ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

Nº 4 / 2024

Основан в марте 1933 года

Журнал выходит шесть раз в год

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации

(0)

Российское геологическое общество



Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: А.И.Иванов

Е.А.Наумов (зам. главного редактора), Н.В.Милетенко (зам. главного редактора), Т.М.Папеско (зам. главного редактора),

Е.М.Аксенов, А.Н.Барышев, А.И.Варламов, С.С.Вартанян, В.Д.Конкин, А.А.Кременецкий, С.Г.Кряжев, М.И.Логвинов, Г.А.Машковцев, И.Ф.Мигачёв, А.И.Черных, А.Ю.Розанов, Г.В.Седельникова, И.Г.Спиридонов, В.И.Старостин, Е.Г.Фаррахов, Г.К.Хачатрян

Содержание

ОРГАНИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ, ЭКОНОМИКА, НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Минькин К. М., Столяров И. О., Старостин И. А.
Оценка результативности завершённых в 2023 г. гео-
логоразведочных работ на цветные и благородные
металлы, выполненных за счёт средств федерального
бюджета

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ПРИКЛАДНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Карамышев А. В.

Автоматизированное картирование металлотектов	
с использованием методов глубокого машинного	
обучения	19

МЕСТОРОЖДЕНИЯ РУДНЫХ И НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Гусарова В. В., Раткин В. В., Чугаев А. В., Тихоми-	
ров Д. В., Елисеева О. А.	
Месторождение Южное: Sn-Ag-Pb-Zn орогенная ме-	
таллогения Сихотэ-Алиня	35

Четвертаков И. В., Джангиров М. Ю., Шарыгин И. С., Гладкочуб Е. А. Золотоносные россыпи Юрского месторождения и их возможные коренные источники (Становой хребет) 49

ПЕТРОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

XIV Международная научно-практическая кон-	
ференция, посвящённая 90-летию ЦНИГРИ	77
Рудная школа ЦНИГРИ 2025	78

Редакция: Т. М. Папеско, А. П. Фунтикова Компьютерная верстка: А. Д. Юргина

3

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования науки Российской федерации журнал включён в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук» Свидетельство о регистрации в средствах массовой информации № 01217 от 03 июня 1992 г. Подписано в печать 23.09.2024 Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1 Телефон: (495) 315-28-47. Факс: (495) 315-43-47. Е-mail: ogeo@tsnigri.ru Сайт: http://tsnigri.ru/o_geology Сайт электронной библиотеки: http://elibrary.ru

Типография ФГБУ «ЦНИГРИ»

DOI:10.47765/0869-7175-2024-10016

УДК 553.411:550.812.1 © К. М. Минькин, И. О. Столяров, И. А. Старостин, 2024

Оценка результативности завершённых в 2023 г. геологоразведочных работ на цветные и благородные металлы, выполненных за счёт средств федерального бюджета

В ходе решения задач научно-методического сопровождения геологоразведочных работ (ГРР) по объектам Госзаказа в рамках работ ФГБУ «ЦНИГРИ» по Госзаданию «Опытно-методические и тематические работы» проведён анализ ожидаемых и полученных результатов ГРР на двадцати объектах, завершённых в 2023 г.

По итогам анализа отмечено выполнение заданий по локализации и оценке прогнозных ресурсов свинца, цинка и золота на уровне не ниже средних показателей последних лет. Практически в полном объёме эти задания выполнены на одном объекте ГРР на цветные металлы и на пяти объектах ГРР на золото. Рассмотрены основные причины невыполнения/недовыполнения задания по локализации и оценке прогнозных ресурсов благородных и цветных металлов по объектам Госзаказа.

Сделан вывод о том, что поисковые ГРР на современном уровне остаются высокорискованным в экономическом отношении производством. Снижение рисков поисковых работ возможно за счёт внедрения в практику ГРР мелко-среднемасштабных прогнозно-минерагенических работ, специализированных на определённый вид твёрдых полезных ископаемых (ТПИ), особенно в пределах слабоизученных территорий, а также за счёт более эффективного проведения ГРР.

Ключевые слова: прогнозные ресурсы, апробация, золото, цветные металлы, результаты ГРР, объекты Госзаказа, научно-методическое сопровождение, поисковые ГРР.

МИНЬКИН КОНСТАНТИН МАТВЕЕВИЧ, начальник отдела¹, minkin@tsnigri.ru

СТОЛЯРОВ ИГОРЬ ОЛЕГОВИЧ, ведущий инженер¹, аспирант², stolyarov@tsnigri.ru

СТАРОСТИН ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ, ведущий инженер¹, starostin@tsnigri.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», г. Москва

Estimation of the effectiveness of geological exploration projects for base and precious metals, completed in 2023 at the expense of the Russian Federal budget

K. M. MINKIN, I. O. STOLYAROV, I. A. STAROSTIN

Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals" (FSBI "TSNIGRI"), Moscow

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow

As part of the task of the FSBI TsNIGRI for the scientific and methodological support of geological exploration projects included into the State Order list of objects, that is provided by the State Assignment "Experimental, Methodological and Thematic Works", a compartive analysis has been performed of the expected and actually obtained results of the geological exploration at 20 projects completed in 2023.

Based on the analysis, it was noted that the targets for localization and assessment of the forecasted resources of lead, zinc, and gold had been fulfilled at a level not lower than the average indicators of recent years. These targets

were almost in full completed at 1 geological exploration project for base metals and at 5 geological exploration projects for gold. The main reasons were considered for the non-fulfillment/underfulfillment of the targets for localization and assessment of the forecast resources of precious and base metals for the State Order objects.

It has been concluded that early phase geological exploration projects at the current level remain a high-risk production in economic terms. Reduction of the risks of the prospecting is possible by means of introduction into the practice of geological surveys of small- and medium-scale forecast-minerogenic works specialized on a certain type of solid minerals, especially within poorly studied territories, as well as by means of more efficient conducting of the geological surveys.

Key words: forecast resources, approbation, gold, base metals, geological exploration results, State Order objects, scientific and methodological support, early phase geological exploration.

ФГБУ «ЦНИГРИ» как ведущему отраслевому институту по алмазам, благородным и цветным металлам (АБЦМ) в рамках Госзадания «Опытнометодические и тематические работы» поручено выполнение комплекса работ по методическому сопровождению объектов геологоразведочных работ на АБЦМ, выполняемых за счёт средств федерального бюджета.

Одной из важнейших задач научно-методического сопровождения по объектам Госзаказа наряду с выбором приоритетных объектов, разработкой регламентирующих документов (технических (геологических) заданий и др.), сопровождением и апробацией промежуточных результатов ГРР является оценка результативности завершённых ГРР в части выполнения геологического задания по локализации и оценке прогнозных ресурсов АБЦМ, предусмотренного Госконтрактами по этим объектам.

В методическом плане решение этой задачи специалистами института осуществлялось выполнением комплекса работ, включающего:

 апробацию представленных на рассмотрение отчётных материалов с результатами завершённых ГРР на АБЦМ с оценкой результатов и качества выполненных ГРР, а также качества материалов по локализации и оценке прогнозных ресурсов АБЦМ;

 подготовку заключений с оценкой результатов и качества выполненных ГРР, рекомендациями по апробации (или доработке) представленных в отчётных материалах оценок прогнозных ресурсов АБЦМ;

• итоговую оценку результативности по завершённым ГРР на АБЦМ в части локализации и оценки прогнозных ресурсов АБЦМ.

Всего по Госконтрактам в 2023 г. работы завершились по двадцати объектам ГРР на цветные и благородные металлы (рис. 1). Из рассматриваемых двадцати объектов тринадцать находятся в пределах Дальневосточного и четыре в пределах Сибирского федерального округа. Данная картина распределения объектов ГРР по федеральным округам отражает в целом тенденцию в геологоразведочной отрасли на переход к воспроизводству минерально-сырьевой базы АБЦМ за счёт высокорискованных объектов удалённых регионов Сибири и Дальнего Востока и в значительно меньшей степени за счёт старых горнопромышленных районов Урала, Северного Кавказа и др.

Для оценки результативности завершённых в 2023 г. геологоразведочных работ на цветные и благородные металлы был выполнен сопоставительный анализ (приведён ниже) положенных в обоснование постановки ГРР и фактически полученных по их результатам прогнозных ресурсов (ПР) цветных и благородных металлов, а также дана оценка степени выполнения технического (геологического) задания (Т(Г)З) по локализации и оценке ПР цветных и благородных металлов по объектам и суммарно по этим видам полезных ископаемых. При этом одними из основных задач являлись выявление и анализ причин невыполнения T(Г)З по локализации и оценке ПР цветных и благородных металлов.

Вся необходимая для анализа информация в отношении локализации и оценки прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов по рассматриваемым объектам Госзаказа сведена в таблицу 1, включающую сведения о ПР (категорий P_3 и P_2) на этапе обоснования объектов, ожидаемые ПР (категорий P_2 и P_1) по Т(Г)З, авторские ПР, локализованные и оценённые по итогам выполненных работ и представленные на апробацию, а также апробированные в ФГБУ «ЦНИГРИ» прогнозные ресурсы по видам ТПИ.



Рис. 1. Карта размещения на территории федеральных округов РФ объектов ГРР (поисковых площадей) на цветные и благородные металлы по Госконтрактам, завершённым в 2023 г.:

1 – золото; 2 – цветные металлы

Из числа завершённых объектов на апробацию прогнозных ресурсов поступили материалы по шестнадцати объектам: золоту – 10, цветным металлам – 6 (см. табл. 1). Ещё по четырём объектам авторские оценки прогнозных ресурсов к апробации не представлялись либо не были рекомендованы к апробации рабочими группами ФГБУ «ЦНИГРИ» как недостаточно обоснованные по причине невыявления руд потенциально промышленных или приближённых к ним по содержанию полезных компонентов.

Основные результаты ГРР по локализации и оценке прогнозных ресурсов по каждому из завершённых объектов ГРР на цветные и благородные металлы приведены ниже.

Цветные металлы. Поисковые работы на цветные металлы (медь, свинец и цинк) завершились в 2023 г. по восьми объектам Госзаказа: по трём объектам на полиметаллические руды (Шумаковскому, Верхнерудиковскому, Маньковскому) и по пяти объектам на медно-порфировые руды (Болонскому, Улантовскому, Шхиперскому, Мечивеемскому и Центрально-Анаджаканскому). Из них успешно ГРР завершились только по Верхнерудиковскому объекту (см. табл. 1). Полиметаллические руды. Объект Верхнерудиковский (Красноярский край) планировался с целью наращивания МСБ высоколиквидных цветных металлов в пределах экономически освоенной территории Красноярского края.

По итогам ГРР на участках Крутом и Северо-Восточном были апробированы прогнозные ресурсы свинца, цинка и попутных кадмия и серебра категории Р₁ в количестве: свинца – 438 тыс. т, цинка – 500 тыс. т, попутных кадмия – 1837 т и серебра – 182 т; категории Р₂: свинца – 140 тыс. т, цинка – 185 тыс. т, кадмия – 708 т, серебра – 50 т.

Задание по оценке прогнозных ресурсов категории P_1 выполнено по всем элементам: свинцу – на 110 % от ожидаемых 400 тыс. т, цинку – на 100 % от ожидаемых 502 тыс. т. Задание по оценке прогнозных ресурсов категории P_2 выполнено частично: по свинцу – на 70% от ожидаемых 200 тыс. т, по цинку – на 46% от ожидаемых 400 тыс. т. Дополнительно оценены и апробированы прогнозные ресурсы кадмия и серебра.

Согласно показателям геолого-экономической оценки выявленных руд по укрупнённым показателям доказана рентабельность освоения данного рудного объекта, который по масштабам

	•											
						Ē	рогнозн	ые pecyp	CBI			Протокол
№п/п	Объекты Госзаказа	Вид ТШИ	Единица измерения	На эт обосно	гапе вания	Ожидаел	аые по анию	Автор	окие	По резул апробя	њтатам щии*	апробации ПР и др. другие документы ФГБУ «ЦНИГРИ»
				\mathbf{P}_2	\mathbf{P}_3	P_	\mathbf{P}_2	P	\mathbf{P}_2	P_	\mathbf{P}_2	
									10	11	12	13
			CB	инец, цин	ік, медь, з	олото, се	peõpo	-				
				Даль	невосточ	ный ФО						
		Свинец	Tbic. T	I	607	70	120	I	I	I	I	
	Поисковые работы на золото-	Цинк	TbIC. T	I	804	80	150	I	I	I	I	Протокол ФГБУ
1	серебросодержащее полиметаллическое оруленение в пределах Маньковской	Медь	Tbic. T	I	I	I	I	293	21,6	I	(177)	«ЦНИГРИ» № 30
	площади (Забайкальский край)	Золото	Т	I	I	I	I	14,7	2,7	I	(11)	от 25.12.2023
		Cepeópo	Г	I	I	250	400	I	I	I	(192)	
				U U	ибирский	Φ0	-	-				
		Свинец	TbIC. T	308	I	170	345	49,5	101	(49,5)	(101)	
	поисковые раооты на золото- серебросодержащее полиметаллическое	Цинк	Tbic. T	625	I	320	710	153	307	(152,8)	(307)	Протокол ФГБУ
0	оруденение в пределах Шумаковской	Медь	Tbic. T	145	I	75	145	27	137	(264)	(137)	«ЦНИГРИ» № 15
	площади Змеиногорского рудного	Золото	Т	I	I	ю	10	0,001	0,02	I	I	от 24.11.2023
	раиона (Алггаискии краи)	Cepeópo	F	I	I	80	170	3,03	1,06	I	I	
				Централ	іьно-Сибі	арский Ф	0	-				
	Поисковые работы на	Свинец	Tbic. T	400	500	400	200	438	140	438	140	
"	полиметаллические руды на	Цинк	TbIC. T	500	1500	500	400	502	185	502	185	Протокол ФГ БУ "ПНИГРИ», № 28
r	Верхнерудиковской площади	Cepeõpo	Т	I	I	I	I	181	50	182	50	OT 24.12.2023
	(Енисеискии кряж, красноярскии краи)	Кадмий	Т	I	I	I	I	1837	708	1837	708	
				Медь, ці	инк, золо	ro, cepe6p	0					
				Далы	невосточ	ный ФО						
4	Поисковые работы на медно- порфировое оруденение на Мечивеемской перспективной площади (Магаданская область)	Медь	TbIC. T	I	I	I	1000	I	I	I	I	Заключение ФГБУ «ЦНИГРИ» на окончательный отчёт от 13.12.2023
Ś	Поисковые работы на золото-медно- порфировое и золотое оруденение	Медь	TbIC. T	I	736,9	I	500	I	30,5	I	(24,4)	Протокол ФГБУ «ПНИГРИ» № 20
,	в пределах Болонской площади (Хабаровский край)	Золото	F	I	40,1	I	40	I	I	I	I	or 09.08.2024

Табл. 1. Результаты работ по локализации и апробации прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов по Госконтрактам, завершённым в 2023 г.

