетливой анизотропии от синего до розового цвета (Исаенко 1986). В химическом составе арсенопирита отмечаются в единичных случаях незначительные примеси никеля и кобальта (табл.18).

Следует отметить, что в результате исследования фиксируется положительная взаимосвязь между самородным золотом и арсенопиритом. Это наблюдение позволяет сделать вывод о том, что арсенопирит является ведущим минералом-носителем золота в рудах.

Таблица 18

Химический состав арсенопирита

№ пробы	Анализ	Fe	S	As	Co	Ni	Сумма
		Содержания элементов, масс. %					
4	Спектр 228	33,79	18,99	47,22	0	0	100
4	Спектр 235	31,62	19,18	46,77	1,84	0,59	100

Самородная сурьма установлена в виде единичных проявлений, отмечена только в аншлифе 4. Как правило, размеры выделений не превышают 30 мкм. Присутствует преимущественно в виде ксеноморфных выделений (рис. 17), которые образуют сростания с пирротинном или свободные зерна. Оптически труднодиагностируема, была установлена в ходе микрорентгеноспектрального анализа. В химическом составе самородной сурьмы отмечаются незначительные примеси серы (табл. 19).

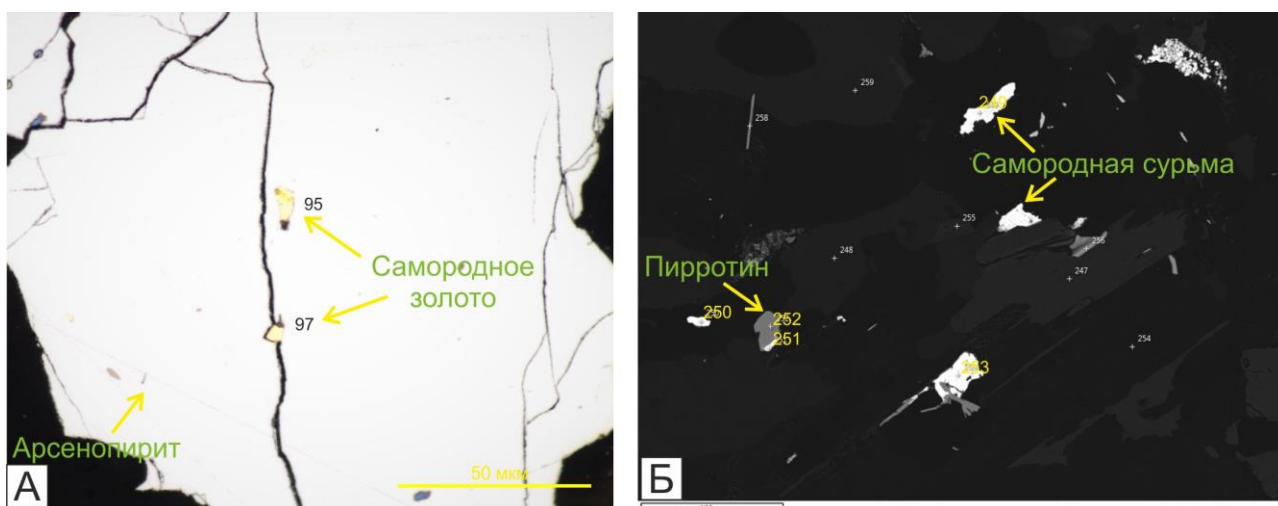


Рис. 17 А) Ксеноморфные выделения самородного золота, развивающегося по трещинам в арсенопирите; отраженный свет, без анализатора, аншлиф 4 Б) Ксеноморфные выделения самородной сурьмы и сростки с пирротинном, аншлиф 4, РЭМ-фото.

Химический состав самородной сурьмы

№ аншлифа	Анализ	Sb	S	Сумма
		Содержания элементов, масс. %		
4	Спектр 249	99,4	0,6	100
4	Спектр 250	99,3	0,7	100
4	Спектр 251	99,8	0,2	100
4	Спектр 253	99,9	0,1	100

Самородное золото было установлено оптически и подтверждено в ходе рентгено-спектрального микроанализа в аншлифе 4. Развивается по трещине в арсенопирите совместно с другими минералами парагенезиса, в свободной форме встречено не было. Включения обладают неправильной формой, очертания границ извилистые, размер не превышает 10 мкм. Оптически диагностируется по характерному ярко-желтому цвету, высокому отражению ($R=79,6\%$), изотропности (Исаенко 1986). На рисунках представлены наиболее характерные формы нахождения самородного золота (рис. 17). Химический состав приведен в таблице 20.

Таблица 20

Химический состав самородного золота

№ аншлифа	Анализ	Au	Ag	Сумма
		Содержания элементов, масс. %		
4	Спектр 95	89,97	10,03	100
4	Спектр 97	91,74	8,26	100

2.5 Прогноз технологических свойств руд рудопроявления Сикакангас

Обобщая полученные результаты вещественного состава рудопроявления Сикакангас (химические, петрографические, минераграфические и электронно-микроскопические исследования) построена сводная таблица важнейших критериев, влияющих на способ обогащения (табл. 21).

Таблица 21

Важнейшие критерии руд рудопроявления Сикакангас, влияющих на способ обогащения

Форма нахождения, %			Гранулометрия, мкм, %			Окисленность	
Свободное золото	Окислы и гидроокислы	Сульфиды	<10	10-50	>50	Первичная	Окисленная
-	-	>95	91	9	-	✓	-

На основании сопоставления вышеизложенных результатов (табл. 21) и ранее разработанных на других месторождениях критериев (глава 1), можно дать следующий прогноз поведения руд рудопроявления Сикакангас в процессах обогащения:

- **Гравитационный метод.** Применение только гравитационного метода обогащения руд Сикакангаса не позволит получать приемлемых по качественным показателям результатов (табл.). Особенности формы нахождения и granulometрии золота позволяют рекомендовать к исследованиям другие способы обогащения.

- **Гравитационно-флотационный метод** также не позволит получать приемлемых по качественным показателям результатов. Факторами, которые определяют невысокую эффективность гравитационно-флотационного метода, является granulometрический состав самородного золота руд рудопроявления Сикакангас (<50 мкм) и отсутствие его в свободной форме. Несомненно, в результате гравитационного обогащения в концентрате будут накапливаться минералы носители (сульфиды), однако получить гравитационный концентрат с высокими содержаниями и приемлемым извлечением будет затруднительно.

- **Флотационный метод.** Особенности минерального состава руд (высокая доля сульфидов среди минералов носителей золота) позволяют рекомендовать к исследованиям методы сульфидной флотации для получения обогащенных благородными металлами сульфидных концентратов. Однако учитывая granulometрический состав самородного металла (>90% менее 10 мкм) и тесную связь его с арсенопиритом (как носитель «невидимого» золота) максимального извлечения золота во флотационные концентраты достигнуто не будет. Качество таких концентратов будет скорее всего не высоким, но допустимым для дальнейшего передела сульфидных концентратов.

- **Флотационно-гидрометаллургический метод** можно рассматривать как наиболее оптимальный для изучаемых руд. Крупность самородного золота (>90% менее 10 мкм) и его преимущественное расположение в трещинах более ранних минералов (арсенопирит) обеспечивают достаточную проницаемость руд для выщелачивающих растворов, а отсутствие крупного самородного золота (крупнее 50 мкм) обеспечит достаточно полное его растворение. Однако, учитывая, что все золото сосредоточено в арсенопирите, для снижения влияния высокой доли «невидимого» золота на процесс выщелачивания, необходимо рекомендовать к исследованиям комбинированную флотационную с цианированием хвостов схему.

- **Гидрометаллургический метод.** Применение данного метода покажет высокую эффективность при условии, что руда будет первичной (более 60% золота будет находиться в свободной форме) или окисленной (более 70% золота будет находиться в окислах и гидроокислах), а более 80% частиц золота будет иметь размерность менее 50 мкм. Также положительным фактором обогащения является присутствие золота в трещинах сульфидов. Однако золото в рудах рудопроявления Сикакангас имеет тесную связь с

сульфидами (как носитель «невидимого» золота), поэтому мешает максимально эффективному извлечению золота только гидрометаллургическим методом обогащения.

Поэтому изучаемую руду предварительно рекомендуется обогатить методом флотации или гравитации для дальнейшей переработки (окислительный обжиг, автоклавное выщелачивание или бактериальное окисление).

Полученные результаты вынесены в таблицу 22.

Таблица 22

Критерии типизации золотоносных руд

Схема обогащения	Форма нахождения, %			Гранулометрия, мкм,%			Окисленность	
	Свободное золото	Окислы и гидроокислы	Сульфиды	<10	10-50	>50	Первичная	Окисленная
Гравитационная	>80	-	-	-	-	>75	✓	-
Гравитационно-флотационная	>50	-	-	-	-	>20	✓	-
Флотационная	>30	-	-	-	>60	-	✓	-
Флотационно-гидрометаллургическая	-	-	>70	>85		-	✓	-
Гидрометаллургическая	>60	>70*	-	>80		-	✓	✓

*Применяется для окисленной руды

3. Технологические свойства руд рудопроявления Сикакангас

Для подтверждения прогноза технологических свойств руд рудопроявления Сикакангас и ранее разработанных на других месторождениях критериев были проведены технологические опыты. В рамках изучения технологических свойств руд были выполнены опыты по гравитационному и флотационному обогащению, а также отдельно проведен эксперимент, моделирующий процесс цианидного выщелачивания благородных металлов из руд.