											Продолжение табл. 1
								10	Π	12	13
Поисковые работы на золото- медно-порфировые руды в пределах Медь	Медь	TbIC. T	I	1650	I	800	I	12,3	I	(78)	Протокол ФГБУ
Центрально-Анаджаканской площади Золото (Хабаровский край)	Золото	Т	I	105	I	50	I	5,6	I	(37)	«ЦНИІ РИ» Л ² 51 от 26.12.2023
Поисковые работы на медно- порфировое оруденение в Шхиперской Медь перспективной площади (Магаданская область)	Медь	Tbic. T	I	I	I	1000	I	I	I	I	Заключение ФГБУ «ЦНИГРИ» на окончательный отчёт от 03.07.2023
			0	ибирский	iΦ0						
Поисковые работы на медно- порфировое оруденение Улантовской Медь площади (Новосибирская область)	Медь	TbIC. T	I	I	200	400	96,4	4,8	(96,37)	(2,19)	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 20 от 21.12.2023
				Золотс							
			Даль	невостон	ный ФО						
Поисковые работы на рудное золото в пределах Мурунского рудного узла (Республика Саха (Якутия))	Золото	Т	11,1	85	30	70	20,1	10,9	(0,234)	I	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 17 от 19.12.2023
Поисковые работы на рудное золото в пределах Рэдергинской площади Томмот-Эльконской зоны разломов (Республика Саха (Якутия))	Золото	H	I	91,9	10	80	15,1	11,7	15,095	10,27	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 19 от 20.12.2023
Поисковые работы на золотое оруденение в пределах Иендинской Золото площади (Забайкальский край)	Золото	Т	12,3	70	10	35	7,7	1,3	5,06	1,37	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 29 от 25.12.2023
Поисковые работы на золотоносные коры выветривания в пределах Укырской площади (Республика Бурятия)	Золото	Т	5	I	10	30	0,51	I	0,17	0,27	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 12 от 28.05.2024
Поисковые работы на рудное золото в пределах Шилгонского рудного поля Дулгалахской минерагенической зоны (Республика Саха (Якутия))	Золото	Ŧ	I	83,1	25	75	28,4	17,9	28,4	17,9	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 16 от 19.12.2023
Поисковые работы на золото в пределах Буралкитского рудного узла Золото (Магаданская область)	Золото	Т	I	I	25	40	I	I	I	I	Заключение ФГБУ «ЦНИГРИ» на окончательный отчёт от 22.05.2023
Поисковые работы на золото на перспективных участках Провиденского золоторудного узла (Чукотский АО)	Золото	F	I	127	I	70	I	21,7	I	(0,86)	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 11 от 02.11.2023

7

Организация, управление, экономика, недропользование

												Окончание табл. 1
									10	11	12	13
				Централ	тьно-Сибі	ірский Ф	С					
16	Поисковые работы на рудное золото в пределах Верхнеорловской площади (Иркутская область)	Золото	Т	I	40	5	35	0,36	0,29	(0,234)	I	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 6 от 31.05.2023
				~	ральский	ФО						
17	Поисковые работы на рудное золото и золотоносные коры выветривания на Западно-Режевской площади (Свердловская область)	Золото	Т	I	42	15	50	24,65	38,8	24,65	38,75	Протокол ФГБУ «ЦНИГРИ» № 18 от 19.12.2023
				Север	ю-Кавказ	ский ФО						
ç.	Поисковые работы на рудное золото	Золото	Т	I	180	15	60	15,6	60,6	15,54	34,04	Протокол ФГБУ
18	в пределах bайкомской площади (Республика Северная Осетия – Алания)	Cepeõpo	Т	I	I	I	I	77	232	77,69	147,1	«ЦНИІ РИ» № 26 от 22.12.2023
19	Поиски месторождений золого-кварц- сульфидных руд в пределах Верхне- Аргунской перспективной площади Тюалойского рудного узла (Чеченская Республика)	Золото	Т	I	I	I	50	I	I	I	I	Заключение ФГБУ «ЦНИГРИ» на окончательный отчёт от 11.12.2023
				3(олото, сер	eõpo						
				Даль	невосточі	ный ФО						
	Поисковые работы на золото и серебро	Золото	Т	I	I	10	20	0,99	0,76	(0,67)	(0, 89)	Протокол ФГБУ
20	в пределах центрального рудного узла Каначалано-Амгуэмской зоны (Чукотский АО)	Cepeõpo	Т	I	I	250	500	68,3	43,6	(46,6)	(39,1)	«ЦНИГРИ» № 10 от 18.09.2023
	Ĺ		:		-			:	11114			

Примечание. *В скобках указано количество прогнозных ресурсов, принятых по результатам апробации к внутреннему учёту ФГБУ «ЦНИГРИ».

отвечает среднему полиметаллическому месторождению. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности постановки детализационных геологоразведочных работ оценочной стадии.

Объект Шумаковский (Алтайский край) при планировании предусматривался для повышения инвестиционной привлекательности объектов полиметаллических руд в пределах неравномерно изученной в прошлые годы перспективной площади в экономически развитом горнорудном районе Алтайского края.

По результатам апробации локализованные в результате ГРР прогнозные ресурсы приняты только к внутреннему учёту в ФГБУ «ЦНИГРИ» по категории P_1 в количестве: меди – 264 тыс. т, свинца – 49,5 тыс. т, цинка – 152,8 тыс. т со средними содержаниями 0,47, 0,89 и 2,73 % соответственно; категории P_2 – меди 136,8 тыс. т, свинца – 100,6 тыс. т и цинка – 307,4 тыс. т со средними содержаниями 0,77, 0,57 и 1,73 % соответственно.

Как показали результаты укрупнённой геологоэкономической оценки (УГЭО), отработка объекта с такими прогнозными ресурсами меди, свинца, цинка нерентабельна; инвестиционные вложения не окупаются, что связано главным образом с небольшим количеством прогнозных ресурсов и их низким качеством (незначительной мощностью выявленных рудных тел, в первые метры, и низким содержанием полезных компонентов в рудах). Задание по объекту в части локализации и оценки прогнозных ресурсов не выполнено.

Объект Маньковский (Забайкальский край) при постановке работ ожидался как перспективный на выявление золото-серебросодержащих полиметаллических руд высокого качества нового для региона колчеданно-свинцово-цинкового «нойонтологойского» типа.

Выявленные в ходе выполненных ГРР руды по своему типу не соответствовали рудам месторождения Нойон-Тологой. По результатам апробации приняты только к внутреннему учёту в ФГБУ «ЦНИГРИ» локализованные в ходе ГРР прогнозные ресурсы категории P_2 в количестве: меди – 176,4 тыс. т со средним содержанием 0,33%, серебра – 191,6 т со средним содержанием 3,6 г/т, золота попутного – 11,0 т со средним содержанием 0,21 г/т.

Задание по объекту в части локализации и оценки прогнозных ресурсов не выполнено. Основной причиной его невыполнения являются низкие содержания компонентов в рудах, что повлекло отрицательные результаты укрупнённой геологоэкономической оценки. Ожидаемые руды «нойонтологойского» типа не выявлены.

Медно-порфировые руды. Объект Болонский (Хабаровский край) предусматривался для расширения МСБ меди и золота региона за счёт выявления расположенных на незначительной глубине золото-медно-порфировых потенциальных месторождений вблизи осваиваемого однотипного Малмыжского месторождения.

В ходе ГРР по объекту выявлено оруденение с недостаточными для рентабельной промышленной отработки количеством прогнозных ресурсов и содержанием меди. По результатам апробации выявленных в результате ГРР медно-порфировых руд были приняты к внутреннему учёту ФГБУ «ЦНИГРИ» прогнозные ресурсы меди категории P_2 в количестве 24,4 тыс. т меди со средним содержанием 0,14%.

Геологическое задание в части локализации и оценки прогнозных ресурсов не выполнено.

Объект Мечивеемский (Магаданская область) был предназначен, прежде всего, для определения возможности развития МСБ меди на относительно слабоизученных территориях региона за счёт выявления крупнообъёмных золото-молибден-меднопорфировых руд.

Отсутствие установленных в ходе детализационных ГРР сечений с содержаниями меди, отвечающих оценочным параметрам, не позволило провести оценку ПР меди категории Р₂. Авторская оценка локализованных в результате завершённых ГРР прогнозных ресурсов золота для рудопроявления Быстрый составила 1416,8 кг при бортовом содержании 0,01 г/т и средневзвешенном содержании 0,064 г/т, что не соответствует параметрам объектов, промышленное освоение которых будет экономически целесообразным в обозримом будущем. Апробация авторских прогнозных ресурсов золота была признана исполнителем ГРР нецелесообразной.

По результатам завершённых ГРР, задание по локализации и оценке прогнозных ресурсов (1000 тыс. т меди категории P_2) не выполнено. При этом южная часть площади (около 400 км²) не получила поисковую оценку горными работами, поскольку это не предусматривалось проектом.

Необходимо отметить, что отсутствие положительных результатов ГРР во многом может быть связано с недостаточной изученностью этой территории предшествующими работами. При обосновании поисковых работ на объекте использовались материалы главным образом государственной геологической карты масштаба 1:200000 и групповой геологической съёмки масштаба 1:50000 советских лет, что было недостаточно как для апробации прогнозных ресурсов меди категории Р₃, подтверждающих перспективы локализации в пределах поисковой площади промышленно значимых медно-порфировых объектов, так и для локализации меньшей по размеру площади, необходимой для поисковой оценки в рамках выделенных ассигнований и сроков.

Объект Шхиперский (Магаданская область), также как и в предыдущем случае, предназначался для определения возможности развития МСБ меди на относительно слабоизученных территориях региона за счёт выявления крупнообъёмных золото-молибден-медно-порфировых руд.

По результатам завершённых ГРР выполнена авторская оценка прогнозных ресурсов меди категории $P_2 - 2,17$ тыс. т (среднее содержание меди 0,028 %) по экономически необоснованным параметрам, значительно ниже заявленных в техническом задании (ПР меди – 1 млн т со средними содержаниями меди не менее 0,4 %). Поэтому прогнозные ресурсы к апробации представлены не были.

Задание по локализации и оценке прогнозных ресурсов (1000 тыс. т меди категории P₂) не выполнено.

Вместе с тем запланированный проектом к проведению объём горно-буровых работ был недостаточен для полной оценки выявленных перспективных геохимических аномалий меди и золота, сопряжённых с перспективными участками Сульфидный и Хрустальный-1. Также остались недоизученными горно-буровыми работами контрастные комплексные геохимические аномалии, перспективные на выявление золото-медно-порфирового оруденения на участках Атыкан, Мэлдек, Мандычан. По выявленному комплексу поисковых признаков эти участки определены как перспективные для продолжения поисковых работ.

Отрицательные результаты выполненных поисковых работ по объекту в сочетании с неполной поисковой изученностью площади, как и для Мечивеемского объекта, могли быть следствием недостаточной изученности площади на время планирования их постановки. При Обосновании поисковых работ по Шхиперскому объекту, также как и в предыдущем случае, использовались материалы главным образом государственной геологической карты масштаба 1:200000 и групповой геологической съёмки масштаба 1:50000 советских лет.

Объект Улантовский (Новосибирская область) при постановке поисковых работ на медно-порфировые руды предполагался для создания перспективной МСБ меди, располагающейся в непосредственной близости от Урско-Салаирского полиметаллического рудного района.

По результатам апробации выявленных в результате ГРР медно-порфировых руд были приняты к внутреннему учёту ФГБУ «ЦНИГРИ» прогнозные ресурсы меди и молибдена категории P₁ в количестве 96,37 тыс. т меди со средним содержанием 0,25 % и 9,25 тыс. т молибдена со средним содержанием 0,017 %, а также категории P₂ – 2,19 тыс. т меди и 1,21 тыс. т молибдена.

По результатам выполненных поисковых работ выявлен мелкий по масштабам и бедный по содержаниям полезных компонентов молибден-меднопорфировый объект с отрицательной эффективностью освоения. Значимые концентрации попутного золота, характерного для медно-порфировых месторождений, которые могли бы повысить экономическую значимость объекта, не выявлены. Задание по оценке и локализации прогнозных ресурсов не выполнено.

Объект Центрально-Анаджаканский (Хабаровский край) планировался с целью воспроизводства МСБ меди и золота региона за счёт локализации промышленно значимых крупнообъёмных золото-медно-порфировых руд в пределах выявленной предшествующими работами перспективной площади.

По результатам апробации локализованные в ходе завершённых ГРР прогнозные ресурсы меди и золота категории Р₂ (меди – 78,0 тыс. т со средним содержанием 0,57 % и золота – 37,9 т со средним содержанием 0,73 г/т) с учётом итогов укрупнённой геолого-экономической оценки характеризуются крайне низкими экономическими показателями отработки и были рекомендованы только для постановки на внутренний учёт.

Геологическое задание по оценке прогнозных ресурсов золота и меди категории P_2 (меди – 800 тыс. т и золота – 50 т) не выполнено. Имеющие промышленное значение по количеству и качеству руды в ходе ГРР по объекту не выявлены.

Вместе с тем поисковые работы были сосредоточены на выделенных на стадии проектирования отдельных участках Анаджаканского рудного узла, для которого в целом остаются перспективы обнаружения промышленно значимых медно-порфировых руд. Это подтверждается апробированными для Анаджаканского рудного узла (542 км²) прогнозными ресурсами меди и золота категории P₃ в количестве: меди – 300 тыс. т со средним содержанием 0,29 % и золота – 32 т со средним содержанием 0,51 г/т.

Благородные металлы (золото, серебро). В 2023 г. геологоразведочные работы, направленные на локализацию прогнозных ресурсов рудного золота, завершились по одиннадцати объектам Госзаказа (Мурунскому, Рэдергинскому, Иендинскому, Укырскому, Верхнеорловскому, Шилгонскому, Байкомскому, Западно-Режевскому, Провиденскому, Буралкитскому и Верхне-Аргунскому), а также по одному объекту (Центральному) на золото-серебряные руды (см. табл. 1). Следует отметить, что постановка поисковых работ по упомянутым объектам, как правило, обосновывалась необходимостью воспроизводства МСБ золота в развитых горнопромышленных районах Дальнего Востока, Сибири и Урала, а также развитием МСБ золота в новых районах Северного Кавказа, нетрадиционных на этот тип полезного ископаемого. Прирост прогнозных ресурсов золота в результате завершённых ГРР получен по первым пяти объектам из ниже рассмотренных.

Объект Байкомский (Республика Северная Осетия – Алания). По результатам завершённых ГРР апробированы прогнозные ресурсы золота категории $P_1 - 15,54$ т со средним содержанием 1,32 г/т и $P_2 - 34,04$ т со средним содержанием 1,43 г/т, а также серебра категории $P_1 - 77,69$ т со средним содержанием 6,6 г/т и категории $P_2 - 147,07$ т со средним содержанием 4,1 г/т.

Укрупнённая геолого-экономическая оценка показала положительную эффективность отработки выявленных объектов Байкомской площади при условии отработки руд совместным предприятием с близрасположенным потенциальным месторождением Какадур.

Задание по оценке прогнозных ресурсов золота по объекту Байкомский категории P_1 выполнено полностью (на 104% от ожидаемых 15 т), категории P_2 – выполнено частично (на 57% от ожидаемых 60 т) в связи с тем, что выявленное оруденение отдельных блоков не отвечает требованиям промышленности.

Объект Западно-Режевский (Свердловская область). По результатам проведённых ГРР апробированы прогнозные ресурсы золота категории P₁ – 24,65 т со средним содержанием 1,34 г/т и ка-

тегории $P_2 - 38,75$ т со средним содержанием 0,99 г/т.

Полнота выполнения геологического задания по оценке прогнозных ресурсов золота по Западно-Режевскому объекту составляет: категории $P_1 - 164\%$ от ожидаемых 15 т и категории $P_2 - 78\%$ от ожидаемых 50 т. По сумме прогнозных ресурсов плановое задание выполнено практически полностью.

Объект Иендинский (Забайкальский край). По результатам поисковых работ 2021–2023 гг. для выявленных руд на рудопроявлениях Северо-Иендинское и Юбилейное были апробированы прогнозные ресурсы золота категории P₁ в количестве 5,06 т со средним содержанием 2,21 г/т и категории P₂ – 1,37 т со средним содержанием золота 2,09 г/т.

На основе геолого-экономической оценки выявленных в пределах Иенденской площади объектов золота возможна деятельность горнодобывающего предприятия с положительными интегральными экономическими показателями, в том числе по варианту использования действующей ЗИФ на месторождении Наседкино.

Полнота выполнения геологического задания по оценке прогнозных ресурсов золота по Иендинскому объекту составила: категории $P_1 - 51\%$ от ожидаемых 10 т и категории $P_2 - 4\%$ от ожидаемых 35 т. Основная причина недовыполнения задания – недостаточное количество выявленных руд, удовлетворяющих требованиям промышленности в силу природных особенностей объекта.

Объект Рэдергинский (Республика Саха (Якутия)). По результатам завершённых ГРР апробированы прогнозные ресурсы золота категории $P_1 - 15,095$ т и $P_2 - 10,27$ т. Полнота выполнения геологического задания в части оценки прогнозных ресурсов золота по объекту составляет: категории $P_1 - 151$ % от ожидаемых 10 т и категории $P_2 - 13$ % от ожидаемых 80 т.

Задание по оценке прогнозных ресурсов золота категории P₂ выполнено лишь частично, главным образом вследствие недостаточного количества и качества выявленного оруденения по ряду перспективных участков.

Объект Шилгонский (Республика Саха (Якутия)). По результатам завершённых ГРР по Шилгонскому объекту апробированы прогнозные ресурсы золота категории Р₁ в количестве 28,4 т при среднем содержании 2,37 г/т и категории Р₂ – 17,9 т при среднем содержании 2,32 г/т. Геологическое задание по оценке прогнозных ресурсов золота категории P_1 выполнено полностью (на 114% от ожидаемых 25 т), категории P_2 выполнено частично (на 24% от ожидаемых 75 т) по причине недостаточного количества выявленного оруденения надлежащего качества вследствие природных особенностей объекта.

Объект Верхне-Аргунский (Чеченская Республика). В результате проведённого в 2021–2023 гг. комплекса геологоразведочных работ (опережающих маршрутных, геохимических, геофизических и горных) значимые рудные сечения не были выявлены. Соответственно, прогнозные ресурсы золота по итогам завершённых работ не оценивались и на апробацию не представлялись.

Геологическое задание в части локализации и оценки прогнозных ресурсов золота категории P₂ (50 т) не выполнено. Было установлено, что по геологическим и минералогическим характеристикам, спектру индикаторных геохимических элементов и уровню содержаний золота минерализация в большей мере может быть сопоставлена с рудами Какадур-Ханикомского золотосодержащего полиметаллического месторождения, локализованного в сходной геологической обстановке на территории Северной Осетии, чем с собственно золоторудными объектами.

Объект Верхнеорловский (Иркутская область). По результатам апробации локализованные в ходе завершённых ГРР прогнозные ресурсы золота категории Р₁ в количестве 0,234 т со средним содержанием золота 1,19 г/т были приняты к внутреннему учёту ФГБУ «ЦНИГРИ».