3.1 Результаты гравитационного обогащения руды

С целью детального изучения технологических свойств и форм нахождения полезных компонентов в руде рудопроявления Сикакангас был проведен опыт по гравитационному обогащению с последовательным измельчением. Исследование гравитационной обогатимости руды проводилось на концентрационном столе СКЛ-2 по схеме с последовательным доизмельчением хвостов, представленной на рисунке 18. Гравитационное обогащение руды выполнялось автором.

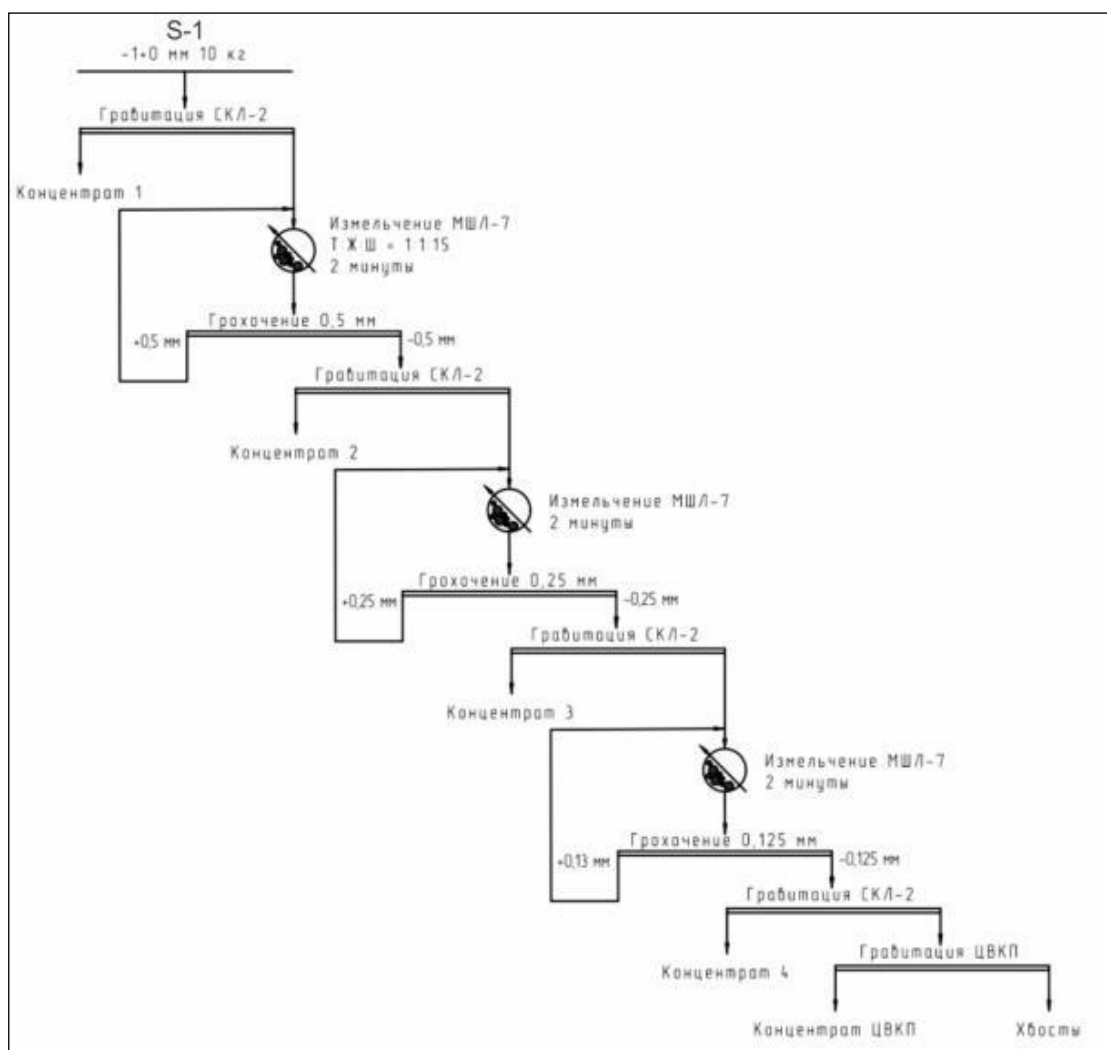


Рис. 18 Схема проведения опыта по гравитационному обогащению с последовательным измельчением пробы S-1

В качестве исходного материала была взята проба S-1, массой 10 кг и доизмельчена до крупности –1+0 мм. На первой стадии было получено два продукта: концентрат (КТ-1) и хвосты (ХВ). Согласно схеме опыта, далее производилось доизмельчение хвостов гравитационного обогащения в шаровой мельнице МШЛ-7 до меньшей крупности классов: - 0,5+0, -0,25+0, 0,125+0 мм.

В итоге было получено четыре концентрата (КТ-1,КТ-2,КТ-3,КТ-4) и хвосты гравитационного обогащения (ХВ). Далее хвосты обогащались на центробежно вибрационном концентраторе ЦВКП.

Из полученных продуктов были выделены навески для химического анализа для определения массовой доли золота и серебра (анализы выполнены в ЗАО «РАЦ МИА»). Результаты приведены в таблице 23. Помимо этого четыре концентрата были отправлены на подготовку препаратов для минералогических исследований.

Таблица 23

Содержания золота и серебра в полученных продуктах

Проба S-1	Наименование продукта	Массовая доля г/г	
		Au	Ag
КТ-1	Гравитационный концентрат	83,5	13,6
КТ-2	Гравитационный концентрат	26,18	4,65
КТ-3	Гравитационный концентрат	27,54	2,25
КТ-4	Гравитационный концентрат	22,85	2,51
ЦВКП	Гравитационный промпродукт	244,2	3,25
ХВ	Хвосты гравитации	0,79	0,4

Таблица 24 с приведенными результатами гравитационного опыта для пробы S-1 показывает, что суммарное извлечение при содержании золота 48,18 г/т и серебра 7,37 г/т в концентрат составляет для золота 66,20% и 37,19% для серебра при суммарном выходе концентрата 3,11%. Наиболее хороший показатель извлечения благородных металлов соответствует концентрату-1. Такое поведение руд определяется особенностями минерального состава, а именно балансом распределения золота по минералам-носителям. Считаем, что доизмельчение концентрата нецелесообразно в силу высокой доли золота и серебра, связанных с сульфидными минералами.

Результаты опыта по гравитационному обогащению с последовательным доизмельчением хвостов стола СКЛ-2 пробы S-1

Продукт	Выход, %	Содержание, г/т		Извлечение, %	
		Au	Ag	Au	Ag
Концентрат 1	1,13	83,5	13,6	41,75	24,96
Концентрат 2	1,20	26,18	4,65	13,90	9,07
Концентрат 3	0,07	27,54	2,25	0,85	0,25
Концентрат 4	0,68	22,85	2,51	6,87	2,77
Концентрат ЦВКП	0,03	244,2	3,25	2,84	0,14
Итого концентрат	3,11	48,18	7,37	66,20	37,19
Хвосты	96,89	0,79	0,4	33,80	62,81
Итого проба по балансу	100,00	2,26	0,62	100,00	100,00
Проба по анализу		2,36	0,52		

В паре золото-серебро отмечается очень сильная корреляционная связь ($R=0,95$). Это свидетельствует о нахождении большей части этих металлов в единой форме (золотосеребряные сплавы, включения в сульфидах) или в фазах с одинаковыми параметрами при гравитационном обогащении. График зависимости золота и серебра приведен на рисунке 19.