Геологическое задание по объекту в части оценки прогнозных ресурсов золота категорий P_1 (5 т) и P_2 (35 т) не выполнено. Руды необходимого количества и качества, отвечающие по технико-экономическим показателям требованиям их эффективной отработки, не выявлены.

Объект Укырский (Республика Бурятия). По результатам проведённых ГРР апробированы прогнозные ресурсы золота категории $P_1 - 0,17$ т при среднем содержании 1,75 г/т и категории $P_2 - 0,27$ т при среднем содержании 1,75 г/т, связанные с золотоносной корой химического выветривания. Полнота выполнения геологического задания составила 1,7 % от ожидаемых 10 т по категории P_1 и 0,8 % от ожидаемых 30 т по категории P_2 .

Задание по оценке и локализации прогнозных ресурсов выполнено менее чем на 10 %, что связано с отсутствием ожидаемого количества оруденения в коре химического выветривания. Следует отметить, что ГРР были нацелены на выявление объектов золотоносной коры химического выветривания. Вскрытые отдельными скважинами первичные руды золота не получили поисковую оценку. Объект может представлять инвестиционный интерес для мелких, в том числе юниорских, золотодобывающих компаний.

Объект Мурунский (Республика Саха (Якутия)). По результатам завершённых ГРР по объекту апробированные прогнозные ресурсы золота, удовлетворяющие требованиям их эффективной отработки, не получены; к внутреннему учёту приняты прогнозные ресурсы рудного золота категории Р₁ 234,2 кг со средним содержанием 1,19 г/т.

Геологическое задание по оценке прогнозных ресурсов золота категорий P_1 (5 т) и P_2 (35 т) по объекту не выполнено, так как выявленное в ходе работ оруденение не отвечает требованиям эффективной отработки объекта по технико-экономическим показателям.

Объект Буралкитский (Магаданская область). В результате проведённых ГРР в пределах Буралкитской площади рудные тела, соответствующие оценочным параметрам (бортовое содержание золота 0,5 г/т, минимальное содержание золота в рудном теле 2,0 г/т) технического (геологического) задания, не установлены. Геологическое задание в части локализации и оценки прогнозных ресурсов золота категории P_1 (25 т) категории P_2 (40 т) не выполнено.

Вместе с тем около 50 % Буралкитской площади не было охвачено никакими работами, кроме наземной магнитометрии. Заверка выявленных литохимических аномалий Au, Ag, As выполнена только маршрутами и в недостаточном объёме, при этом некоторые наиболее интенсивные аномалии золота, серебра и мышьяка не заверены штуфным опробованием.

Объект Провиденский (Чукотский АО). Локализованные в ходе ГРР прогнозные ресурсы золота категории Р₂, по результатам апробации, были приняты к внутреннему учёту ФГБУ «ЦНИГРИ» в количестве 0,86 т со средним содержанием золота 2,61 г/т.

Оценённые прогнозные ресурсы золота по количеству не отвечают требованиям к эффективной отработке таких объектов по технико-экономическим показателям. Геологическое задание по оценке и локализации прогнозных ресурсов категории P₂ (70 т) не выполнено.

В результате необоснованного изменения методики опробования (не проводилось бороздовое

опробование ряда пройденных канав и керновое опробование некоторых скважин, показавших по данным спектрозолотометрического анализа сколковых проб наличие содержания золота более 0,5 г/т, как того требовалось проектом) не получилось достоверно оконтурить зоны золотоносных штокверков на участках Гагачий и Хед (в том числе на глубину) и корректно оценить по ним прогнозные ресурсы золота категории P₂. Остались недоизученными рудные поля Скалистое и Ближнее.

Объект Центральный (Чукотский АО). По результатам апробации, локализованные в ходе ГРР прогнозные ресурсы золота и серебра были приняты только к внутреннему учёту ФГБУ «ЦНИГРИ» по причине того, что выявленные руды не отвечают требованиям эффективного промышленного освоения объекта. Эти некондиционные ресурсы составили: золота категории $P_1 - 0,67$ т со средним содержанием 1,91 г/т и серебра – 46,6 т со средним содержанием 133,2 г/т, золота категории $P_2 - 0,89$ т со средним содержанием 1,53 г/т и серебра – 39,1 т со средним содержанием 66,8 г/т.

Геологическое задание по оценке и локализации прогнозных ресурсов золота и серебра категории P_1 (золота 10 т, серебра 250 т) и категории P_2 (золота 20 т и серебра 500 т) не выполнено.

Общие итоги завершённых в 2023 г. ГРР на цветные и благородные металлы, выполненных за счёт федерального бюджета на двадцати объектах Госзаказа, сводятся к следующим.

На цветные металлы, связанные с медно-порфировыми (медь) и полиметаллическими (свинец и цинк) рудами, из восьми объектов Госзаказа поисковые работы завершились успешно только по Верхнерудиковскому объекту полиметаллических руд.

На благородные металлы из двенадцати объектов Госзаказа значимые результаты ГРР в части локализации и оценки прогнозных ресурсов получены по пяти золоторудным объектам, подготовленным для проведения дальнейших оценочных работ и лицензирования (Байкомскому, Западно-Режевскому, Рэдергинскому, Иенденскому и Шилгонскому).

По остальным четырнадцати объектам ГРР прирост прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов не получен.

Количество апробированных прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов в целом составило (рис. 2):



Рис. 2. Результаты выполнения геологического задания по оценке прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов (по категориям Р₁ и Р₂) по Госконтрактам, завершённым в 2023 г.:

категории: 1 – P₁, 2 – P₂

 свинца категории Р₁ – 438 тыс. т (68 % от запланированных 640 тыс. т) и категории Р₂ – 140 тыс. т (21% от запланированных 665 тыс. т);

 цинка категории Р₁ – 502 тыс. т (56 % от запланированных 900 тыс. т) и категории Р₂ – 185 тыс. т (15% от запланированных 1260 тыс. т);

• серебра попутного категории $P_1 - 87$ т (109 % от запланированных 80 т) и категории Р₂ – 14 т (8 % от запланированных 170 т);

• золота (основного компонента) категории Р₁ – 88,8 т (59 % от запланированных 150 т) и категории P₂ – 102,4 т (17 % от запланированных 615 т).

Не получен ожидаемый прирост прогнозных ресурсов меди (категорий P₁ – 275 тыс. т и P₂ – 3845 тыс. т) и серебра (категорий Р₁ – 250 т и Р₂ – 500 т), а также попутного золота (категорий Р₁ – 3 т и Р₂ – 10 т).

Полученные результаты по приросту прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов сопоставимы с полученными за последние 3-4 года, демонстрируя не самый высокий уровень относительно результатов последнего десятилетия (рис. 3). Следует отметить, что рассматриваемые погодовые результаты практически не зависят от варьирующего количества объектов, как это можно было бы предположить. Максимальные результаты в отдельные годы, как правило, достигаются за счёт наиболее успешных

Серебро

2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023

0

Цинк

2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023

70

5 0 3 2

58 36

0 0 0

0 289 85 6 42 37

1 4 3

8%

Выполнение геол. задания,

Выполнение ПР. %

Число объектов

в%

задания 250

геол. 150

Выполнение 100

Число объектов 0

300

200

50

0

Выполнение ПР, % 0 111 216 8

4 1 1

60

50

40

30

20

10

0

0

0 4 2 1 3 0 2 4 1 0 1

52 50

0 0









работ по единичным объектам, доля апробированных прогнозных ресурсов по которым достигает 50–100 % от их общего погодового баланса (табл. 2). В последние годы такие значимые по приросту прогнозных ресурсов объекты не были выявлены.

Невыполнение или недовыполнение заданий по локализации и оценке прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов завершённых в 2023 г. ГРР, с нашей точки зрения, связаны с нижеперечисленным рядом основных причин.

1. Прежде всего необходимо отметить случаи не выявления прогнозируемого оруденения про-

ведённым комплексом ГРР (рудные пересечения, удовлетворяющие заданным оценочным параметрам, не установлены).

Во многом, по нашему мнению, это может быть связано с недостаточной подготовленностью объектов для проведения поисковых работ. Например, ретроспективный анализ качества обоснованности постановки ГРР на объектах Госзаказа на золото показал, что в последнее десятилетие по ряду объектов перспективы площадей для постановки поисковых работ не были обеспечены апробированными прогнозными ресурсами золота, главным образом вследствие недостаточной

Табл. 2. Поисковые объекты Госзаказа с наиболее значимой долей результирующих апробированных прогнозных ресурсов по видам ТПИ последнего десятилетия

Вид ТПИ	Год	Объект	Апробированные прогнозные ресурсы (P ₁ +0,6P ₂), [1]	% от общего
	2015	Гитче-Тырныаузское рудное поле (Кабардино-Балкарская Республика)	230 т	40
Золото	2010	Енисейская, Байкало-Патомская и Верхояно-Колымская золоторудные провинции	110,8 т	47
	2018	Понийский перспективный участок (Хабаровский край)	97 т	100
Серебро	2014	Налёдная площадь (Магаданская область)	1144 т	45
Серебро	2015	Нижнеимнеканская площадь узла (Республика Саха (Якутия))	2524 т	100
	2019	Аллара-Сахский рудный узел (Республика Саха (Якутия))	3865 т	100
Медь	2015	Змеиногорско-Березовогорская площадь (Алтайский край)	204 тыс. т	78
	2013	Пони-Мулинский россыпной узел (Хабаровский край)	237 тыс. т	
	2020	Массив Поаз Мончегорского рудного района (Мурманская область)	387,5 тыс. т	64
		Вересухинско-Комиссаровская площадь (Алтайский край)	171,2 тыс. т	0.0
Свинец	2014	Кличкинская площадь (Забайкальский край)	153,6 тыс. т	80
	2015	Змеиногорско-Березовогорская площадь (Алтайский край)	564 тыс. т	100
	2020	Ивановское рудное поле (Забайкальский край)	238,8 тыс. т	74
	2015	Змеиногорско-Березовогорская площадь (Алтайский край)	1638 тыс. т	100
Цинк	2019	Морянихинская площадь (Красноярский край)	5257 тыс. т	86



Рис. 4. Соотношение числа объектов Госзаказа на золото последнего десятилетия, обеспеченных и не обеспеченных на стадии их планирования апробированными прогнозными ресурсами золота (А), связанная с этим результативность завершённых ГРР по относительному приросту прогнозных ресурсов (Б) и по относительному количеству успешных (с количеством выявленных прогнозных ресурсов не менее 10 % от ожидаемых) объектов (В). Прогнозные ресурсы категорий Р₁ и Р₂ переведены в условные (Р_{усл.} = P₁+0,6P₂, *по* [1]):

1 – обеспеченные и 2 – не обеспеченные при планировании работ апробированными ПР

степени их изученности (рис. 4, А). В результате работ на таких объектах, как правило, промышленно значимые руды не были выявлены, или они выявлены в значительно меньших количествах по сравнению с объектами, более подготовленными для постановки поисковых работ (см. рис. 4, Б, В).

Другой причиной не выявления прогнозируемого оруденения проведённым комплексом ГРР могла послужить неполная изученность поисковых площадей из-за ограниченных возможностей ГРР, предусмотренных проектом, в том числе вследствие излишне больших для этих работ размеров площадей. Так, по Провиденскому объекту (общей площадью 80 км²) необходимую поисковую оценку получили два из четырёх перспективных участков, выделенных на стадии проектирования. По Мечивеемскому объекту около 50 % площади, имеющей общий размер 890 км², остались неопоискованными. По Шхиперскому объекту в пределах площади поисковых работ (150 км²) остались неизученными три перспективных участка, не заверен горными работами ряд перспективных геохимических аномалий. То же можно сказать и по ряду других объектов.

Вместе с тем следствием рассмотренных выше причин могла быть недостаточная изученность территорий для постановки поисковых работ. Примером могут служить Мечивеемский и Шхиперский объекты, для которых при обосновании поисковых работ на медно-порфировые руды использовались лишь имеющиеся архивные материалы мелко-среднемасштабных картосоставительских и съёмочных работ советских лет. Такие материалы были недостаточны как для апробации прогнозных ресурсов меди категории Р₂, подтверждающих перспективы локализации в пределах выделенных площадей промышленно значимых медно-порфировых объектов, так и для локализации меньших по размеру площадей, необходимых для их поисковой оценки в рамках выделенных ассигнований и сроков.

2. Также необходимо отметить случаи неподтверждения параметрических характеристик оцениваемых объектов и (или) низкое качество выявленных руд из-за природных особенностей изученных объектов.

Для ряда объектов выявленные в ходе поисковых работ руды по технико-экономическим показателям частично или в полном объёме не отвечают современным требованиям эффективной промышленной отработки, вследствие чего выявленные в ходе ГРР прогнозные ресурсы цветных и благородных металлов не подлежат государственному учёту. По сложившейся практике, такие «некондиционные» прогнозные ресурсы подлежат внутреннему учёту ФГБУ «ЦНИГРИ» и могут быть востребованы при улучшении конъюнктуры рынка, внедрении в производство более дешёвых и эффективных методов добычи руд и технологии их переработки, улучшающих технико-экономические показатели освоения объектов. К таким объектам из числа рассматриваемых могут быть отнесены 6 объектов – Шумаковский, Улантовский, Провиденский, Байкомский, Западно-Режевский, Мурунский.

3. Возможна вероятность завышения на этапе обоснования и планирования поисковых работ количества ожидаемых прогнозных ресурсов категории Р₃, недостаточно корректного определения геолого-промышленного типа руд и их оценочных параметров, что связано с отсутствием необходимой достоверной информации и факторами субъективного характера. Особенно это актуально для слабоизученных территорий, в пределах которых всё активнее ставятся ГРР ранних стадий в связи с исчерпанием поискового задела советского времени.

4. Необходимо отметить случаи необоснованного изменения методики опробования (Провиденский объект), что также может приводить к ошибкам в итоговой оценке прогнозных ресурсов.

5. В отдельных случаях имеет место неподтверждение прогнозно-поисковых моделей объектов поисков (Маньковский и Верхне-Аргунский объекты).

Подводя итог результативности завершённых в 2023 г. ГРР по двадцати объектам Госзаказа, прежде всего, необходимо отметить, что получен прирост прогнозных ресурсов свинца, цинка и золота на уровне не ниже средних показателей последних лет. Наилучшие результаты получены по приросту прогнозных ресурсов по одному объекту ГРР на цветные металлы и по пяти объектам на золото.

ГРР ранних стадий (поисковых и оценочных) на современном уровне остаются высокорискованным в экономическом отношении предприятием [2]. Это определяет актуальность государственного участия в финансировании ГРР ранних стадий по воспроизводству и наращиванию минерально-сырьевой базы цветных и благородных металлов. Снижению рисков поисковых работ по объектам Госзаказа, с нашей точки зрения, может способствовать внедрение в современную практику ГРР предваряющих их мелко-среднемасштабных прогнозно-ревизионных (прогнозноминерагенических) работ, специализированных на определённые виды ТПИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. И., Черных А. И. Особенности проведения геологоразведочных работ на рудное золото по заявительному принципу в условиях сложных горно-таёжных ландшафтов // Отечественная геология. – 2019. – № 5. – С. 3–15.

 Иванов А. И., Черных А. И., Вартанян С. С. Состояние, перспективы развития и освоения минеральносырьевой базы золота в Российской Федерации // Отечественная геология. – 2018. – № 1. – С. 18–28.

REFERENCES

 Ivanov A. I., Chernykh A. I. Osobennosti provedeniya geologorazvedochnykh rabot na rudnoye zoloto po zayavitel'nomu printsipu v usloviyakh slozhnykh gorno-tayozhnykh landshaftov [Features of geological explo-ration for ore gold according to the declarative prin-ciple in conditions of complex mountain-taiga landscapes], Otechestvennaya geologiya [Domestic Geology], 2019, No. 5, pp. 3–15. (In Russ.)

 Ivanov A. I., Chernykh A. I., Vartanyan S. S. Sostoyaniye, perspektivy razvitiya i osvoyeniya mineral'nosyr'yevoy bazy zolota v Rossiyskoy Federatsii [Status, prospects for development and exploration of the mineral resource base of gold in the Russian Federation], Otechestvennaya geologiya [Domestic Geology], 2018, No. 1, pp. 18–28. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 26.08.24; одобрена после рецензирования 06.09.24; принята к публикации 06.09.24. The article was submitted 26.08.24; approved after reviewing 06.09.24; accepted for publication 06.09.24.

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.

DOI:10.47765/0869-7175-2024-10017

УДК 004.589.91:550.8 © А. В. Карамышев, 2024

Автоматизированное картирование металлотектов с использованием методов глубокого машинного обучения

В рамках данной статьи выполнен краткий обзор теории нейросетевых методов распознавания образов, рассмотрены особенности применения методов глубокого машинного обучения при интерпретации комплексных геолого-геофизических данных и возможности их использования для решения прогнозных задач. Предложена и на примере выделения золоторудных объектов Центрально-Колымского района продемонстрирована методика нейросетевого прогноза полезных ископаемых (ПИ) на базе априорного физико-геологического моделирования путём автоматизированного картирования геологических факторов контроля оруденения.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственные нейронные сети, распознавание образов, комплексирование геофизических данных, прогноз оруденения, золоторудные месторождения, Центрально-Колымский регион.

КАРАМЫШЕВ АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ, геофизик 1 категории, Andrey_Karamyshev@vsegei.ru

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского», г. Санкт-Петербург

Automated mapping of metallotects with the use of deep machine learning methods

A. V. KARAMYSHEV

Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Geological Institute of A. P. Karpinsky", St. Petersburg

This article provides a brief overview of the theory of neural network methods of pattern recognition. It considers the features of using deep machine learning methods in interpreting complex geological and geophysical data and the possibilities of using them to solve forecasting problems. A method for neural network forecasting of ore mineralization, based on a priori physical-geological modeling by automated mapping of geological ore control factors, is proposed. The method is demonstrated on the example of identifying gold ore deposits in the Central Kolyma region.

Key words: machine learning, artificial neural networks, pattern recognition, geophysical data integration, mineralization forecast, gold deposits, Central Kolyma region.

Последнее десятилетие отмечено повсеместным распространением алгоритмов машинного обучения и, в частности, компьютерного зрения как универсального инструмента, дополняющего и заменяющего человеческий опыт при решении теоретических и прикладных задач в самых разных областях науки и техники. Особое внимание при этом уделяется подклассу методов глубокого машинного обучения (МО), работающих с так называемыми «глубокими», то есть многослойными нейросетевыми моделями, используемыми для создания модельных абстракций высокого уровня на основе частных примеров без явного программирования. Искусственные нейронные сети (ИНС) – это математические модели, в той или иной степени имитирующие процессы обработки информации

нервной системой живого организма. В случае компьютерного зрения чаще всего речь идёт о выделении, отслеживании и (или) классификации объектов на цифровых снимках и видеозаписях, что нашло широкое практическое применение в ряде сфер: от уже повсеместного распознавания лиц в охранных системах и персональных устройствах до обработки данных в военной и космической отраслях. Однако алгоритмы распознавания не ограничиваются только работой с визуальными образами. Аналогичным способом структуры могут быть выявлены в любых типах пространственно представимых данных: двумерных снимках и объёмных моделях в различных спектральных диапазонах, физических полях, картах и моделях распределения составов, свойств и др.

В последнее время всё большее значение алгоритмы распознавания приобретают и в различных отраслях геологической науки. В качестве одной из перспективных областей их применения рассматриваются задачи автоматического распознавания элементов геологического строения территории и локализации в её пределах вероятных рудных объектов при помощи комплексного анализа геонаучных данных на уровне, сопоставимом или даже превышающем возможности геологаинтерпретатора. И именно глубокие нейросетевые решения представляются в этой области одними из наиболее перспективных.

Концепция машинного обучения возникла ещё в середине XX в., когда на стыке формальной логики, кибернетики и нейрофизиологии предпринимаются первые попытки математического описания принципов работы нейронно-синаптических систем естественного мозга. Так, в работе 1943 г. «Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности» У. МакКаллока и У. Питтса [18] предлагается первая простейшая дискретно-логическая модель нейрона. Дальнейшее развитие данная концепция получила в работах американского нейрофизиолога Фрэнка Розенблатта. Им была предложена схема «перцептрона» [23] – системы распознавания образов с механизмом обучения, основанным на итерационном изменении синаптических весов в зависимости от выходного значения. С математической точки зрения перцептрон представляет собой просто способ решения систем уравнений с большим числом неизвестных коэффициентов. Принципиальная возможность аппроксимаций с его помощью зависимостей из предметной области следует

из теоремы Колмогорова-Арнольда, обосновывающей представимость любой многомерной непрерывной функции в виде суперпозиции непрерывных функций одной переменной. Доказанная же Розенблаттом теорема сходимости перцептрона демонстрирует, что данный метод, независимо от начального состояния сети и последовательности входных стимулов, всегда приведёт к достижению решения за конечный промежуток времени [22].

Несмотря на то, что в теории перцептрон не имеет функциональных преимуществ над аналитическими методами, с технической точки зрения подбор коэффициентов линейных уравнений несоизмеримо более прост в сравнении с решением уравнений классической статистики. Основным препятствием здесь становится потребность в чрезмерно больших ресурсах времени и памяти. Однако с развитием вычислительной техники значимость этой проблемы постепенно снижалась. Начало XXI в. ознаменовалось невероятным всплеском интереса к нейросетевым методам. К тому моменту уже была разработана достаточная теоретическая база. Были спроектированы многослойные сети, качественно превосходящие ранние наработки. Начались исследования в новой области – свёрточных нейронных сетей (СНС). Последние вместо полного набора связей между слоями используют небольшую матрицу весов, играющую роль оконного фильтра, выделяющего не отдельные значения, а характерные структуры во входных данных. В совокупности с повышенной скоростью обучения за счёт существенно меньшего числа настраиваемых коэффициентов это делает свёрточные нейросети одним из лучших алгоритмов для работы с цифровыми изображениями и другими типами пространственно представимых данных. Параллельно разрабатывались более эффективные нелинейные функции активации нейронов, новые методы оценки качества обучения и оптимизации сети. Возникла сама концепция глубокого обучения (англ. Deep learning), подразумевающая совокупность методов машинного обучения, преследующих цели создания адаптивных нейросетей, которые направлены не на решение одной конкретной задачи, а на реализацию определённой технологии, применимой к целому классу задач. На практике это достигается путём увеличения числа скрытых слоёв, то есть сложности или «глубины» нейросети, что во многом стало возможным благодаря изобретению в середине 1970-х годов метода обратного распространения

ошибки, позволяющего осуществлять оптимизацию коэффициентов всей сети на основании выходных значений только последнего слоя. Современная реализация данного метода, применяемая для эффективной тернировки глубоких слоёв нейронной сети, была предложена в 2006 г. Дж. Хинтоном из университета Торонто. Знаковым примером применения глубокого обучения можно считать опубликованную в 1989 г. работу Яна Лекуна по распознаванию рукописных символов [14]. В ней была предложена архитектура свёрточной нейросети с обратным распространением ошибки, получившая название LeNet-5. Однако, несмотря на неплохие результаты распознавания, концепция поначалу не снискала популярности по причине недостатка мощности вычислительного оборудования, в первую очередь – графических процессоров.

В геологических науках первые серьёзные примеры применения нейросетевых технологий и машинного зрения также относятся к концу 1980-х годов. В статье Г. Бонем-Картера (1989) [4] вводится концепция картирования минерального потенциала (англ. mineral prospectivity mapping) как статистического метода интеграции и интерпретации пространственных закономерностей в геонаучных данных. На практике это сводится к подбору алгоритма анализа данных и выводу так называемой «картировочной функции», то есть закона, связывающего физические объекты и их отражение в признаковом пространстве. Нейросетевые методы при решении подобных задач сначала уступали первенство менее ресурсозатратным альтернативным решениям – методам опорных векторов, логистической регрессии, дискриминантного анализа и нечёткой логики. Однако параллельно продолжались эксперименты по построению и обучению полносвязных многослойных нейронных сетей и вскоре были представлены первые решения задач классификации рудных объектов и оценки минеральной перспективности на основе наборов ГИС-данных [11, 24]. Ряд аналитических исследований [6, 12] показал более высокую по сравнению с аналогами точность нейросетевых методов в задачах геологического прогноза, имеющих дело с многомерным признаковым пространством и нелинейными связями между признаками и метками. Отдельные ранние примеры практического использования нейронных сетей для оценки минерального потенциала и геологического картирования можно встретить уже в работах 2000-х годов [3, 20]. При этом сам

по себе формализованный прогноз ПИ в силу объективной сложности верификации результатов по сравнению, например, с распознаванием изображений с недоверием воспринимался научным сообществом и до недавнего времени оставался чисто академической областью.

Переломный момент в развитии методов глубокого обучения наступил в 2012 г., когда свёрточная нейронная сеть AlexNet [13], представляющая углублённую и расширенную версию упомянутой LeNet-5, впервые превзошла человека по скорости визуального распознавания образов. С этого момента глубокое обучение перестало быть исключительно экспериментальной сферой, а стало рабочим инструментом решения практических повседневных задач. Последовавший всплеск интереса к нейросетевым методам не обошёл стороной и геологические науки. Число статей на соответствующую тематику с упоминаниями машинного обучения за последние 10 лет выросло практически на порядок [9].

Искусственная нейронная сеть представляет собой логическую структуру, состоящую из особым образом упорядоченных и взаимосвязанных элементарных процессоров. Базовый элемент нейросети – искусственный нейрон – по существу представляет собой взвешенный сумматор с *n* входов и единственным выходом. Его выходное значение определяется так называемой «активационной функцией» f(s), где $s = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{W}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_0$.

Здесь W_i и x_i – соответственно сигналы на входах нейрона и веса входов, а b_0 – смещение – аддитивный параметр, корректирующий значение результирующей суммы входов и тем самым задающий порог чувствительности нейрона. В качестве активационной чаще всего выбирается монотонно возрастающая функция с ограниченным диапазоном значений, например [0,1] или [-1,1], такая как, например, сигмоида или гиперболический тангенс. Единичные нейроны организуются в слои, соединённые системой взвешенных связей. Слой, в котором каждый нейрон соединён со всеми нейронами предыдущего, называется полносвязным как и сеть, построенная из таких слоёв.

Результат работы подобного слоя может быть представлен в виде:

$$\mathbf{x}^{(1)} = f(\mathbf{W}\mathbf{x}^{(0)} + \mathbf{b}),$$
(1)
где $\mathbf{x}^{(0)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(0)}_{0} \\ \mathbf{x}^{(0)}_{1} \\ \vdots \\ \mathbf{x}^{(0)}_{i} \end{bmatrix} -$ вектор входных значений,

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{0,0} \dots \mathbf{W}_{0,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{W}_{j,0} \dots \mathbf{W}_{j,i} \end{bmatrix} - \text{матрица весов,}$$
$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{0} \\ \mathbf{b}_{1} \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{i} \end{bmatrix} - \text{вектор смещений,}$$
$$\mathbf{x}^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0}^{(1)} \\ \mathbf{x}_{1}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{i}^{(1)} \end{bmatrix} - \text{вектор выходных значений.}$$

В общем случае ИНС состоит из входного, выходного и системы скрытых слоёв. Сеть с более чем одним скрытым слоем называется глубокой. Число нейронов входного слоя зависит от геометрии входных данных. Так, если речь идёт о распознавании образов и обучающий пример представляет собой массив размерами (m, n, k), то входной слой будет насчитывать $m \cdot n$ нейронов по числу векторов признаков длины k.

В отдельный большой класс архитектур, изначально ориентированных на работу с цифровыми изображениями и другими пространственно представимыми данными, выделяются ранее упомянутые свёрточные нейронные сети. Их специфика заключается в использовании особых пространственных фильтров – ядер свёртки – скользящих окон, связывающих каждый нейрон со сравнительно небольшой группой смежных нейронов предыдущего слоя через набор весовых коэффициентов. Слой в этом случае представим в виде пакета двумерных матриц, каждая из которых соответствует определённому ядру свёртки. Очевидно, что в этом случае даже при использовании значительного числа фильтров общее количество взвешенных связей будет меньше, чем у полносвязного слоя. Свёрточные слои в СНС обычно чередуются со слоями подвыборки или субдискретизации (англ. pooling layer), выполняющими уплотнение карт признаков путём сжатия группы значений в одно через нелинейное преобразование, например, функцию максимума. Это позволяет дополнительно уменьшить число настраиваемых параметров сети и устранить высокочастотные шумы.

В целом, подобный принцип организации нейросети приводит к тому, что вместо попиксельного «запоминания» обучающих примеров, как в случае перцептрона, она кодирует в ядрах свёртки характерные элементы и структуры данных, такие как, например, границы. При этом с увеличением глубины сети растёт степень обобщения информации и извлекаются всё более высокоуровневые признаки. Это делает СНС более устойчивыми к вариациям и искажениям входных данных. Кроме того, значительное уменьшение числа параметров в сравнении с полносвязными сетями даёт заметный выигрыш в производительности даже для сравнительно более глубоких архитектур.

В общем случае обучение нейронной сети с учителем можно рассматривать как задачу оптимизации. Она сводится к настройке параметров сети – весов и смещений – в целях минимизации значения некой функции, характеризующей качество работы алгоритма по величине расхождения выходных и целевых значений и называемой функцией потерь.

Пусть:

 \mathbf{X}_{i}^{Train} для i = 1::N – набор из N обучающих примеров,

Y ^{Train} – набор меток,

 $f(\theta; \mathbf{X}^{Train})$ – интерпретирующая функция, где θ – совокупность настраиваемых параметров ИНС. Тогда для оптимально обученной модели:

$$\theta^* = \operatorname{argmin} L \left(\mathbf{Y}^{Train} - f(\theta; \mathbf{X}^{Train}) \right), \tag{2}$$

 $\mathbf{Y}^{Predict} = f\left(\theta; \, \mathbf{X}^{Predict}\right) \tag{3}$

– интерпретация другого аналогичного набора данных **Х**^{*Predict*} [10].

Наиболее распространённым подходом к решению такой задачи выступают различные вариации метода градиентного спуска. Суть его заключается в вычислении градиента в случайной точке гиперпространства значений функции потерь и последующем итеративном перемещении в его отрицательном направлении за счёт модификации параметров модели вплоть до достижения минимума.

При интерпретации пространственно представимых данных в геологической науке и смежных дисциплинах можно выделить два крупных класса задач: картирование структур и выявление единичных объектов. В первом случае, будь то анализ космоснимков или, например, комплексных геофизических данных, предполагается районирование территории путём выделения площадных и линейных форм, предположительно соответствующих физическим объектам и структурам определённого типа, с учётом некоторой априорной информации. Машинный алгоритм в подобных случаях служит преимущественно лишь заменой специалиста-интерпретатора, упрощая

выполнение рутинной работы. Во втором же случае задача сводится к локализации объектов конкретного типа, определённого через его эталонное модельное представление или образ аналогичного реального объекта. Речь в таком случае чаще всего идёт о крайне слабоконтрастном объекте, не выявляемом с уверенностью экспертными методами, что и становится причиной привлечения потенциально более чувствительных машинных алгоритмов. С учётом этого результаты работы такого алгоритма чаще бывают представлены не в виде контуров искомых объектов, а как вероятностная карта для всей площади поиска, характеризующая нейросетевую оценку принадлежности каждой её точки к одному из классов, охарактеризованных предложенными эталонами.

В рамках машинного распознавания образов в цифровых изображениях, безотносительно физической природы матричных данных, могут быть выделены три основных класса задач. Задачи классификации подразумевают отнесение изображения к одному из заданных классов по критерию наличия на нём образа соответствующего объекта. Детекция решает задачу определения положения (координат) предположительно присутствующего на изображении объекта по его образу. Задача же сегментации в каком-то смысле выступает объединением двух предыдущих, так как предполагает обнаружение и локализацию различных классов (семантическая сегментация) и отдельных объектов (сегментация экземпляров) в пределах одного изображения. В зависимости от специфики входных данных нейросетевые методы решения каждой из них могут предполагать существенно различные методы их предобработки, принципы формирования обучающей выборки и используемые архитектуры сетей.

Критическое рассмотрение методики и результатов предшествующих работ по данной тематике позволяет выделить ряд ключевых факторов, негативно влияющих на результаты работы ИНС в задачах распознавания образов геологических тел и структур, в особенности рудных объектов. Отчасти этому вопросу посвящена и обобщающая диссертационная работа доктора Дж. Гранека из университета Британской Колумбии [10].

Одной из основных проблем при использовании машинного обучения применительно к прогнозу минерализации являются недостаточность и плохая представительность обучающих данных: эталонные рудные объекты занимают, как правило, доли процента от общей исследуемой площади и исчисляются десятками или первыми сотнями. Для задач обучения с учителем это крайне маленькая обучающая выборка.

В аналогичных задачах распознавания образов на цифровых изображениях наиболее распространённым и положительно зарекомендовавшим себя подходом к решению проблемы недостаточной обучающей выборки является так называемая аугментация данных. Этот метод подразумевает искусственную генерацию большого числа обучающих примеров на основе нескольких качественно размеченных реальных образцов путём внесения различных искажений. В зависимости от характера данных и типа решаемой задачи это могут быть аффинные или проективные преобразования, изменение значений матрицы (например, корректировка яркости, контрастности, цветовой гаммы), внесение случайных шумов, размытия и др. С некоторыми ограничениями этот подход применим и к геонаучным данным. Так, уже в публикации В. Брауна и др. (2003) [5] отмечается, что дополнение обучающей выборки искажёнными с помощью случайного шума образами рудных объектов позволило существенно повысить точность классификации на независимом наборе тестовых данных.