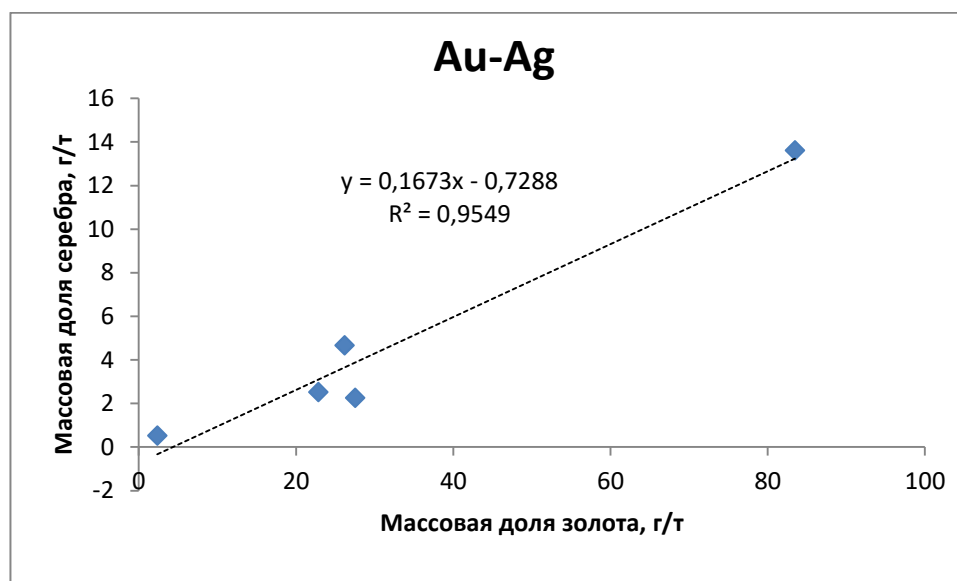


Рис. 19 Зависимость содержаний золота и серебра в исходной пробе и технологических продуктах пробы S-1.

Для установления зависимости извлечения металлов от выхода продукта и качества продукта от его выхода были рассчитаны балансы опытов накопленным итогом (табл. 25). Для наглядности были построены графики зависимости качества продукта от его выхода и извлечения полезного компонента от выхода продукта (рис. 20).

Балансы опытов накопленным итогом (проба S-1)

Продукт	S-1				
	Выход, %	Содержание элемента, г/т		Извлечение, %	
		Au	Ag	Au	Ag
КТ1	1,13	83,5	13,6	41,75	24,96
КТ1+КТ2	2,33	54	9	55,65	34,03
КТ1+КТ2+КТ3	2,4	53,2	8,8	56,5	34,28
КТ1+КТ2+КТ3+КТ4	3,08	46,5	7,4	63,37	37,05
Итого руда по балансу		2,36	0,52		

График зависимости качества продукта от его выхода (рис. 20) показывает что, увеличение выхода продукта не будет эффективным для повышения содержания золота в продукте пробы: с повышением выхода продукта постепенно будет теряться качество. Такая тенденция указывает на отсутствие раскрытия минералов в связи с недостаточной степенью измельчения пробы.

Для серебра характерна аналогичная зависимость качества продукта от его выхода. Однако, стоит отметить, что качество продукта понижается не резко, а довольно медленно.

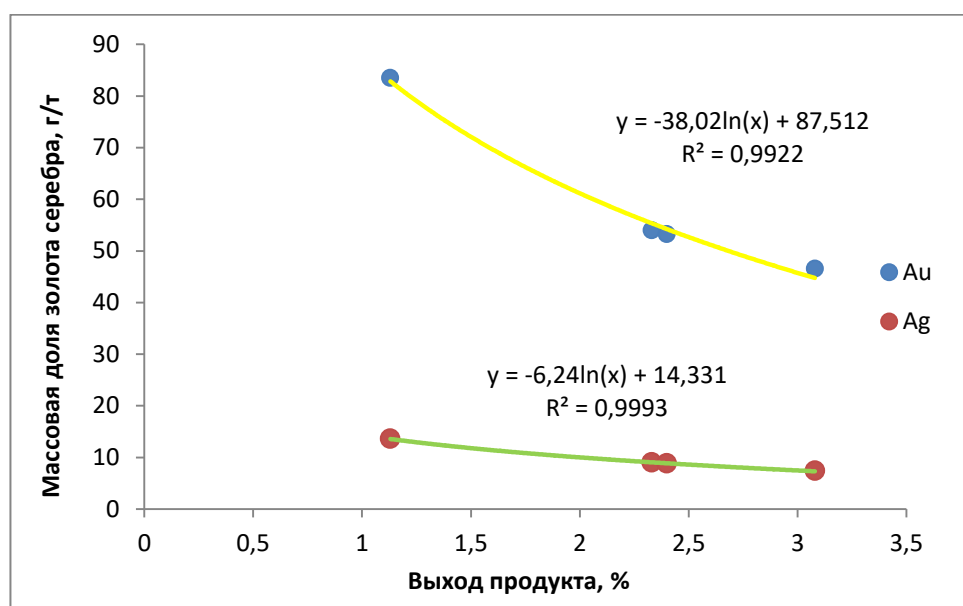


Рис. 20 График зависимости содержания золота от выхода продукта для пробы S-1 рудопроявления Сикакангас.

График зависимости извлечения золота от выхода продукта описывается следующим образом: чем выше выход продукта, тем выше извлечение благородного металла. По серебру пробы придерживаются той же тенденции (рис. 21).

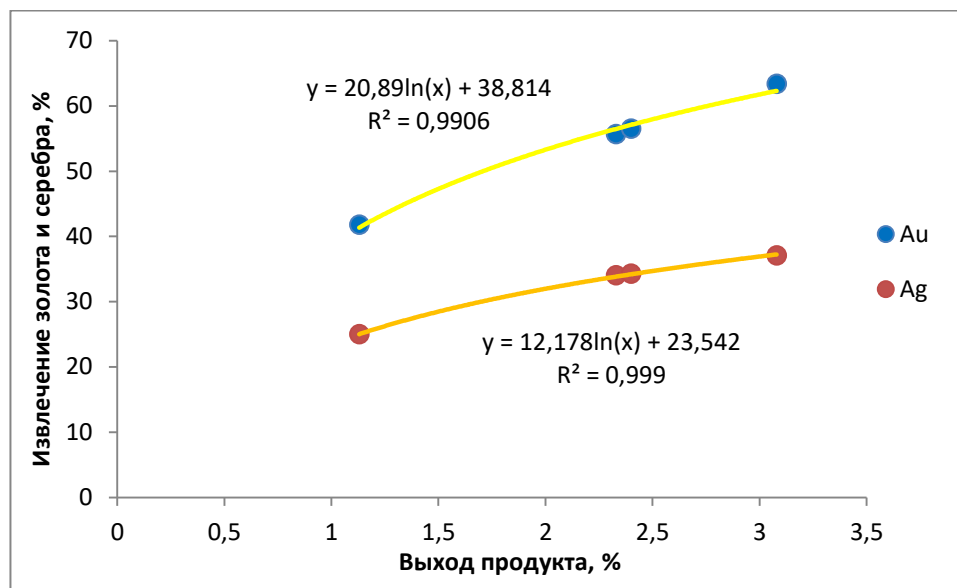


Рис. 21 График зависимости извлечения золота от выхода продукта для пробы S-1

3.2 Минеральный состав продуктов гравитационного обогащения

Минеральный состав продуктов гравитационного обогащения руд рудопроявления Сикакангас изучался на представительных навесках, импрегнированных в эпоксидную основу. С целью определения минерального состава концентратов применялись оптические и электронно-микроскопические методы исследования.

Подготовка продуктов гравитационного обогащения для исследований включала холодную заливку эпоксидным составом Buehler EpoThin, шлифовку, полировку и напыление углерода. Подготовку образцов выполнила Философова Г.И. в шлифовальной лаборатории ООО «ЛИМС».

Оптические исследования и микрофотодокументация выполнены в лаборатории оптических методов анализа компании «ЛИМС» с применением поляризационного микроскопа Olympus BX53, оснащенного системой захвата изображения. Подсчет количества зерен каждого минерала выполнялся точечным и планиметрическим методами при обработке изображения с помощью программного пакета JMicroVision 2.7.1. Минералогические исследования выполнены автором.

Электронно-микроскопические исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный энерго-дисперсионным спектрометром Oxford X-Max, условия съемки 20 кВ, ток 1,5 нА, 25 сек на точку накопления, с помощью программного обеспечения AzTec. Исследования проходили на базе ресурсного центра «Геомодель», аналитик Шиловских В.В. Обработка результатов выполнена автором.

В результате минераграфических и электронно-микроскопических исследований 3 препаратов продуктов гравитационного обогащения были установлены следующие минералы: пирротин, арсенопирит, халькопирит, галенит, леллингит, самородный висмут, электрум и самородное золото.

Детальное описание минералов, их структурно-текстурные особенности, а также характеристика химического состава минералов приведена ниже.

Пирротин является одним из главных рудных минералов, присутствует преимущественно в виде ксеноморфных выделений, размеры которых варьируют от первых микрон до 400 мкм (рис. 22) Также образует сростания с арсенопиритом, что указывает на их близодновременное формирование.

Оптически идентифицируется по кремово-розовому цвету, слабому двуотражению ($R=42-36\%$), сильной анизотропии от желтовато-серого до серого с красноватым оттенком (Исаенко 1986). Химический состав приведен в таблице 26.