Альтернативой этому может служить генерация синтетических обучающих примеров на основе цифровых моделей искомых объектов. Моделирование геологически правдоподобных, но полностью абстрактных объектов, не имеющих заранее определённых природных прототипов, может быть использовано, в частности, при экспериментальном тестировании различных нейросетевых архитектур и алгоритмов обучения как источник неограниченного количества заведомо корректно размеченных данных [10]. Однако в случае реальных объектов очевидным недостатком данного подхода, помимо трудоёмкости подготовки, является отсутствие чётких критериев адекватности модельных построений реальным геологическим обстановкам. Выбор той или иной из эквивалентных моделей, в равной степени отвечающих наличествующим объективным геологическим и геофизическим данным, полностью является сферой ответственности геолога-интерпретатора.

В значительно меньшей степени всё это касается приложений машинного обучения к картированию геологических структур. Здесь в большинстве случаев проблема недостаточности обучающей выборки стоит куда менее остро по причине большей распространённости искомых объектов, и на передний план выходит вопрос правильности разметки данных, то есть другими словами – корректности их геологической интерпретации. При этом генерация синтетических обучающих примеров на основе достоверной и достаточно детальной геологической и петрофизической модели могла бы позволить в кратчайшие сроки добиться высокой точности распознавания, не затрачивая время и ресурсы на подготовку большого объёма реальных данных.

При этом следует заметить, что даже в случае обучения на реальных данных результаты прогноза могут существенно изменяться в зависимости от выбора априорной геологической модели объекта, на основе которой происходит формирование признакового пространства [16]. Внесение столь значительного человеческого фактора может представляться неуместным ограничением возможностей ИНС, потенциально способной выявлять ранее неизвестные структуры и паттерны в данных, а не просто автоматизировать работу конкретного эксперта.

На практике, однако, полный отказ от учёта экспертно устанавливаемых априорных критериев формирования обучающей выборки делает практически нерешаемой задачу качественной верификации получаемых результатов, а использование лишь количественных метрик сходимости модели, как будет показано ниже, не позволяет оценить полученные результаты с точки зрения их геологической осмысленности. Таким образом, теоретически предпочтительная концепция полного исключения человеческого фактора из прогнозных построений представляется на данном этапе малоперспективной из-за отсутствия возможности оперативной верификации получаемых результатов и интерпретации механизма принятия решений.

Другим часто поднимаемым вопросом, особенно если речь идёт о задачах классификации, является проблема несбалансированности обучающих меток. При обучении нейросетевого классификатора для идентификации объектов определённого типа необходимо как минимум два типа меток: положительные, отвечающие искомым объектам, и отрицательные, характеризующие вмещающую среду. При этом вмещающая среда, как правило, крайне многообразна и неоднородна, что делает выбор отрицательных меток весьма нетривиальной задачей. Отчасти решает эту проблему исполь-

зование в данном качестве (если речь идёт о поиске рудных объектов) достоверно безрудных скважин [15]. Однако такой подход существенно ограничивает применимость обсуждаемого метода, так как количество отрицательных меток должно быть как минимум сопоставимо с количеством положительных, то есть отражающих распространённость целевого класса, а в ряде случаев и превышать его, что на практике далеко не всегда выполнимо. О регионах, не обеспеченных данными бурения, речь не идёт вовсе. С другой стороны, привлечение данных бурения преследует лишь одну задачу: недопущения неверной разметки данных в случае попадания отрицательной метки на объект искомого типа. С учётом же того, что рудные объекты в общем случае занимают ничтожную долю площади территории, даже при случайном расположении отрицательных меток вероятность их попадания в ранее необнаруженную перспективную область крайне мала. Но даже если это произойдёт, единичная ошибка в разметке данных не окажет существенного влияния на результаты обучения. Предположение о допустимости случайного расположения отрицательных меток, возможно, с незначительными ограничениями по критерию пространственной близости к положительным находит подтверждение и в практических результатах отдельных исследований [7, 24].

Тем не менее сама по себе корректность разметки не решает проблему неравномерной представленности разных классов. В большинстве сред машинного обучения с учителем непредвзятость обучения достигается за счёт приблизительной равномерности выборки из каждого класса. Если это не соблюдается, задача считается несбалансированной. Редкость рудных объектов в этой ситуации выражается в крайней несбалансированности набора обучающих меток. Эта проблема ещё больше усугубляется, если ограничить задачу определённым типом минерализации, как часто бывает при прогнозе оруденения.

В задачах же детекции и сегментации, принципиально аналогичных поиску и выделению отдельных объектов на цифровой фотографии, равномерная представленность классов играет куда меньшую роль, поскольку вмещающая среда в размеченном датасете изначально интерпретируется как фоновое значение, а не альтернативный класс, равноценный искомому.

Помимо всего перечисленного, следует также обратить внимание на ошибки и неточности,

неизбежно присутствующие в самих данных. Некоторые признаки, такие как измеренные значения геофизических полей, будут иметь количественные неточности, связанные с пределами обнаружения и процедурами обработки. Другие, такие как результаты геологического картирования, в той или иной мере содержат качественные неточности, связанные с экспертной интерпретацией и систематической ошибкой выборки. Кроме того, некоторые данные могут характеризоваться существенной пространственной неоднородностью в пределах рассматриваемой площади. Так, в районах с мощным осадочным чехлом информативность как данных гамма-спектрометрии, так и карты коренных пород по объективным причинам будет существенно снижаться.

Таким образом, в отличие от многих задач машинного обучения, в которых можно доверять и данным, и их аннотации, при машинном распознавании образов в геологических данных следует учитывать, что с высокой степенью вероятности те и другие будут содержать ошибки и неточности. Ввиду этого следует уделять особое внимание отбору признаков, подготовке и предобработке данных, а также обращаться к алгоритмам, наименее подверженным влиянию одиночных выбросов, иначе сходимость при обучении может быть никогда не достигнута.

Кроме того, заслуживает упоминания проблема пусть и не специфическая для геологических данных, но оказывающая непосредственное влияние на качество распознавания. Речь идёт о широко известном феномене переобучения ИНС, который состоит в том, что при увеличении числа эпох обучения в определённый момент происходит разрыв между точностью распознавания на обучении и валидации: первая продолжает расти, в то время как вторая колеблется около некоторого предельного значения и со временем даже начинает снижаться. Это происходит по причине того, что по мере приближения к 100% точности на обучающей выборке алгоритм перестаёт выделять обобщённые признаки искомых объектов, а просто «запоминает» все входные примеры и распознаёт только их. Стандартным приёмом борьбы с переобучением служит метод исключения или «дропаута» (англ. dropout), состоящий в обнулении на каждой эпохе обучения выходов некоторого количества случайных нейронов [27]. Это приводит, по сути, к незначительному изменению архитектуры, что влияет на процесс обратного распространения ошибки и предотвращает взаимную адаптацию нейронов к конкретным обучающим примерам. На практике также может быть полезно контролировать сходимость модели путём введения условий изменения темпа обучения в зависимости от динамики результатов на предшествующих эпохах и сохранения промежуточных значений весов для возврата к более оптимальным параметрам модели без её повторного обучения.

С учётом вышесказанного в качестве альтернативы непосредственному распознаванию образов рудных объектов при прогнозе минерализации может быть предложен «полуавтоматический» метод, представляющийся на текущем этапе более реалистичным ввиду обозначенных ограничений нейросетевых методов. Он заключается в автоматизированном выделении только отдельных элементов геологического строения территории, генетически связываемых с определённым типом оруденения, а не уникального их сочетания, отвечающего локации предполагаемого рудного объекта. В этом случае выделение конкретных участков производится уже в ручном режиме путём экспертного анализа результатов распознавания с учётом априорной физико-геологической модели искомого объекта. Такой подход в значительной мере решает проблему недостаточности обучающей выборки ввиду наличия большого количества уже размеченных данных, которые могут быть использованы как непосредственно для обучения нейросетевых моделей на выделение определённых металлотектов, так и для их предобучения на массиве геологических карт в целях повышения качества распознавания в более узко поставленных задачах.

Предлагаемый алгоритм выполнения прогнозных построений включает четыре последовательных этапа:

I. Создание прогнозной физико-геологической модели целевого объекта в составе: геологической и петрофизической моделей, а также модели физических полей.

II. Подготовка баз комплексных геологических данных (с геофизическими полями, трансформантами, геохимическими полями, спутниковыми снимками, моделями рельефа, геологическими картами и др.) для выделения элементов геологического строения и прогнозирования потенциальных рудных объектов.

III. Прогноз с использованием методов глубокого машинного обучения: создание и обучение моделей МО; картирование геологических факторов локализации рудных объектов; выделение участков, потенциально перспективных на локализацию оруденения.

IV. Верификация результатов: оценка качества моделей на тестовых данных; интерпретация работы моделей; трёхмерное моделирование перспективных участков (при необходимости).

Ключевым в данном случае становится корректное выделение набора рудоконтролирующих факторов на начальной стадии построения модели, что требует привлечения как можно более полного набора априорных геологических, а также сопутствующих геохимических, дистанционных и других данных. Поскольку речь идёт о выделении рудных объектов заранее определённой в рамках более высокоранговой модели типологии, требуется также привлечение данных по известным аналогичным объектам за пределами рассматриваемой территории, которые при условии их локализации в сходных геологических обстановках могут быть использованы в качестве эталонов для моделирования.

С учётом вышеизложенных принципов в рамках данной работы была реализована система машинного распознавания образов по комплексным геолого-геофизическим данным, включающая свёрточные нейросетевые модели, обученные на выделение отдельных факторов локализации оруденения. В качестве рабочего инструментария использовались открытые программные продукты, широко применяемые в задачах машинного обучения. В первую очередь, фреймворк TensorFlow [25] для Python – специализированная программная библиотека для проектирования и обучения нейронных сетей с интегрированным высокоуровневым интерфейсом Keras для послойного построения моделей глубокого обучения, упрощённым механизмом внедрения предобученных моделей и повышенной производительностью на графических процессорах.

Для удобства работы с кодом использовалась среда разработки Jupiter Notebook. Работа с блокнотами Jupiter выполнялась преимущественно на локальной машине с применением среды Microsoft Visual Studio. Непосредственно обучение моделей производилось на графическом процессоре компании Nvidia с использованием программноаппаратной архитектуры CUDA.

В качестве основного рабочего материала в рамках представленного исследования использовались ранее подготовленная база площадных геофизических, геохимических и геологических данных для территории Аян-Юряхской зоны в пределах Центрально-Колымского золоторудного региона (ЦКР). Более детальное описание рассматриваемой площади, первичных материалов и состав базы данных приводятся в публикации, посвящённой употреблению этих данных для выполнения формализованного прогноза на рудное золото с использованием вероятностно-статистических методов [2].

Основой для выбора целевых металлотектов и соответствующих им наборов потенциально информативных признаков служила априорная физико-геологическая модель Омчакского рудного узла как наиболее характерного золоторудного объекта данного ранга на рассматриваемой территории, ранее подготовленная в рамках работ ФГБУ «ВСЕГЕИ». Литологический контроль оруденения отражается в приуроченности рудных полей к выходам верхнепермской атканской свиты, выделяющейся зонами К и К + U специализации на картах вторичной радиохимической зональности. Связь с магматизмом выражается в локализации оруденения на периферии частично выходящих на поверхность или полностью невскрытых гранитных массивов, проявленных, в первую очередь, в виде изометричных отрицательных аномалий поля силы тяжести и его среднечастотных компонент. Зоны же крупных разрывных нарушений, исполняющие, по-видимому, роль проводящих каналов для рудного вещества, регистрируются линейными аномалиями повышенных градиентов магнитного и в меньшей степени гравитационного поля.

Импорт данных осуществлялся из файла формата .csv с сохранением в объект pandas DataFrame. Для удобства дальнейшего использования данные были пересчитаны в относительные координаты, нормализованы и преобразованы в трёхмерный массив NumPy размерами 2355 × 2521 × 35, который, по сути, представляет собой многоканальное изображение, где каждый пиксель представлен трёхмерным вектором признаков. Первая пара значений соответствует линейным размерам матриц в базе, а последнее – числу слоёв, из которых два – реальные координаты точек, необходимые для корректного представления результатов распознавания, следующие четыре слои аннотации – маски с точечными координатами или контурами объектов различных классов, закодированных определёнными значениями, а остальные - карты признаков, включающие исходные поля и различные их трансформанты.

Постановка задачи осуществлялась путём интерактивного выбора одной целевой маски и набора признаков, предположительно её характеризующих, с последующим реструктурированием массива и удалением лишних данных.

На следующем этапе при помощи скользящего окна с регулируемым шагом, то есть по степени перекрытия по каждой из осей производилось разбиение массива на тайлы (фрагменты) фиксированного размера, выбираемого в зависимости от характерных размеров целевых меток, чтобы упростить обработку и уменьшить потребление памяти при дальнейшем обучении нейронной сети. Каждый тайл представляет собой такой же трёхмерный массив, содержащий значения признаков для каждого пикселя.

Размеченный таким образом фрагментарный массив разделялся на обучающую и валидационную выборки с отсеиванием тайлов, не содержащих объекты целевого класса, а также приводился к формату, необходимому для обучения нейросетевых моделей. Для искусственного увеличения имеющейся недостаточной выборки и повышения робастности модели обучающий датасет увеличивался в 10 раз простым копированием, после чего к нему применялся комплекс процедур аугментации. Последние включали случайные повороты, отражения, ограниченное масштабирование и внесение гауссова шума. Для оценки качества подготовленной выборки и проверки корректности применения методов аугментации данных выполнялась визуализация ограниченного числа случайных примеров.

Полученные таким образом обучающий и валидационный наборы данных тензорного формата, стандартного для обучения нейронных сетей в TensorFlow, перемешивались, разбивались для обеспечения более стабильной сходимости модели на мини-пакеты по четыре элемента и подавались на вход нейросети.

По результатам тестирования нескольких различных моделей предпочтение было отдано нейронной сети с относительно простой свёрточной архитектурой типа U-Net [21], хорошо зарекомендовавшей себя в задачах сегментации слабоконтрастных изображений. Схема использованной U-Net-подобной архитектуры приведена на рис. 1.

Функция input_layer определяет входной слой нейронной сети с заданными размерами входного изображения и количеством каналов.



Рис. 1. Визуализация архитектуры нейронной сети типа U-Net:

1 – InputLayer; 2 – Sequential; 3 – Concatenate; 4 – Conv2DTranspose

Энкодер в представленной архитектуре состоит из семи последовательных свёрточных блоков, позволяющих извлекать признаки на разных уровнях абстракции. Каждый блок включает сверточный слой с заданным числом фильтров (16, 32, 64, 128, 128, 128, 128) и размером ядра 4, опциональный слой пакетной нормализации, ускоряющий обучение и улучшающий обобщающую способность модели, и функцию активации LeakyReLU. Первый блок не использует пакетную нормализацию, что может быть полезно при небольших объёмах данных, как в нашем случае, или при ограниченных вычислительных ресурсах, чтобы уменьшить количество обучаемых параметров. Количество фильтров в первых четырёх блоках удваивается с каждым последующим, начиная с 16-го. Это соответствует общей концепции архитектуры U-Net, которая имеет сквозную связь между энкодером и декодером и использует полносвязные карты признаков для объединения низкоуровневой и высокоуровневой информации. В последующих трёх слоях число фильтров не повышается, так как это при небольшом объёме входных данных может легко привести к снижению эффективности модели, поскольку в этих слоях уже содержится много информации об изображении

Научно-техническое и прикладное обеспечение геологоразведочных работ

и дальнейшее увеличение числа фильтров не приведёт к значительному улучшению результатов, а в случае переобучения ухудшит их. Экспериментально подобранное под конкретную задачу оптимальное число фильтров позволяет модели изучать более сложные функции при сохранении относительно небольшого количества параметров и вычислительной эффективности.

Блок декодера состоит из транспонированного свёрточного слоя, увеличивающего размерность выходных данных, слоя пакетной нормализации, опционального слоя Dropout, отключающего выходы 20% случайных нейронов, и функции активации ReLU. Пакет слоёв декодера зеркально повторяет энкодер по числу слоёв и фильтров, позволяя получить на выходе сегментированную матрицу, восстановленную до исходного размера входного патча. При этом в декодере также используются блоки, которые объединяют высокоуровневые и низкоуровневые признаки для получения более точных и детализированных результатов сегментации. Для передачи низкоуровневой информации в глубокие слои декодера создаются дополнительные связи между блоками, так называемыми skip connections.

Функция output_layer создаёт выходной слой, используемый для получения сегментированного изображения с установленной принадлежностью



Рис. 2. Распознавание интрузивных массивов по комплексным геофизическим данным:

1 — обучающая выборка; 2 — целевой признак; 3 — отсутствие признака; интрузивные массивы: 4 — выходящие на дневную поверхность, 5 — невскрытые эрозией, выделенные по геофизическим данным

каждого пикселя к определённому классу. При этом используется сигмоидальная активационная функция, преобразующая значения выходов нейронов в матрицу вероятностей. Количество каналов выходного слоя соответствует количеству классов, на которые разбивается изображение в задаче сегментации.

В качестве функции потерь использована взвешенная комбинация BinaryCrossentropy и Dice Loss. Такой выбор обусловлен тем, что Dice Loss учитывает пространственную структуру и относительный размер объектов, но может быть менее чувствительна к границам объектов, особенно если они нечёткие, в то время как BinaryCrossentropy хорошо работает именно для определения границ объектов сегментации.

Поскольку речь идёт о несбалансированной задаче с относительно малой представленностью целевого класса, при обучении модели использовался взвешенный коэффициент Dice, учитывающий не только точность и полноту предсказаний модели, но и разные вклады каждого класса в общую метрику.

Оптимизация параметров нейронной сети выполнялась с использованием алгоритма Adam, реализующего концепцию стохастического градиентного спуска с адаптивной оценкой моментов градиентов первого и второго порядков.

По результатам нескольких циклов обучения модели распознавания интрузивных массивов на 30-й эпохе с набором признаков, включающим составляющую поля силы тяжести от слоя 4–5 км, его горизонтальный градиент и модуль полного градиента аномального магнитного поля, достигнута сходимость на уровне Dice = 77,8 на валидации (рис. 2).

Аналогичные результаты получены для модели, обученной на выделение выходов Атканской свиты (рис. 3) по набору данных, включавшему надфоновые компоненты радиогеохимического



Рис. 3. Распознавание выходов пород Атканской свиты по АГС-данным:

1 – целевой признак; 2 – отсутствие признака; 3 – границы выходов Атканской свиты; 4 – обучающая выборка

поля и карту районирования гравитационного и магнитного полей. Оптимальный результат без переобучения модели достигнут на 40-й эпохе со значением метрики Dice = 79,2 на валидации.

В задаче распознавания разрывных нарушений (рис. 4), наиболее сложной из рассмотренных ввиду неоднородной проявленности разломов различного ранга в геофизических полях, использовалась функция потерь Binary Focal Crossentropy с весовым коэффициентом alpha = 0,9 и стандартным значением параметра фокусировки gamma = 2. Наилучший результат со значением метрики IoU = 73,3 получен на 55-й эпохе с набором признаков, включавшим асимметрию аномального магнитного поля, его параметр tilt и горизонтальный градиент локальной компоненты поля силы тяжести.

Применение полученных моделей к тестовым данным и сопоставление результатов с реально закартированными и выделенными по геофизическим данным контурами целевых объектов демонстрирует общее совпадение положения фактических и прогнозируемых крупных тел и структур, с частными расхождениями в геометрии и мелких деталях. Последнее может быть связано как с неоднородностью вещественного состава и, следовательно, проявленности в полях отдельных массивов и литологических разностей, так и с недостатками использованной разметки, не всегда корректно отражающей реальную форму тел.



Рис. 4. Распознавание разрывных нарушений по комплексным геофизическим данным:

1 — обучающая выборка; 2 — целевой признак; 3 — отсутствие признака; разрывные нарушения: 4 — главные, 5 — второстепенные

Сводная карта (рис. 5), полученная путём наложения сегментированных бинарных слоёв с выделенными геологическими факторами контроля оруденения, позволяет визуально оценить связь между прогнозируемыми металлотектами и реальным распространением минерализации целевого типа. Известные крупнообъёмные золоторудные объекты, в том числе Омчакский рудный узел, послуживший основой для создания использованной априорной ФГМ, вполне отвечают ожидаемому критерию локализации, выражающемуся в пространственном совпадении предполагаемых выходов рудовмещающих толщ, зон крупных разрывных нарушений и периферии приповерхностных интрузивных массивов на удалении 4-10 км.

При этом нужно отметить, что по формальному критерию качества обучения моделей – метрикам Dice – полученные результаты являются достаточно слабыми для задач сегментации. Однако следует учитывать, что метрика Dice основывается на сравнении площадей целевых объектов и множеств пикселей, отнесённых к целевому классу по результатам распознавания, не учитывая другие аспекты сегментации, такие как форма и расположение объектов на изображении. А разметка как тренировочного, так и валидационного датасета – также результат отчасти субъективной



Рис. 5. Сводная карта распознанных факторов локализации крупнообъёмного золотого оруденения, выделенных на основе априорной ФГМ Омчакского рудного узла:

1 — интрузивные массивы; 2 — границы выходов Атканской свиты; 3 — предполагаемые разрывные нарушения; 4 — золоторудные месторождения

интерпретации составителей геологических карт, с которых были сняты контуры целевых объектов. Таким образом, возникновение ошибок второго рода, понижающих коэффициенты Dice и IoU, может быть следствием выделения реальных объектов, не отмеченных в валидационных данных, например не выходящих на поверхность интрузивных массивов.

Поэтому при оценке качества моделей для задач сегментации геолого-геофизических данных необходимо учитывать не только количественные метрики качества, но и другие аспекты, такие как форма и расположение объектов на изображении, а также оценку полезности выделенных объектов для конечной цели задачи. Кроме того, желательно при возможности проводить валидацию модели на нескольких независимых наборах данных и анализировать её результаты в экспертном режиме, чтобы убедиться в корректности выделения целевых объектов, отсутствии явных противоречий картам использованных признаков и общем соответствии полученных результатов априорным представлениям о геологическом строении региона.

Подготовленные нейросетевые модели достаточно универсальны, так как обучены на распознавание не уникальных меток, характерных только для определённой территории, а на выделение повсеместно распространённых типов геологических объектов и структур, образы которых в геолого-геофизических данных от региона к региону отличаются лишь в отдельных аспектах. Это позволяет предполагать возможность переноса результатов обучения на другие площади, при условии их покрытия аналогичного качества съёмками, с дообучением лишь на небольшом объёме новых данных, нужных для внесения корректировок в веса моделей. Данная задача является частным случаем так называемой доменной адаптации, к реализации которой на сегодняшний день разработан целый ряд результативных подходов.

Таким образом, применение машинного распознавания образов для решения задач прогноза с точки зрения верифицируемости и практической применимости на данном этапе представляется наиболее перспективным в рамках комплексного подхода к интерпретации геолого-геофизических данных на основе физико-геологического моделирования. Нейросетевые модели здесь играют роль инструмента автоматического выделения заранее определённых типов металлотектов, а потенциально перспективные участки выделяются в экспертном режиме с учётом предполагаемого комплекса факторов локализации целевых рудных объектов. Кроме того, такой подход позволяет в значительной мере уйти от проблемы недостаточности обучающих примеров, как в случае с поиском единичных объектов, и не полагаться полностью на методы аугментации или другие подходы к искусственному увеличению выборки, требующие дополнительного обоснования применимости.

Однако необходимо учитывать, что качественная предобработка данных и осмысленный выбор признаков, независимо от постановки задачи и выбранного алгоритма машинного обучения, играют первостепенную роль. Эффективность работы любой модели может быть сведена к нулю обучением на существенно неоднородных, избыточных или напрямую не связанных с целевыми объектами признаках, а различные по комплексу параметров нейросетевые решения, напротив, могут дать близкие результаты при условии использования качественных и релевантных входных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Карамышев А. В.* Нейросетевые методы распознавания образов в задачах картирования геологических структур и оценки минерального потенциала // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий. 2022. № 10. С. 189–193.
- Карамышев А. В., Фёдорова К. С., Тарасов А. В. Прогноз скрытого золотого оруденения в пределах Центрально-Колымского района по комплексу геолого-

геофизических признаков методом распознавания // Руды и металлы. – 2020. – № 2. – С. 10–24.

- Barnett C., Williams P. Using Geochemistry and Neural Networks to Map Geology under Glacial Cover // GBC Technical report 2009-03. – 2009. – P. 1–26.
- Bonham-Carter G. F., Agterberg F. P., Wright D. F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia // Digital Geologic and Geographic Information Systems. – 1989. – № 10. – P. 15–23.
- 5. *Brown W. M., Gedeon T. D., Groves D. I.* Use of Noise to Augment Training Data: A Neural Network Method of Mineral–Potential Mapping in Regions of Limited

Known Deposit Examples // Natural Resources Research. – 2003. – 12. – P. 141–152.

- Brown W. M., Gedeon T. D., Groves D. I., Barnes R. G. Artificial neural networks: A new method for mineral prospectivity mapping // Australian Journal of Earth Sciences. – 2000. – 47:4. – P. 757–770.
- Carranza E. J. M., Laborte A. G. Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: application of Random Forests algorithm // Ore Geol. Rev. – 2015. – 71. – P. 777–787.
- Cedou M., Gloaguen E., Blouin M., Caté A., Paiement J. P., Tirdad S. Preliminary geological mapping with convolution neural network using statistical data augmentation on a 3D model // Computers & Geosciences. – 2022. – № 167(6). – P. 105187.
- Dramsch J. S. 70 years of machine learning in geoscience in review // Advances in geophysics. – 2020. – № 61. – P. 1–55.
- 10. *Granek J.* Application of machine learning algorithms to mineral prospectivity mapping // PhD diss. University of British Columbia, 2016.
- Harris D., Pan G. Mineral Favorability Mapping: A Comparison of Artificial Neural Networks, Logistic Regression, and Discriminant Analysis // Natural Resources Research. – 1999. – № 8. – P. 93–109.
- Harris D., Zurcher L., Stanley M. [et al.] A Comparative Analysis of Favorability Mappings by Weights of Evidence, Probabilistic Neural Networks, Discriminant Analysis, and Logistic Regression // Natural Resources Research. – 2003. – № 12. – P. 241–255.
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems 25, Curran Associates, Inc. – 2012. – P. 1097–1105.
- LeCun Y., Boser B., Denker J. S., Henderson D., Howard R. E., Hubbard W., Jackel L. D. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition // Neural Computation. – 1989. – № 1 (4). – P. 541–551.
- Li S., Chen J., Xiang J. Applications of deep convolutional neural networks in prospecting prediction based on two-dimensional geological big data // Neural Comput & Applic. – 2019. – № 32. – P. 2037–2053.
- 16. Lindsay M. D., Piechocka A. M., Jessell M. W., Scalzo R., Giraud J., Pirot G., Cripps E. Assessing the impact of conceptual mineral systems uncertainty on

REFERENCES

1. *Karamyshev A. V.* Neyrosetevyye metody raspoznavaniya obrazov v zadachakh kartirovaniya geologicheskikh struktur i otsenki mineral'nogo potentsiala [Neural network methods for pattern recognition in prospectivity predictions // Geosci. Front. – 2022. – № 13. – P. 101435.

- Maas A. L., Hannun A. Y., Ng A. Y. Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models // Proc. Icml. – 2013. – V. 30, № 1. – P. 3.
- McCulloch W. S., Pitts W. A. Logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. – 1943. – № 5. – P. 115–133.
- McMillan M., Fohring J., Haber E., Granek J. Orogenic gold prospectivity mapping using machine learning // ASEG Extended Abstracts. – 2019. – № 1. – P. 1–4.
- Porwal A., Carranza E. J. M., Hale M. Artificial Neural Networks for Mineral-Potential Mapping: A Case Study from Aravalli Province, Western India // Natural Resources Research. – 2003. – № 12. – P. 155–171.
- Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. – 2015. – P. 234–241.
- 22. *Rosenblatt F.* Principles of Neurodynamics; Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms // Washington : Spartan Books, 1962. 616 p.
- Rosenblatt F. The Perceptron A Perceiving and Recognizing Automaton // Technical Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Laboratory. – 1957.
- Singer D. A., Kouda R. Use of a neural network to integrate geoscience information in the classification of mineral deposits and occurrences // Proceedings of Ex-ploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration: Toronto, 1997. P. 127–134.
- Singh P., Manure A. Learn TensorFlow 2.0 : Implement Machine Learning and Deep Learning Models with Python. – 2020. – 164 p.
- Sun T., Chen F., Zhong L., Liu W., Wang Y. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China // Ore Geology Reviews. – 2019. – 109. – P. 26–49.
- Wan L., Zeiler M., Zhang S., Le Cun Y, Fergus R. Regularization of neural networks using dropconnect // International conference on machine learning. – 2013. – P. 1058–1066.

problems of mapping geological structures and assessing mineral potential], Geologiya, geoekologiya i resursnyy potentsial Urala i sopredel'nykh territoriy, 2022, No. 10, pp. 189–193. (In Russ.)

2. *Karamyshev A. V., Fodorova K. S., Tarasov A. V.* Prognoz skrytogo zolotogo orudeneniya v predelakh Tsentral'no-Kolymskogo rayona po kompleksu geologogeofizicheskikh priznakov metodom raspoznavaniya [Forecast of hidden gold mineralization within the Central Kolyma region based on a complex of geological and geophysical features by the recognition method], Rudy i metally [Ores and Metals], 2020, No. 2, pp. 10–24. (In Russ.)

- 3. *Barnett C., Williams P.* Using Geochemistry and Neural Networks to Map Geology under Glacial Cover, GBC Technical report 2009-03, 2009, pp. 1–26.
- 4. Bonham-Carter G. F., Agterberg F. P., Wright D. F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia, Digital Geologic and Geographic Information Systems, 1989, No. 10, pp. 15–23.
- Brown W. M., Gedeon T. D., Groves D. I. Use of Noise to Augment Training Data: A Neural Network Method of Mineral–Potential Mapping in Regions of Limited Known Deposit Examples, Natural Resources Research, 2003, 12, pp. 141–152.
- Brown W. M., Gedeon T. D., Groves D. I., Barnes R. G. Artificial neural networks: A new method for mineral prospectivity mapping, Australian Journal of Earth Sciences, 2000, 47:4, pp. 757–770.
- Carranza E. J. M., Laborte A. G. Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: application of Random Forests algorithm, Ore Geol. Rev, 2015, 71, pp. 777–787.
- Cedou M., Gloaguen E., Blouin M., Caté A., Paiement J. P., Tirdad S. Preliminary geological mapping with convolution neural network using statistical data augmentation on a 3D model, Computers & Geosciences, 2022, No. 167(6), pp. 105187.
- Dramsch J. S. 70 years of machine learning in geoscience in review, Advances in geophysics, 2020, No. 61, pp. 1–55.
- 10. *Granek J.* Application of machine learning algorithms to mineral prospectivity mapping, PhD diss, University of British Columbia, 2016.
- Harris D., Pan G. Mineral Favorability Mapping: A Comparison of Artificial Neural Networks, Logistic Regression, and Discriminant Analysis, Natural Resources Research, 1999, No. 8, pp. 93–109.
- Harris D., Zurcher L., Stanley M. [et al.] A Comparative Analysis of Favorability Mappings by Weights of Evidence, Probabilistic Neural Networks, Discriminant Analysis, and Logistic Regression, Natural Resources Research, 2003, No. 12, pp. 241–255.
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, Advances in Neural Information Processing Systems 25, Curran Associates, Inc, 2012, pp. 1097– 1105.
- 14. LeCun Y., Boser B., Denker J. S., Henderson D., Howard R. E., Hubbard W., Jackel L. D. Backpropagation

Applied to Handwritten Zip Code Recognition, Neural Computation, 1989, No. 1 (4), pp. 541–551.

- Li S., Chen J., Xiang J. Applications of deep convolutional neural networks in prospecting prediction based on two-dimensional geological big data, Neural Comput & Applic, 2019, No. 32, pp. 2037–2053.
- Lindsay M. D., Piechocka A. M., Jessell M. W., Scalzo R., Giraud J., Pirot G., Cripps E. Assessing the impact of conceptual mineral systems uncertainty on prospectivity predictions, Geosci. Front, 2022, No. 13, pp. 101435.
- 17. *Maas A. L., Hannun A. Y., Ng A. Y.* Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models, Proc. Ic-ml, 2013, V. 30, No. 1, pp. 3.
- McCulloch W. S., Pitts W. A. Logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, No. 5, pp. 115–133.
- McMillan M., Fohring J., Haber E., Granek J. Orogenic gold prospectivity mapping using machine learning, ASEG Extended Abstracts, 2019, No. 1, pp. 1–4.
- Porwal A., Carranza E. J. M., Hale M. Artificial Neural Networks for Mineral-Potential Mapping: A Case Study from Aravalli Province, Western India, Natural Resources Research, 2003, No. 12, pp. 155–171.
- 21. *Ronneberger O, Fischer P, Brox T.* U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention, 2015, pp. 234–241.
- 22. *Rosenblatt F.* Principles of Neurodynamics; Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms, Washington, Spartan Books, 1962, 616 p.
- 23. *Rosenblatt F.* The Perceptron A Perceiving and Recognizing Automaton, Technical Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Laboratory, 1957.
- 24. *Singer D. A., Kouda R.* Use of a neural network to integrate geoscience information in the classification of mineral deposits and occurrences, Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration: Toronto, 1997, pp. 127–134.
- 25. *Singh P., Manure A.* Learn TensorFlow 2.0 : Implement Machine Learning and Deep Learning Models with Python, 2020, 164 p.
- Sun T., Chen F., Zhong L., Liu W., Wang Y. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China, Ore Geology Reviews, 2019, 109, pp. 26–49.
- 27. *Wan L., Zeiler M., Zhang S., Le Cun Y, Fergus R.* Regularization of neural networks using dropconnect, International conference on machine learning, 2013, pp. 1058–1066.