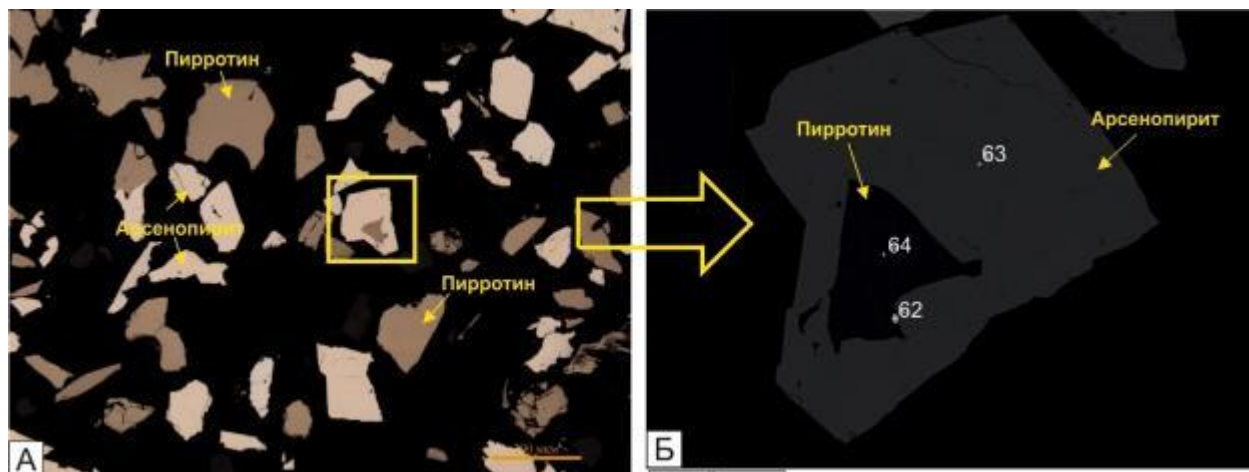


Рис. 22 Крупные свободные зерна арсенопирита и пирротина, а также их совместные сростания, КТ-1 А) Отраженный свет, без анализатора Б) РЭМ-фото

Таблица 26

Химический состав пирротина

№ пробы	Анализ	Fe	S	Сумма
		Содержания элементов, масс. %		
КТ-1	Спектр 64	61,44	38,56	100
КТ-1	Спектр 115	61,17	38,83	100
КТ-1	Спектр 120	60,47	39,53	100
КТ-3	Спектр 229	60,54	39,46	100

Арсенопирит совместно с пирротином являются главными рудными минералами месторождения Сикакангас. Арсенопирит образует кристаллы высокой степени идиоморфизма, их размеры варьируют от первых микрон до 400 мкм по удлинению. Зерна неправильной формы, чаще встречаются в виде свободных зерен, реже образуют сростания с пирротином (рис. 23).

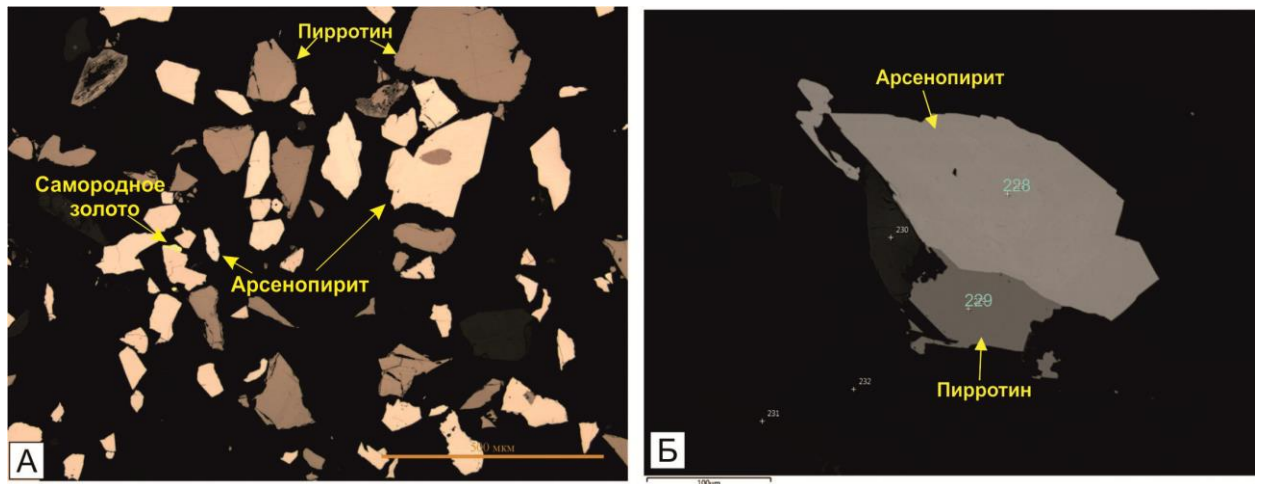


Рис. 23 А) Крупные свободные зерна арсенопирита и пирротина, а также их совместные сростания, КТ-1, отраженный свет, без анализатора; Б) Сросток пирротина и арсенопирита, КТ-3, РЭМ-фото

Минерал диагностируется по белому цвету с желтоватым оттенком, сильному отражению ($R=55\%$), отчетливой анизотропии от синего до розового цвета (Исаенко 1986). Химический состав приведен в таблице 27. Следует отметить, что в результате исследования фиксируется положительная взаимосвязь между самородным золотом и арсенопиритом. Это наблюдение позволяет сделать вывод о том, что арсенопирит является ведущим минералом-носителем золота в рудах.

Таблица 27

Химический состав арсенопирита

№ пробы	Анализ	Fe	S	As	Сумма
		Содержания элементов, масс. %			
КТ-1	Спектр 60	33,98	18,52	47,5	100
КТ-1	Спектр 63	33,93	18,5	47,57	100
КТ-1	Спектр 103	34,01	18,2	47,79	100
КТ-1	Спектр 114	33,83	18,26	47,91	100
КТ-1	Спектр 119	33,88	18,01	48,11	100
КТ-2	Спектр 150	33,58	17	49,42	100
КТ-3	Спектр 228	33,79	18,99	47,22	100

Халькопирит установлен в виде единичных проявлений, либо составляет не более первых долей процента относительно общего объема рудных и нерудных минералов, отмечен во всех концентратах. Как правило, размеры выделений не превышают 35 мкм. Присутствует преимущественно в виде ксеноморфных выделений, которые образуют сростания с пирротинном (рис. 24)

Оптически диагностируется по характерному желтому цвету и отражению ($R=48\%$). В химическом составе халькопирита отмечается небольшой дефицит меди (табл. 28).

Химический состав халькопирита

№ пробы	Анализ	Fe	S	Cu	Сумма
		Содержания элементов, масс. %			
КТ-1	Спектр 116	31,96	35,13	32,91	100

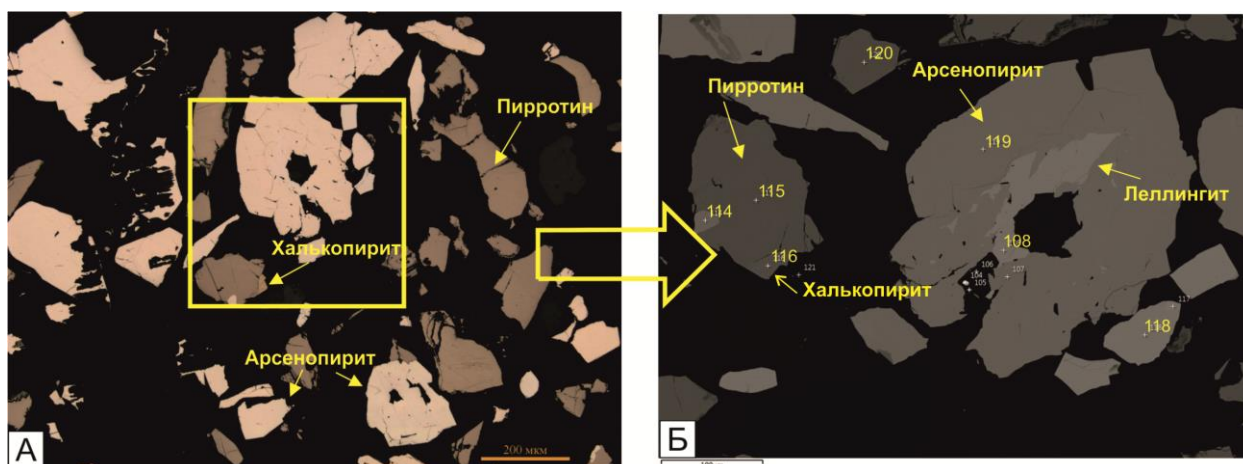


Рис. 24 А) Сросток пирротина, халькопирита и арсенопирита, КТ-1, отраженный свет, без анализатора; Б) Замещение арсенопирита леллингитом, КТ-1, РЭМ-фото.

Галенит в рудах присутствует преимущественно в виде мелких включений. Оптически труднодиагностируем, в силу того, что развивается в породе в виде очень мелких выделений (<10 мкм), что делает невозможным правильно оценить коэффициент отражения минерала. Поэтому минерал легко перепутать с блеклыми рудами, обладающими сходными свойствами: серый цвет, среднее отражение, а также являющимися изотропными, как и галенит. Таким образом, точно идентифицировать галенит удалось только в ходе рентгеноспектрального микроанализа. Галенит образует включения замещения по минералам более ранних парагенезисов: по трещинам и пустотам в арсенопирите, а также встречается в виде сростаний с самородным золотом (рис. 25). Включения представляют собой образования неправильной ксеноморфной формы. Химический состав галенита приведен в таблице 29.

Таблица 29

Химический состав галенита

№ пробы	Анализ	Pb	S	Сумма
		Содержания элементов, масс. %		
КТ-1	Спектр 100	86,47	13,53	100

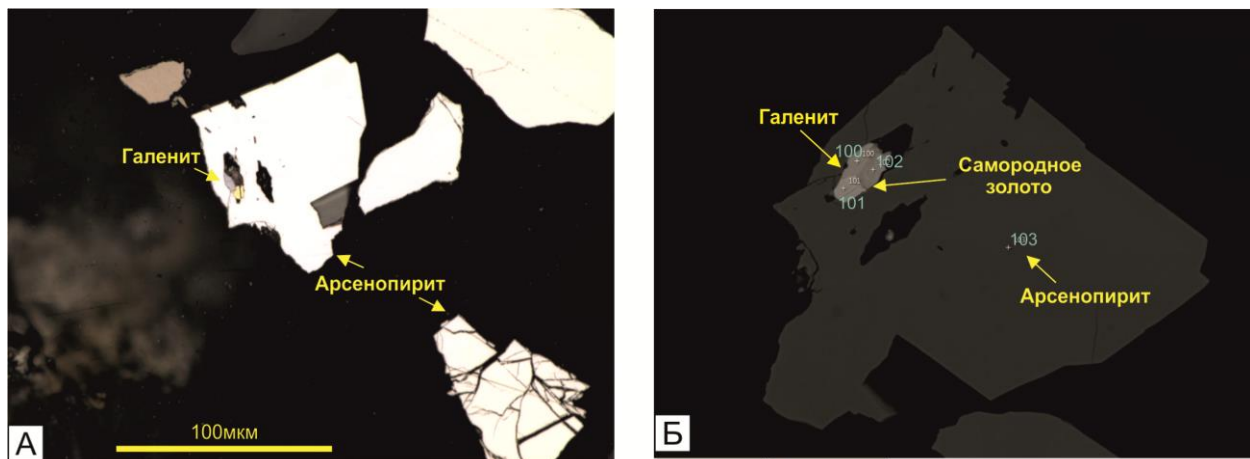


Рис. 25 Развитие галенита и самородного золота в трещине арсенопирита, КТ-1 А) отраженный свет, без анализатора Б) РЭМ-фото

Леллингит оптически труднодиагностируем, отличить от других анизотропных белых арсенидов довольно трудно. Был установлен в ходе микрорентгеноспектрального анализа (рис. 24). Является более поздним включением в арсенопирите. Присутствует в виде ксеноморфных выделений, размеры которых не превышают 40 мкм. В химическом составе арсенопирита отмечаются незначительные примеси серы (табл. 30)

Таблица 30

Химический состав леллингит

№ пробы	Анализ	As	Fe	S	Сумма
		Содержания элементов, масс. %			
КТ-1	Спектр 7	69,84	28,08	2,08	100
КТ-1	Спектр 108	72,67	27,33	0	100
КТ-1	Спектр 118	69,78	27,9	2,32	100

Электрум был установлен в ходе микрорентгеноспектрального анализа, в целом составляет значительно меньшую часть от самородного золота. Электрум представлен преимущественно в виде сростаний с самородным золотом, висмутом и галенитом, размеры которых составляют <10 мкм, локализуется в трещинах арсенопирита (рис. 26). Диагностические признаки не отличаются от самородного золота: в отраженном свете имеет яркий светло-желтый цвет, сильное отражение ($R=79,6\%$), является изотропным минералом (Исаенко 1986). Химический состав электрума приведен в таблице 31.

Таблица 31

Химический состав электрума

№ пробы	Анализ	Au	Ag	Сумма
		Содержания элементов, масс. %		
КТ-2	Спектр 149	54,67	45,33	100

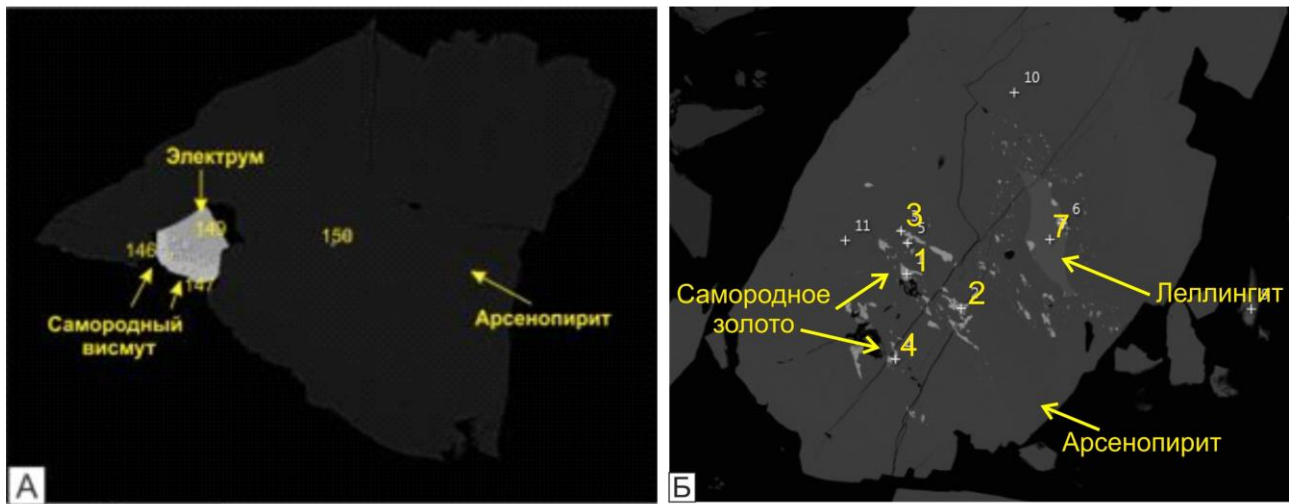


Рис. 26 А) Сросток электрума и самородного висмута в трещине арсенопирита, КТ-2, РЭМ-фото; Б) Ксеноморфные выделения самородного золота и леплингита, развивающиеся по трещинам в арсенопирите, КТ-1, РЭМ-фото

Самородный висмут встречается в виде единичных проявлений и был установлен в ходе микрорентгеноспектрального анализа. Образует сростания с самородным золотом и электрумом (рис. 26). В химическом составе самородного висмута отмечаются примеси сурьмы и теллура (табл. 32).

Таблица 32

Химический состав самородного висмута

№ пробы	Анализ	Bi	Sb	Te	Сумма
		Содержания элементов, масс. %			
КТ-2	Спектр 146	98,23	1,77	0	100
КТ-2	Спектр 147	81,98	2,62	15,4	100

Самородное золото было установлено оптически и подтверждено в ходе рентгеноспектрального микроанализа во всех гравитационных концентратах. Развивается по трещине в арсенопирите совместно с другими минералами парагенезиса, в свободной форме встречено не было. Включения обладают неправильной формой, очертания границ извилистые, размер варьирует от первых микрон до 45 мкм. Оптически диагностируется по характерному ярко-желтому цвету, высокому отражению ($R=79,6\%$), изотропности (Исаенко 1986). На рисунках представлены наиболее характерные формы нахождения самородного золота (рис. 27)

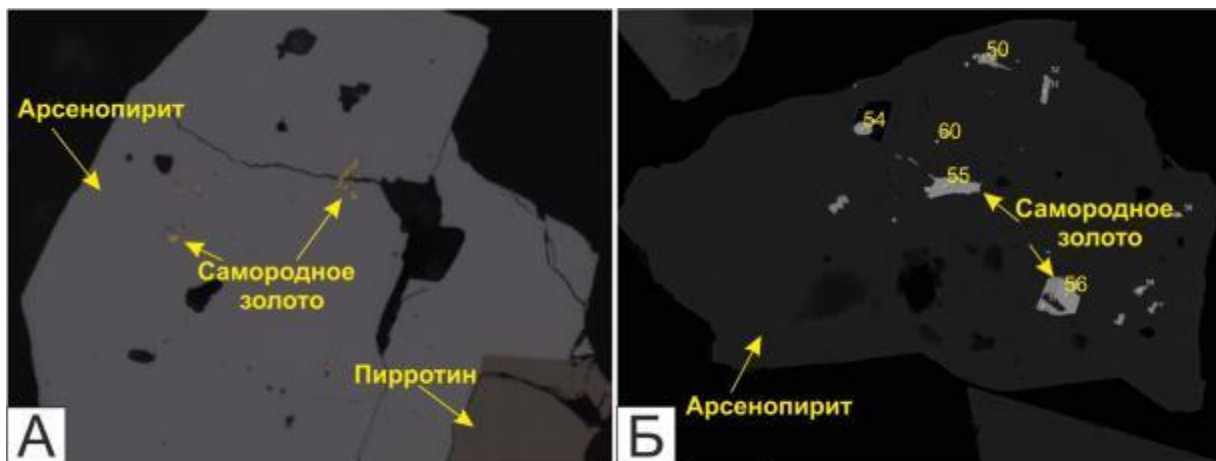


Рис. 27 Ксеноморфные выделения самородного золота, развивающегося по трещинам в арсенопирите, КТ-1 А) Отраженный свет, без анализатора Б) РЭМ-фото.