Статья поступила в редакцию 13.06.24; одобрена после рецензирования 03.07.24; принята к публикации 03.07.24. The article was submitted 13.06.24; approved after reviewing 03.07.24; accepted for publication 03.07.24.

DOI:10.47765/0869-7175-2024-10018

УДК 553.2 © Коллектив авторов, 2024

Месторождение Южное: Sn-Ag-Pb-Zn орогенная металлогения Сихотэ-Алиня

Формирование аномально сурьмяно-сереброносных Sn-Pb-Zn руд Южного месторождения сопряжено с поздним альб-сеноманским орогенезом Сихотэ-Алиня. Рудовмещающими являются трещинные, субсогласные с напластованием раннемеловых флишоидных алевролитов и песчаников зоны сдвиго-надвигов в борту антиклинальной складки. По данным свинцово-изотопных исследований, источником свинца сеноманской рудно-магматической системы Южного месторождения выступают флишоиды раннемеловой аккреционной призмы Журавлевского террейна – субстрат гранитно-метаморфического слоя новообразованной мезозойской континентальной коры Сихотэ-Алиня. В минералого-геохимическом и структурном отношении месторождение принципиально отлично от скарновых и жильных Pb-Zn месторождений дальнегорского типа, ассоциированных с раннепалеоценовыми магматитами дальнегорской андезит-габбро-гранодиорит-гранитной ассоциации.

Ключевые слова: альб-сеноманский орогенез, Sn-Ag-Pb-Zn руды, S-O-Pb изотопы, Журавлевский террейн, Южное, Краснореченск, Сихотэ-Алинь.

ГУСАРОВА ВАЛЕРИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА, инженер-исследователь¹, val99999@list.ru

РАТКИН ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник¹, ratkin@yandex.ru

ЧУГАЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник², vassachav@mail.ru

ТИХОМИРОВ ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ, инженер-исследователь¹, tihomirov.dmitriy@bk.ru

ЕЛИСЕЕВА ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник¹, okaras@yandex.ru

¹ ФГБУН Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВГИ ДВО РАН), г. Владивосток

² ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

The Yuzhnoe ore deposit: Sn-Ag-Pb-Zn orogenic metallogeny of Sikhote-Alin

V. V. GUSAROVA¹, V. V. RATKIN¹, A. V. CHUGAEV², D. V. TIKHOMIROV¹, O. A. ELISEEVA¹

¹ Far East Geological Institute, Far Eastern Division of the Russian Academy of Sciences (FEGI FEB RAS), Vladivostok

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow

Formation of anomalously antimony-silver bearing Sn-Pb-Zn ores of the Yuzhnoye deposit is related to the late Albian-Cenomanian orogeny of Sikhote-Alin. The ore-bearing structures are represented by fractured zones of strikeslip and thrust faults, subconformable to the bedding of Lower Cretaceous flyschoid siltstones and sandstones in the flank of an anticline. Based on the lead-isotope investigation, the source of lead in the Cenomanian ore-magmatic system of the Yuzhnoye deposit was represented by flyschoids of the Early Cretaceous accretionary prism of the Zhuravlevka terrane, the substrate of the granite-metamorphic layer of the newly formed Mesozoic continental crust of Sikhote-Alin. In terms of the mineralogical-geochemical and structural features, the deposit is fundamentally different from the skarn and vein Pb-Zn deposits of the Dalnegorsk type, associated with Early Paleocene magmatites of the Dalnegorsk andesite-gabbro-granodiorite-granite suite.

Key words: Albian-Cenomanian orogeny, Sn-Ag-Pb-Zn ores, S-O-Pb isotopes, Zhuravlevka terrane, Yuzhnoye, Krasnorechensk, Sikhote-Alin.

Введение. Южное месторождение было обнаружено в 1956 г. в сорока километрах западнее Дальнегорска, в центре Краснореченского рудного района, в южной части Сихотэ-Алинского хребта на высоте около 1200 м над уровнем моря. Оно непрерывно отрабатывается начиная с 1968 г. уже 55 лет.

В принятой классификации месторождение типизировано как касситерит-сульфидное. По данным государственного реестра участков недр, предоставленных для добычи полезных ископаемых, и лицензий на пользование недрами по территории Приморского края, средние содержания свинца, цинка и серебра в рудах Южного месторождения соответствуют 8,48%, 8,8% и 465 г/т. До конца 1980-х гг. описываемое месторождение эксплуатировалось на близповерхностных горизонтах как оловорудное. В текущее время извлекаемые с глубины 400–500 м руды содержат (при доминировании станнина) олова в среднем лишь 0,06%. Месторождение отрабатывается ГМК «Дальполиметалл» как серебро-свинцово-цинковое.

Многолетнее изучение месторождения проводилось фрагментарно, по мере вовлечения в отработку всё более глубоких горизонтов. Внимание акцентировалось на исследованиях минерального состава руд [1, 10, 14, 16]. Вопросы формирования рудовмещающего Журавлевского террейна и процессы орогенеза в непосредственной связи с рудообразованием не обсуждались. По сути, не решалась задача геолого-генетического металлогенического моделирования.

Из указанного следует, что в настоящее время актуальна задача системно суммировать выполненные в последние десятилетия региональные и локальные исследования геологии Журавлевского террейна, Краснореченского района и собственно месторождения, дополнив их результатами изотопно-геохимического изучения рудовмещающих пород и руд.

Журавлевский террейн: региональная позиция, геодинамика и позднемеловой магматизм. В работах последних лет [4, 12, 22] показано, что Сихотэ-Алинь – участок новообразованной континентальной литосферы, сформированный как коллаж юрско-раннемеловых эпиокеанических террейнов. Южное месторождение находится в юго-восточной части Журавлевского террейна (рис. 1).

Журавлевский террейн занимает центральную часть южного Сихотэ-Алиня. В составе террейна

доминируют толщи раннемеловых флишоидов (турбидитов). По данным [4], журавлевские флишоиды накапливались, перекрывая океаническое базальтовое основание, в морском субмеридиональном протяжённом турбидитовом пулл-апарт бассейне вдоль границы континентальной и океанических плит, непосредственно к востоку от материка. Как результат лавинной седимитации, с берриаса по ранний альб включительно, была сформирована толща флишоидных пород мощностью более 13 км. По данным государственной геологической съёмки [11], раннемеловая толща обогащена свинцом (> 45 г/т), цинком (> 125 г/т) и бором (37-196 г/т). Содержание олова из-за присутствия в песчаниках среди акцессориев касситерита и оловоносного биотита [3, 8, 18] варьирует от 2 до 30 г/т. Источником рудной нагрузки осадочных пород выступал поток кварц-полевошпатового кластического материала из континентальной области питания бассейна, выраженной как сочетание территории древнего Сино-Корейского щита и раннепалеозойского Ханкайского супертеррейна [4]. По данным микроскопии и детритовой цирконометрии [13, 29], в составе псаммитовой составляющей песчаников преобладают К-Na полевые шпаты эродируемых пермо-триасовых гранитоидов (230 ± 39 млн лет).

При проскальзывании океанической плиты толща турбидитов транслируется вдоль края материка на север, испытывая складчатость волочения. В позднем альбе–раннем сеномане проявляется пик синсдвиговой орогенной складчатости. При тангенцильном сжатии с азимутальной ориентировкой 340° образуется система тесно сжатых складок и надвигов северо-восточного простирания.

В раннем сеномане финально оформляется террейновый коллаж Сихотэ-Алиня. Журавлевский террейн занимает современное положение в виде призмы с океаническими базальтами в основании. Вертикальная мощность призмы составляла около 30 км [4]. На глубине (в нижней части призмы) в результате гранитно-метаморфических преобразований осадочных пород формируются гигантские батолиты [4, 15]. На поверхности в границах Журавлевского террейна орогенный магматизм выражен как внедрение синорогенных интрузий монцодиоритов и гранитов с датировками, близкими 100 ± 3 млн лет [22].

В позднесеноман-маастрихтское время на современной широте Сихотэ-Алиня проявляется
субдукция океанической плиты. Возникает окраинно-континентальный Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс. Складчатые флишоиды Журавлевского террейна с резким угловым несогласием перекрываются слабодислоцированным чехлом известково-щелочных вулканических пород. Плутонические образования субдукционного этапа проявлены в виде интрузий лейкогранитов возрастом от 75 до 65 млн лет [5, 24].



На рубеже позднего мела-палеоцена субдукционное взаимодействие плит сменяется трансформным режимом. При абсолютном доминировании левосторонних сдвигов в период с 61 до 55 млн лет формируются гигантские палеокальдеры, перекрывающие складчатое основание Журавлевского террейна [25]. Кальдеры выполнены толщей субщелочных кислых вулканитов с интрузиями гранитоидов.

Восточнее Журавлевского террейна, на площади соседнего Таухинского террейна, переход субдукции к режиму трансформного взаимодействия плит фиксируется в узком интервале 60 ± 2 млн лет [25]. В это время возникает дальнегорская вулканоплутоническая ассоциация при доминировании андезитов и интрузий габбро-гранодиорит-гранитного состава [20].

Южное месторождение: структура и магматические комплексы. Южное месторождение локализуется в толще раннемеловых флишоидов и располагается в центральной части Краснореченского рудного района, в зоне влияния Восточной сдвигово-надвиговой зоны на границе Журавлевского и Таухинского террейнов (см. рис. 1). Единственное

Рис. 1. Положение Южного месторождения в структуре террейнов Сихотэ-Алиня [22]. С дополнениями:

1-7 – террейны: 1 – готерив-альбской аккреционной призмы (Ет – Киселевско-Маноминский), 2 – готерив-альбской островодужной системы (Ке-Кемский, Ка – Камышовский, Sch – Шмидта), 3 – раннемелового синсдвигового турбидитового бассейна (Zr-A -Журавлевско-Амурский), 4 – раннемеловой (неокомской) аккреционной призмы (Ти – Таухинский), 5 – юрской аккреционной призмы (Bd – Баджальский, Kh – Хабаровский, Nb – Наданьхада-Бикинский, Sm – Самаркинский), 6 – Монголо-Охотского орогенного пояса (Dk – Джагдино-Кербинский, Ni – Ниланский, UI – Ульбанский), 7 – палеозойской континентальной окраины, перекрывающий юрскую аккреционную призму (Sr – Сергеевский, Sr(h) – Хорский); 8 – домезозойские континенты: Бурея (Bu), Дзямусы (Jm), Ханкайский (Kha) супертеррейн и Сибирский кратон (Sb); 9 - постаккреционный Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс; 10 - Южное месторождение; 11 – восточная граница Сихотэ-Алинского орогенного пояса; 12 – разломы: а – сдвиги, сбросы, б-надвиги



Рис. 2. Генерализованная схема геологического строения Южного месторождения и разрез по линии А–Б. По данным АО ГМК «Дальполиметалл» и [21], с изменениями и дополнениями:

1 — готерив-альбские песчаники; 2 — валанжинские песчаники и алевролиты; 3 — берриас-валанжинские алевролиты; 4 — кварцевые монцодиориты сеноманского возраста; 5 — лейкограниты маастрихтского возраста; 6 — ороговикованные дорудные дайки кварцевых монцодиоритов; 7 — рудная зона (жила № 4) в сдвиго-надвиге; 8 — оси складок; 9 — левые сдвиги зоны Восточного разлома; 10 — элементы залегания

промышленно значимое рудное тело представлено жилой № 4. При протяжённости около 800 м на современной поверхности и варьирующей мощности от 0,2 до 1,0 м жила прослежена до глубины 1 км (рис. 2).

В структурном плане складчато-трещинная структура Южного месторождения, вмещающая рудное тело № 4, проявляется как элемент поздней альб-раннесеноманской складчатости в виде субсогласного с напластованием осадочных пород сдвига-надвига на юго-восточном крыле антиклинальной складки северо-восточного простирания. Чередование участков сжатия и растяжения в рудовмещающей надвиговой зоне выражено в ритмичных изменениях мощности жилы с формированием субгоризонтальных рудных столбов.

В региональной структуре восточной окраины Журавлевского террейна Краснореченский рудный район проявлен как интрузивно-купольная структура. В ядерной части купола, где располагается Южное месторождение, складчатые раннемеловые осадочные породы интенсивно ороговикованы и прорваны мелкими интрузиями монцодиоритов – апофизами располагающейся на глубине крупной интрузии монцодиоритов. Присутствующие на месторождении северо-западные дорудные дайки ранней фазы монцодиоритов, так же как и вмещающие флишоиды, ороговикованы. Возраст монцодиоритов, по данным [6], составляет 95,5 \pm 2,2 млн лет и отвечает сеноманской фазе орогенного магматизма. По данным [2], при повышенной калиевости и низких содержаниях кальция и железа для монцодиоритов характерны высокие концентрации халькофильных элементов: Ад – до 0,51 и Sn – до 7 г/т.

На юго-западном фланге месторождения непосредственно ниже рудной зоны скважинами вскрыта интрузия грейзенизированных лейкогранитов маастрихтского, по данным К-Аг датирования слюд, возраста (65,8 ± 1,5 млн лет). В зоне влияния маастрихтской интрузии отчётливо проявлен термальный метаморфизм руд [16].

Горизонт	Ofnazuri		Элемент	ы, мас. %		Эл	$T \circ C^{**}$		
(M)	Образцы	Fe	As	S	Сумма	Fe	As	S	
010	74–270*	35,82	43,24	20,33	99,39	34,6	31,1	34,2	405
910	74–292*	36,45	42,24	20,31	99	35,3	30,5	34,2	375
(00	1569	34,87	42,27	21,64	98,78	33,5	30,3	36,2	370
690		34,8	41,96	21,54	98,3	33,6	30,2	36,2	367
440	411	35,13	42,25	20,84	101,22	33,4	32,1	34,5	451
440	411	35,17	44,46	20,7	100,33	33,7	31,8	34,2 34,2 36,2 36,2 34,5 34,5 33,7 33,5 33,6	437
	415	34,51	45,23	19,9	99,64	33,5	32,8	33,7	477
403		34,57	45,91	19,88	100,36	33,4	33,1	33,5	490
	418	35,26	45,82	20,17	101,25	33,7	32,7	33,6	475

Табл. 1. Состав арсенопирита ранней кварц-касситерит-арсенопиритовой ассоциации и оценка температуры формирования ассоциации, рассчитанная на основе арсенопиритового геотермометра [27]

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе «JXA-8100» (ДВГИ ДВО РАН, аналитик Г. Б. Молчанова); * – данные из работы [9]; ** – оценка температуры кристаллизации арсенопирита на основе геотермометра [27]; отметка выхода жилы на поверхность – 1100 м.

Минеральный состав, зональность, термометрия. Минеральные ассоциации жильных руд формировались в едином эволюционирующем флюидном процессе. При высокой активности серы были образованы ранняя кварц-касситеритарсенопиритовая и последующая продуктивная кварц-халькопирит-сфалерит-пирротиновая ассоциации. Завершается рудный процесс кристаллизацией аномально высокосурьмяной сульфосольно-антимонидно-галенитовой ассоциации.

Главные минералы руд, в интегральном выражении,- пирротин, арсенопирит, сфалерит и галенит. В составе жильных минералов доминирует кварц, но близ поверхности, кроме кварца, в жильной массе присутствует и кальцит. По литературным данным [1, 9, 10], на верхних горизонтах месторождения в галените присутствуют микровключения антимонита, разнообразных сульфоантимонитов свинца, включая джемсонит, менегинит, буланжерит, овихиит, диафорит и др. Отмечены ауростибит и сурьмянистое золото. В нижней части рудной зоны при преобладании жильного кварца увеличивается относительное количество халькопирита, арсенопирита и пирротина. В виде разнообразных минеральных включений наиболее распространены самородное серебро, самородная сурьма и их интерметаллиды (дискразит, алларгентум), сурьмяные сульфосоли серебра и свинца.

В значениях содержаний продуктивных макрокомпонентов руд вертикальная зональность рудного тела практически не выражена. Отношение содержаний свинца и цинка в рудах сохраняется в значениях 1:1 от поверхности до глубины 900 м. Сфалерит при локальных вариациях железистости (Fe от 7 до 18 мас. %) также проявляет крайне незначительную изменчивость с глубиной. В интервале глубин 0-600 м [9, 14] содержания железа в сфалерите отвечают 12–17 мас. %, на глубине ниже 600 м, по нашим данным, сфалерит содержит Fe 10-15 мас. %. Галенит не содержит элементов-примесей, но повсеместно сохраняет серебро-сурьмяную специализацию за счёт обильных минеральных включений, в том числе и на глубоких горизонтах.

Отчётливо выражено только изменение состава арсенопирита ранней ассоциации со снижением содержаний As (ат. %) от нижних горизонтов к верхним. В табл. 1 приведён состав арсенопирита и рассчитанная на основе минерального геотермометра [27] оценка температуры его кристаллизации.