По химическому составу самородное золото представляет собой золото-серебряный сплав, пробность которого в среднем составляет 826,2‰ (табл. 33).

Таблица 33

Химический состав самородного золота

№ пробы	Анализ	Au	Ag	Сумма
		Содержания элементов, масс. %		
КТ-1	Спектр 1	87,41	12,59	100
КТ-1	Спектр 2	81,35	18,65	100
КТ-1	Спектр 3	82,12	17,88	100
КТ-1	Спектр 4	85,07	19,93	100
КТ-1	Спектр 50	84,93	15,07	100
КТ-1	Спектр 54	79,24	20,76	100
КТ-1	Спектр 55	79,73	20,27	100
КТ-1	Спектр 56	80,5	19,5	100
КТ-1	Спектр 62	75,71	24,29	100
КТ-1	Спектр 101	90,1	9,9	100

Продукты гравитационного обогащения проб месторождения золота в целом схожи, однако различаются между собой по содержанию рудных минералов. Всего в 3 изучаемых концентратах было установлено 208 знаков самородного золота. Характер распределения самородного золота по размеру частиц представлен в таблице 34. На рисунке 28 приведены данные по распределению частиц самородного золота по количеству знаков в различных концентратах.

Распределение самородного золота по размеру частиц

Размер частиц, мкм	Доля от массы частиц, %			
	КТ-1 (-1+0 мм)	КТ-2 (-0.5+0 мм)	КТ-4 (-0.125+0 мм)	Среднее
0-10	86,8	88,9	100	88
10-20	10,4	9,3	-	9,6
20-30	2,1	1,8	-	1,9
30-50	0,7	-	-	0,5

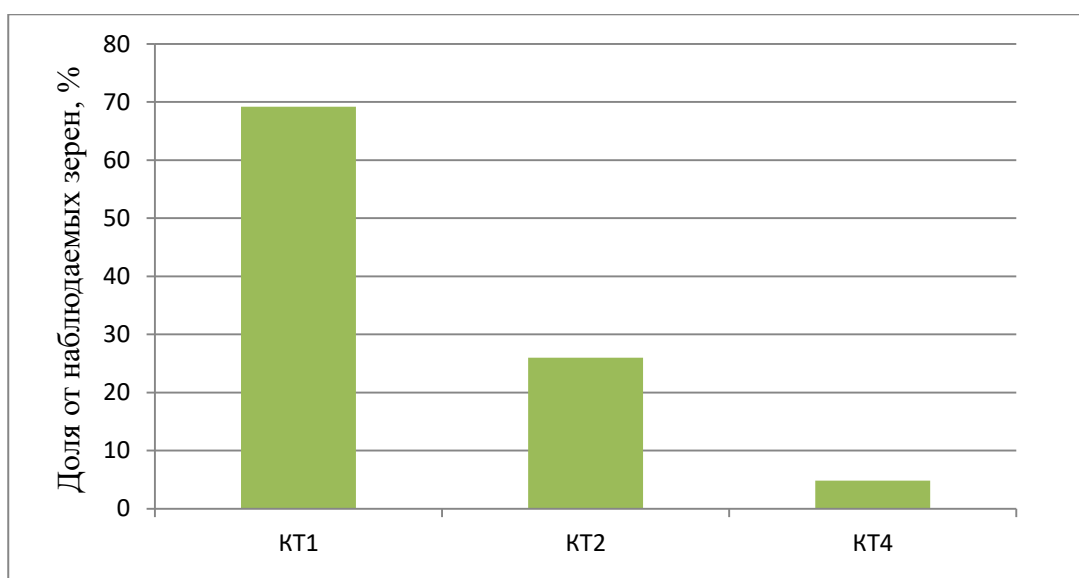


Рис. 28 Распределение частиц самородного золота по количеству знаков в концентратах.

Из данного графика следует, что после каждого доизмельчения руды, в концентрате уменьшается количество знаков самородного золота. Такое распределение частиц определяется особенностями минерального состава, а именно балансом распределения золота по минералам-носителям. Поэтому доизмельчение руды нецелесообразно в силу высокой доли золота и серебра, связанных с сульфидными минералами.

3.3 Результаты флотационного обогащения руды

Исходя из результатов минералогических исследований, значительная часть золота ассоциирована с арсенопиритом, поэтому был испытан реагентный режим, применяемый при флотации арсенопирита и который не препятствует получению хороших результатов извлечения других сульфидов (галенита и халькопирита). Так был испытан режим флотации арсенопирита в слабощелочной среде (рН 8,0-8,5), при активации минерала медным купоросом и использовании в качестве собирателей бутиловый ксантогенат калия (ВtКх) и метилизобутилкарбинол (МИБК). Схема опыта, проведена при измельчении пробы S-1 до крупности 78% класса -0,071 мм (рис. 29). Полученные результаты приведены в таблице 35. Флотационное обогащение руды выполнялось автором под руководством Л.Б. Терентьевой.

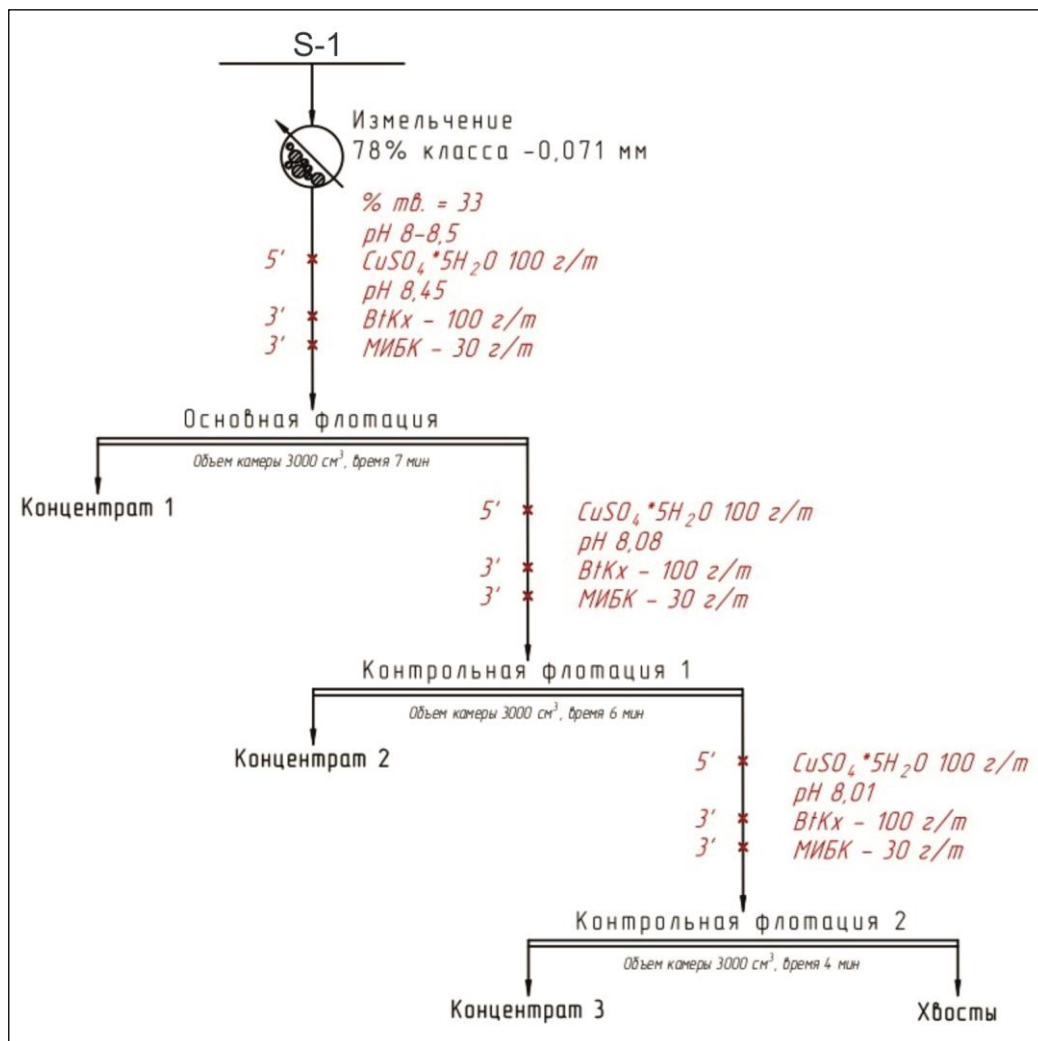


Рис. 29 Схема проведения опыта флотации пробы S-1

Таблица 35

Результаты флотации пробы S-1

Продукт	Выход, %	Содержание, г/т		Извлечение, %	
		Au	Ag	Au	Ag
Концентрат 1	1,30	94,30	15,10	54,65	34,39
Концентрат 2	1,41	35,00	5,65	21,95	13,93
Концентрат 3	0,49	10,10	0,84	2,23	0,73
Итого концентрат	3,20	55,22	8,74	78,83	49,05
Хвосты	96,80	0,49	0,30	21,17	50,95
Итого проба по балансу	100,00	2,24	0,57	100,00	100,00
Проба по анализу	100,00	2,36	0,52		

Таблица с приведенными результатами флотационного опыта для пробы S-1 показывает, что суммарное извлечение при содержании золота 55,22 г/т и серебра 8,74 г/т в концентрат составляет для золота 78,83% и 49,05% для серебра при суммарном выходе концентрата 3,2%. Наиболее хороший показатель извлечения благородных металлов соответствует концентрату-1.

С целью изучения зависимости качества флотационных концентратов от выхода по результатам опыта была построена диаграмма (рис. 30). График показывает, что увеличение выхода продукта не будет эффективным для повышения содержания золота в продукте пробы, так как с повышением выхода продукта постепенно будет теряться качество. Для серебра характерна аналогичная зависимость качества продукта от его выхода.

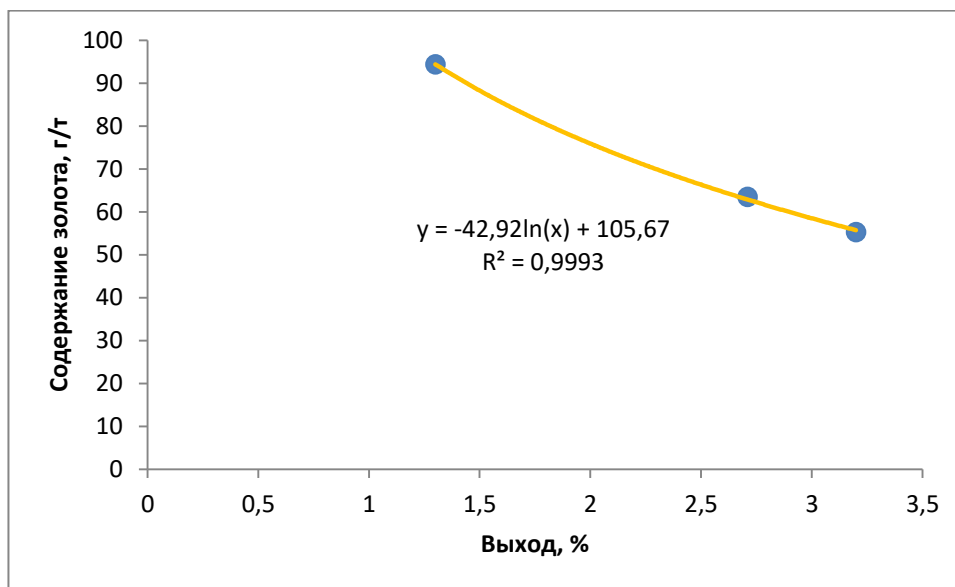


Рис. 30 Зависимость качества флотационного концентрата от выхода.

Полученные результаты подтвердили наши предположения о максимально возможном качестве концентратов при приемлемых извлечениях полезных компонентов. Такое поведение руды определяется особенностями минерального состава, а именно балансом распределения золота по минералам-носителям и гранулометрической характеристикой благородного металла. Считаем, что доизмельчение концентрата нецелесообразно в силу высокой доли золота и серебра, связанных с сульфидными минералами.

3.4 Результаты гидрометаллургического опыта

С целью определения способности золота извлекаться из изучаемой руды методом цианирования были проведены опыты. Анализ был выполнен в лаборатории ALS. Пробоподготовка проводилась по методике ROL-21 (сушка и перемешивание).

Вначале был проведен пробирный анализ (Au-AA26) с последующим определением золота методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Результаты анализа приведены в таблице 36.

Таблица 36

Результаты пробирного анализа на золото

Проба	Массовая доля г/г
S-1	2,54

Далее проводился бутылочный тест. Данный тест является отраслевым стандартом и приоритетной процедурой при оценке возможности извлечения золота путем цианидного выщелачивания. В ходе анализа подготовленная руда медленно вводилась в цианидный раствор. В течение теста контролировался уровень кислорода, щелочности, расхода кислоты и другие параметры.

Вначале определялось содержание тонкодисперсного золота методом объемного бутылочного выщелачивания (Au-AA15). Далее для определения упорного золота в руде проводилось объемное бутылочное выщелачивание с предварительной обработкой пробы азотной кислотой (Au-AA15 mod). И в заключение расчетным методом было посчитано силикатное золото. Полученные результаты приведены в таблице 37.

Таблица 37

Результаты бутылочного теста

	Содержание, г/т	Извлечение, %
Тонкодисперсное самородное золото	1,97	82
Упорное золото в сульфидах	0,26	10,8
Силикатное золото	0,173	7,2

Результаты бутылочного теста показали, что содержание в руде тонкодисперсного самородного золота составляет 1,97 г/т, что составляет 82% его извлечения, а содержание упорного золота в сульфидах составляет 0,26 г/т, при извлечении 10,8%. Оставшиеся 0,173 г/т составляет силикатное золото (рис. 31).

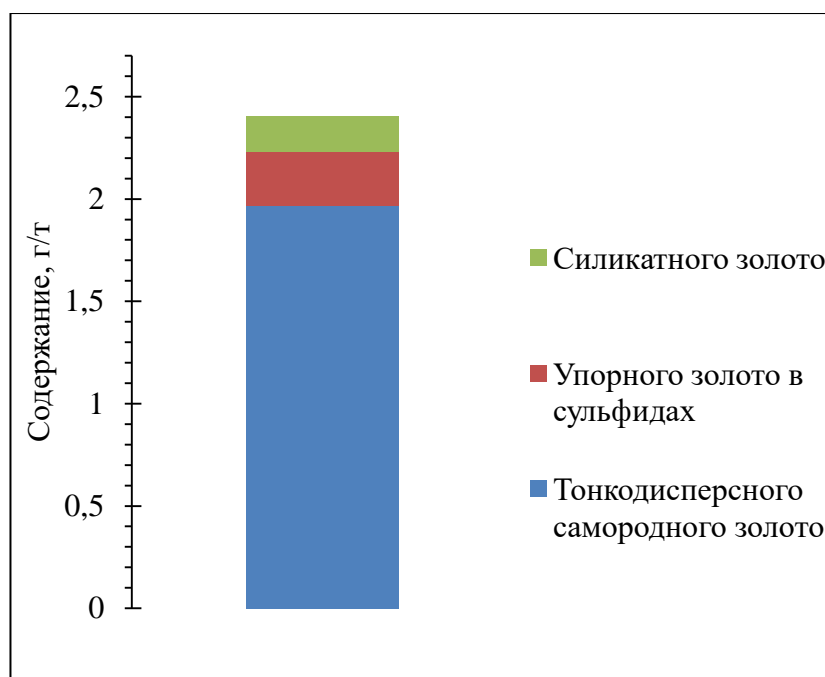


Рис. 31 Результаты бутылочного теста

3.5 Обоснование выбора схемы обогащения

Подводя итоги технологических опытов руд рудопроявления Сикакангас, был сделан выбор оптимальной схемы обогащения. Сравнение степени извлечения золота для различных схем обогащения приведено на рис. 32.

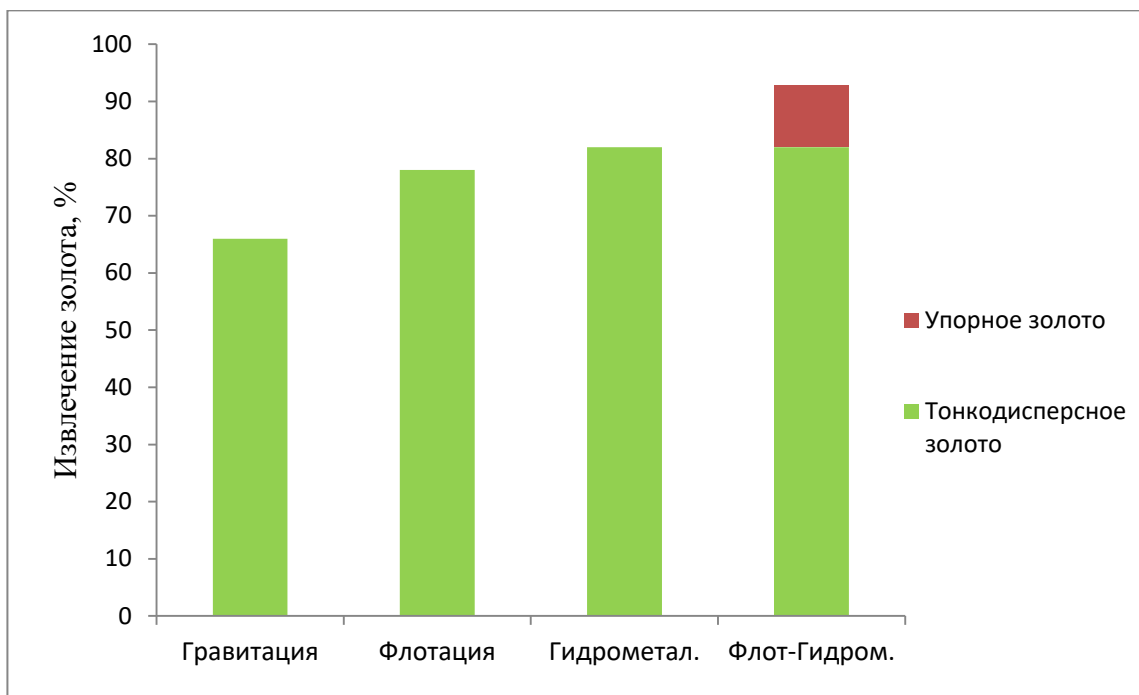


Рис. 32 Извлекаемая ценность для различных схем обогащения пробы S-1 рудопроявление Сикакангас

Из полученного графика следует, что гравитационный метод обогащения руд показывает невысокую эффективность извлечения золота на уровне 66%. Флотационная схема обогащения показала большую эффективность 78%, однако учитывая размерность золота (<10 мкм) и форму нахождения его, максимального извлечения достигнуто не будет. Гидрометаллургический метод показал извлечение золота на уровне 82%, а комбинированная флотационно-гидрометаллургическая схема обогащения демонстрирует наилучший показатель извлечения 88%.

Таким образом, для обогащения руд рудопроявления Сикакангас рекомендуется применять комбинированный флотационно-гидрометаллургический метод.

Заключение

В данной работе были выявлены критерии технологической типизации золотоносных руд для разработки метода прогноза технологических свойств руд месторождений золота на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Для выполнения поставленной цели были обобщены данные по 7 ранее изученным месторождениям (Албазино, Елочка, Капан, Невенрекан, Нежданинское, Тамуньер, Пещерный), на которых было отобрано 19 технологических проб. В дальнейшем для разработки метода прогнозирования способа обогащения золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ были выделены важнейшие критерии (гранулометрия, формы нахождения золота, степень окисленности руды), влияющие на способ обогащения.

Выполненный автором сравнительный анализ различных типов руд позволил обосновать общие закономерности и выявить зависимости их технологических свойств от вещественного состава.

Для проверки полученных результатов, было изучено рудопроявление Сикакангас (Sikakangas), расположенное в западной части Финляндии. Исследование включало в себя интерпретацию химических анализов, петрографическое описание шлифов, минераграфические и электронно-микроскопические исследования аншлифов.

На основании сопоставления результатов анализов и ранее разработанных на других месторождениях критериев был сделан прогноз по оптимальному способу обогащения руд рудопроявлению Сикакангас, который в дальнейшем подтвердился технологическими опытами.

Разработанная в исследовании схема технологической типизации золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ оказалась релевантной для ее дальнейшего применения в прогнозировании способа обогащения золоторудных месторождений.

Список литературы

Монографии:

- 1) Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: Учебник для вузов: В 2 т. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. — Т.1. Обогащительные процессы. — 417 с.
- 2) Архипов Г.И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности дальнего востока. Обзор состояния и возможности развития. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. — 830 с.
- 3) Баликов С.В., Дементьев В.Е. Золото: Геологические аспекты. — Иркутск, ОАО "Иргиредмет", 2015. - 414 с.
- 4) Бочаров В.А., Абрютин Д.В. Технология золотосодержащих руд. — Изд. дом МИСиС, 2011, 412 с.
- 5) Глебовицкий В.А. Ранний докембрий Балтийского щита. — СПб: Наука, 2005. — 711 с.
- 6) Изойтко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. — СПб: Наука, 1997, 582 с.
- 7) Козин В.З. Исследование руд на обогатимость. — Урал. Гос. Горный ун-т, Екатеринбург: Изд.-во УГГУ, 2008. — 312 с.
- 8) Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. — СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012, 560 с.
- 9) Слабунов, А.И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. — 296 с.
- 10) Petruk W. Applied mineralogy in the mining industry. — Ottawa: Elsevier, 2000 — 287 p.

Учебные и справочные пособия:

- 1) Богатиков О.А., Морозов А.Ф., Петров О.В. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. — СПб: Изд-во «ВСЕГЕИ», 2009 г., 160 с.
- 2) Исаенко М.П., Боришанская С.С., Афанасьева Е.Л. Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1986. 382 с.
- 3) Лодочников В. Н. Главнейшие породообразующие минералы. Издание 5-е, испр. и доп. «Недра», 1974, 248 с.
- 4) Маракушев А.А., Бобров А.В., Перцев Н.Н., Феногенов А.Н. Петрология I. Основы кристаллооптики и породообразующие минералы. — М.: Научный Мир, 2000. — 316 с.

Статьи в журналах:

- 1) Волков В.А., Генкин А.Д., Гончаров В.И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское // Тихоокеанская геология, 2007, том 25, №6, С. 18-29.
- 2) Минц М.В., Соколова Е.Ю. Объёмная модель глубинного строения свекофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // Труды Карельского научного центра РАН №2. 2018. С. 34-61
- 3) Нохрина Д.А., Мурзин В.В., Молошаг В.П., Егоров С.А. Вещественный состав метасоматитов и руд Тамуньерского месторождения (северный Урал) // Ежегодник-2009, Тр. ИГГ УрО РАН, вып. 157, 2010, С. 234–236.
- 4) Трушин С.И., Кириллов В.Е. Месторождение Албазино – новый для Дальнего Востока промышленный тип золотого оруденения // Региональная геология и металлогения, 2018, №73, С. 60–67.

Тезисы докладов:

- 1) Балицкий В.С., Мозгова Н.Н., Озерова Н., Дороговин Б.А., Комова В.В. Условия образования самородной сурьмы и антимонита в сурьмяных месторождениях (по анализу включений и экспериментальным данным). // Доклад советских геологов к XXV сессии Международного геологического конгресса по проблеме «Минералогия», 1975.
- 2) Савилова Е.Б., Яночкин К.А., Теллуриды и селениды рудных месторождений // Конф.: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры, Оренбург, 2016, С. 920-922.

Фондовые материалы:

- 1) Гриков А.В. Геологическое строение и проект оценочных работ золотоносной зоны Воронцовская (Свердловская область). Бакалаврская работа. Томск, 2016, 129 с. (Кафедра: Геоэкологии и геохимии).
- 2) Егорова, С.В. Палеопротерозойские габбронориты беломорской и карельской провинций Фенноскандинавского щита: сравнительный анализ состава, условий формирования и метаморфических преобразований: дис. ... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.04 / – Петрозаводск, 2017. – 221 с.
- 3) Ларионова, Ю.О. Изотопная геохимия и геохронология золоторудной минерализации в архейских и палеопротерозойских комплексах Карелии: дис. ... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.09 / – Москва, 2008. – 216 с.
- 4) Eilu P., Pankka H., FINGOLD – a public database on gold deposits in Finland. Version 1. Digitaaliset tietotuotteet 10. Espoo: Geological Survey of Finland, 2010.
- 5) Isomaa, J., Koistinen, E. & Kärkkäinen, N. 2010. Geological Survey of Finland, Report M19/2222/2010/55

- 6) Lehtonen, Matti I.; Kujala, Hannu; Kärkkäinen, Niilo; Lehtonen, Arja; Mäkitie, Hannu; Mänttari, Irmeli; Virransalo, Petri; Vuokko, Jouko 2005. Etelä-Pohjanmaan liuskealueen kallioperä. Summary: PreQuaternary rocks of the South Ostrobothnian Schist Belt. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti Geological Survey of Finland, Report of Investigation 158, 125 p., 3 apps., 1
- 7) Pekka, Sipilä; Kujala, Hannu; Torssonen, Markus 2008. Oravaisten-Lapuan-Alahärmän kallioperä. Abstract: Pre-Quaternary rocks of the Oravainen-Lapua-Alahärmä area. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti Geological Survey of Finland, Report of Investigation 170, 40 p., 4 apps
- 8) Perte D., James A., Urbisnov S., Meakin A. CSA Global Report N° R376.2018 POLORE01 Nezhdaninskoye MRE and ORE, 2018, 337p.
- 9) Polymetal International plc. 20 лет устойчивого развития. Отчет об устойчивом развитии за 2017 год. 2017, 41 с.

Ресурсы с сети интернет:

- 1) <http://www.gtk.fi> дата обращения 09.02.2019
- 2) <https://www.mindat.org> дата обращения 23.01.2019
- 3) <https://www.polymetalinternational.com/ru> дата обращения 5.07.2018