В числе минералов-индикаторов температуры рудообразования в рудах на верхних горизонтах месторождения присутствует минегинит [1]. С учётом данных [28], можно утверждать, что формирование продуктивных минеральных ассоциаций, завершающих рудный процесс на Южном

№ п/п	Образцы, горизонт, м	Минерал	δ ³⁴ S, ‰
1	414, гор. 440	Пирротин	-1,6
2	416, гор. 403	Пирротин	-1,3
3	418, гор. 400	Пирротин	-1,0
4	430, гор. 390	Пирротин	-0,9
5	414, гор. 440	Галенит	-1,5
6	412, гор. 440	Галенит	-3,6
7	418, гор. 400	Галенит	-2,4
8	416, гор. 403	Галенит	-2,4
9	430, гор. 390	Галенит	-1,6

Табл. 2. Изотопный состав серы пирротина и галенита

Примечание. Исследования выполнены в ЦКП ДВГИ ДВО РАН в лаборатории стабильных изотопов; измерение проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Finnigan, Bremen, Germany); погрешность определения δ^{34} S (1 σ) составляет 0,2 ‰, n = 5.

месторождении, происходило на верхних горизонтах при температуре не ниже 300 °C.

Локально изучены газово-жидкие включения в кварце, ассоциированном с халькопирит-сфалерит-пирротиновым агрегатом на горизонте +440 м (в 600 м от поверхности). Зафиксированная температура гомогенизации включений близка 325 °C. По данным криометрии, в составе газовой фазы включений доминирует CO₂.

Результаты изотопно-геохимических исследований пород и руд. Выполнены исследования изотопных составов серы сульфидов, кислорода жильного кварца и свинца галенита руд. Кроме этого, изучен изотопный состав свинца в валовых пробах песчаников и алевропесчаников раннемеловых флишоидов.

Изотопный состав серы определялся в монофракциях пирротина доминирующей ранней кварц-халькопирит-сфалерит-пирротиновой ассоциации и монофракциях галенита поздней сульфосольно-антимонидно-галенитовой ассоциации. Результаты приведены в табл. 2.

Изотопный состав кислорода кварца изучен в шести пробах стволовой части жильного выполнения, где пространственно совмещён кварц ранней высокотемпературной кварц-касситеритарсенопиритовой и кварц последующей среднетемпературной продуктивной кварц-халькопиритсфалерит-пирротиновой ассоциации. Измеренные значения $\delta^{18}O_{_{\text{кварц}}}$, отвечающие интервалу от +9,8 до +15,5 ‰, приведены в табл. 3.

Анализ изотопного состава свинца галенита сульфосольно-антимонидно-галенитовой ассоциации руд Южного месторождения выполнен в объёме 8 проб, характеризующих рудное тело № 4 в интервале горизонтов 850–550 м, включая фланги и центральную часть рудного тела (табл. 4).

Изотопный состав свинца раннемеловых флишоидных пород изучен в восьми валовых пробах песчаников, характеризующих полный разрез раннемелового Журавлевского турбидитового бассейна от берриаса-валанжина до позднего альба включительно. С учётом содержаний U, Th и Pb в изученных пробах выполнен пересчёт значений свинцово-изотопных отношений на 100 млн лет. Результаты анализа и пересчёта приведены в табл. 5.

Табл. З. Изотопный состав кислорода кварца из стволовой части жильной зоны № 4 горизонтов 350–477 м

№ п/п	Образцы	Горизонт, м	δ ¹⁸ Ο _{VSMOW} , ‰
1	410	477	+15,5
2	413	440	+14,2
3	417	400	+14,7
4	417a	400	+11,9
5	430	395	+15,3
6	55	350	+9,8

Примечание. Исследования выполнены в ЦКП ДВГИ ДВО РАН, в лаборатории стабильных изотопов. Измерения проводились на изотопном масс-спектрометре MAT 253 (Thermo Scientific Germany), в режиме постоянного потока гелия.

Обсуждение результатов. Пространственная сопряжённость Южного месторождения с раннесеноманскими интрузиями монцодиоритов и локализация Ag-Sb-Sn-Pb-Zn жильных руд в трещинной структуре надвига, формирование которого связывается с процессами орогенной складчатости рудовмещающих раннемеловых флишоидов [4, 21], выступают достаточным основанием для вывода о сопряжённости рудообразования с орогенными событиями на рубеже раннего и позднего мела. Рудоконтролирующая Южное месторождение монцодиоритовая интрузивно-купольная

№ п/п	Образцы	Привязка образца	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Тм (Ма)			Th/U
1	213-2001	Горизонт 850 м	18,3288	15,6219	38,6624	268	9,79	39,6	4,05
2	238-2001	Горизонт 760 м	18,3294	15,6238	38,6687	272	9,80	39,7	4,05
3	235-2001	Горизонт 550 м	18,3265	15,6214	38,6603	269	9,79	39,6	4,05
4	U-2	Горизонт 550 м, восточный фланг	18,3231	15,6231	38,6627	275	9,80	39,7	4,05
5	U-3	Горизонт 550 м, восточный фланг	18,3223	15,6222	38,6593	274	9,80	39,7	4,05
6	U-4	Горизонт 550 м, западный фланг	18,3234	15,6237	38,6644	276	9,80	39,7	4,05
7	U-10	Горизонт 550 м, западный фланг	18,3228	15,624	38,6650	277	9,81	39,7	4,05
8	U-11	Горизонт 550 м, западный фланг	18,3209	15,6224	38,6656	275	9,80	39,7	4,05

Табл. 4. Изотопный состав свинца в монофракциях галенита из руд Южного месторождения (жила № 4)

Примечание. Измерения выполнены в ИГЕМ РАН (г. Москва) на многоколлекторном масс-спектрометре NEPTUNE (Thermo Finnigan, Германия) из растворов с применением в качестве трасера таллия с известным изотопным отношением ²⁰⁵Tl/²⁰³Tl для коррекции результатов измерений на приборную масс-дискриминацию; аналитическая ошибка измеренных отношений ±0,02 % (2SD).

структура проявлена как восточная часть Березовского-Араратского габбро-монцодиоритового ареала интрузий, сформированного, по данным U-Pb датирования [12], на пике орогенного магматизма (101 \pm 1,0 млн лет). Интрузивный магматизм является, по данным геологических и детальных петрологических построений [2, 4, 6, 12], отражением процессов флюидно-магматической переработки раннемеловых флишоидов в основании Журавлевской аккреционной призмы.

Табл. 5. Изотопный состав свинца в валовых пробах раннемеловых песчаников с пересчётом изотопных отношений на 100 млн лет

N₂	0500000	Pb,	Th,	U,	Th/I I	206DL/204DL	207DL/204DL	208DL/204DL	Пересчё ⁻ отноше	г свинцо-изотопных сний на 100 млн лет				
п/п	Ооразцы	г/т	г/т	г/т	111/0	FD/ FD	FU/ FU	FU/ FU	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb			
1	Zh-11	11,8	8,35	1,88	4,4	18,5115	15,5971	38,5422	18,352	15,589	38,311			
2	Zh-25	5,59	17,51	2,99	5,8	18,8588	15,6464	39,3088	18,314	15,62	38,271			
3	Zh-44	14,7	17,7	3,3	5,3	18,6803	15,6553	39,1458	18,453	15,644	38,749			
4	Zh-48	26	16	2,9	5,5	18,4753	15,6280	38,8145	18,363	15,623	38,613			
5	Zh-70	17,2	15,8	3,1	5,1	18,7464	15,6474	39,1703	18,564	15,639	38,867			
6	Zh-71	16,6	14,9	2,8	5,3	18,5024	15,6219	38,8370	18,333	15,614	38,543			
7	Zh-87	15,1	13,8	2,7	5,1	18,5241	15,6307	38,9394	18,344	15,622	38,639			
8	Zh-88	19,1	15,3	2,8	5,5	18,5297	15,6301	38,9511	18,382	15,623	38,688			

Примечание. Измерения выполнены в ИГЕМ РАН (г. Москва) на многоколлекторном масс-спектрометре NEPTUNE (Thermo Finnigan, Германия) из растворов с применением в качестве трасера таллия с известным изотопным отношением 205 Tl/ 203 Tl для коррекции результатов измерений на приборную масс-дискриминацию; аналитическая ошибка измеренных отношений $\pm 0,03 \%$ (2SD). Содержания Pb, Th, U определены методом ICP-MS в ИГЕМ РАН (г. Москва); ошибка аналитических определений содержаний элементов $\pm 3 \%$ (2SD). Возраст песчаников: обр. Zh-11, Zh-25 – берриас-валанжин; обр. Zh-44, Zh-48 – валанжин; обр. Zh-70, Zh-71 – ранний-средний альб; обр. Zh-87, Zh-88 – средний-поздний альб.

Оценка температуры и природы минералообразующих растворов, выполненная на основе данных изучения состава арсенопирита (см. табл. 1), достаточно предметна в отношении ранней стадии минералообразования (кварц-касситерит-арсенопиритовой ассоциации). На глубине 700 м температура близка 500 °С, а близ поверхности температура восходящего флюида снижалась до 400 °С. Ориентируясь на присутствие в составе поздней сульфосольно-антимонидно-галенитовой продуктивной ассоциации в верхней части рудного тела минегинита, устойчивого при температуре выше 300 °С [28], можно предположить, что интенсивный (высокодебитный) флюидный режим сохранялся при снижении температуры не более, чем на 100 °С, включая позднюю продуктивную стадию. Следовательно, в завершении рудообразования процесс реализовался по мере продвижения флюида с глубины 700-800 м к поверхности в интервале от 400 до 300 °С. Результаты локальных исследований газово-жидких включений в кварце продуктивной кварц-халькопиритсфалерит-пирротиновой ассоциации согласуются с указанной оценкой. Температура гомогенизации газово-жидких включений в образцах кварца, отобранного на глубине 600 м (горизонт 440 м), составила 325 °С.

Выполненный анализ изотопного состава кислорода кварца позволяет оценить, ориентируясь на известные равновесия [19], изотопный состав кислорода во флюиде. Следует подчеркнуть, что определения $\delta^{18}O_{_{_{KBapu}}}$ проводились в шести пробах жильного кварца из стволовой части жилы № 4 горизонтов 350-477 м (см. табл. 3). Измеренные значения $\delta^{\rm 18}O_{_{\rm кварц}}$ отвечают интервалу от +9,8 до +15,5 %. Оценка-пересчёт изотопного состава водного флюида выполнена с учётом данных температурной зональности и особенности дифференциации изотопов кислорода в системе кварц-Н₂О [5]. По нашим наблюдениям, в стволовой части жилы пространственно совмещён кварц ранней высокотемпературной кварцкасситерит-арсенопиритовой и кварц последующей среднетемпературной продуктивной кварцхалькопирит-сфалерит-пирротиновой ассоциации. Для пересчёта принята температура кварца в среднетемпературном продуктивном интервале 325-400 °С. Это обеспечивает модельные построения, где расчётная оценка не превышает реальные значения δ¹⁸О_{н₂}, флюидной системы. Полученные расчётные значения в $\delta^{18}O_{H_{*}O}$ в интервале +5,8 ÷ +10,5‰ вполне однозначно указывают на преобладание в составе флюида растворов магматического происхождения. Участие метеорной составляющей не проявлено.

Результаты анализа изотопного состава серы главных рудных минералов руд Южного месторождения (пирротин, галенит) демонстрируют её изотопную гомогенность (см. табл. 2). При очевидном отсутствии серы, включая сульфатную, в составе рудовмещающих флишоидов близкие к метеоритному стандарту значения $\delta^{34}S$ сульфидов определённо указывают на преобладание ювенильной серы магматогенного происхождения. Проявленное изотопное облегчение серы относительно нулевого стандарта вполне согласуется с доминированием в составе рудно-магматической системы Краснореченского района гранитоидов ильменитовой серии [17]. Из таблицы 2 видно, что проявлена тенденция снижения значений б³⁴S и пирротина, и галенита в воздымающемся флюидном потоке. По нашим представлениям, эти изменения отражают увеличение восстановленности магматогенного флюида по мере его продвижения к поверхности в результате дегазации: снижения содержаний доминирующего в системе СО₂.

Следует подчеркнуть, что фиксируемые элементы изменчивости эволюционирующего флюидного потока практически не выражены в продуктивной минералого-геохимической зональности руд. В объёме чрезвычайно протяжённой жильной зоны сохраняется аномально высокая сереброносность руд и на флангах, и на глубине около одного километра. Практически неизменно продуктивное отношение Pb/Zn в рудах, близкое к значениям 1:1. Это характеризует флюидную систему как плутоногенную с экстремально высокой дебитной характеристикой, обеспечивающей униформный режим минералообразования. Прямым выражением указанных особенностей является фиксированный низкий температурный градиент, не превышающий 10 °С на 100 метров.

Предметная информация о природе рудно-магматической системы Южного месторождения получена при изучении свинцо-изотопного состава руд и вмещающих флишоидов.

Выполненные определения изотопного состава галенита руд Южного месторождения демонстрируют абсолютную изотопную однородность: при средних значениях (из восьми проб галенита) изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb на уровне 18,325, 15,623 и 38,664 соответственно индивидуальные модельные точки отклоняются от средних не более, чем на 0,02%. Это прямо указывает на высокую гомогенность и грандиозный масштаб однородного магматического источника рудного свинца, соизмеримого с батолитом. Расчёты, выполненные на основе модели Стейси-Крамерса [29], показывают, что этот источник имеет близкую к среднекоровой характеристику с отношением ²³⁸U/²⁰⁴Pb около 9,80 и высоким отношением ²³²Th/²⁰⁴Pb - 39,7. На диаграмме в координатах ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb экспериментальные точки рудного галенита лежат вблизи среднекоровой эволюционной кривой Стейси-Крамерса, между кривыми «ороген» и «верхняя кора» (см. рис. 3).

Отчётливо видно, что характеристика свинцовоизотопной рудной системы и «орогенная» характеристика осадочных пород Журавлевского террейна (в пересчёте на 100 млн лет) по сути идентичны.

По совокупности изотопно-геохимических и геологических данных можно утверждать, что источником рудного свинца выступал раннемеловой аномально обогащённый рудными элементами флишоидный свинцово-изотопный резервуар Журавлевского террейна. Формирование рудоносных гранитоидов связано с процессами орогенных гранитно-метаморфических преобразований флишоидов на ювенильном уровне. Указанная преемственность отчётливо проявлена в соответствии с расчётными отношениями Th/U в модельном источнике рудного свинца и аналитически измеренных Th/U отношений в флишоидах (см. табл. 5).

Принципиально важный аспект в характеристике природы рудно-магматических систем (РМС) участие мантии в рудообразовании. В отношении РМС Южного месторождения этот вопрос имеет решение в свете изотопно-геохимических особенностей руд и рудоносных магматических комплексов. Принимая отношение ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb как индекс мантийности [23], подчеркнём совпадение его значений для рудной и флишоидной систем на уровне ~2,10-2,11. То есть можно говорить об отсутствии мантийной компоненты и абсолютном доминировании свинца журавлевского свинцовоизотопного резервуара в формировании РМС Южного месторождения. Не менее выразительным является соответствие виртуального свинцово-изотопного модельного возраста руд (268-



Рис. 3. Положение модельных точек изотопного состава свинца галенита из руд Южного месторождения (8 проб) и свинца раннемеловых флишоидных пород (8 валовых проб осадочных пород, в пересчёте на 100 млн лет):

1 – осадочные породы; 2 – галенит

277 млн лет, см. табл. 4) пермо-триасовому возрасту кварц-полевошпатовой псаммитовой гранитогенной составляющей субстрата – раннемеловых песчаников (230 ± 39 млн лет) [13, 30], переработанных в условиях орогенной складчатости и магматизма.

Указанные построения в пользу вывода о верхнекоровой природе РМС Южного месторождения можно дополнить стронциевой изотопной характеристикой раннесеноманских монцодиоритов, для которых, по данным [2], характерны отношения 87 Sr/ 86 Sr на уровне 0,709.

Масштабность процессов орогенного магматизма проявляется в высокодебитовом режиме малоградиентной магматогенной гидротермальной системы, при отсутствии метеорной составляющей. Вполне очевидно, что источником рудного вещества в силу геохимической обогащённости рудными элементами новообразованной континентальной коры, могут выступать, как это проявлено в геохимии свинца, складчатые толщи флишоидов. Исключение составляет ювенильная сера. Представляется, что формирование верхнекоровых рудоносных магматических очагов реализовалось на орогенном этапе при участии подкоровых флюидных потоков с ювенильной серой. По мере развития рудного процесса происходит снижение активности серы. Эта тенденция находит выражение в массовой кристаллизации самородной сурьмы и её сплавов с серебром в финале рудообразования в виде включений в минералах поздней продуктивной ассоциации.

В суммированном виде особенности орогенного рудообразования на Южном месторождении свидетельствуют о его специфике. Наиболее ярко это проявлено в сопоставлении с жильными и скарновыми Pb-Zn месторождениями соседнего Дальнегорского района. В отличие от Южного, дальнегорские месторождения возникают в геодинамическом режиме трансформной континентальной окраины. Центры рудообразования связаны с ареалами палеоценового андезитгаббро-гранодорит-гранитного магматизма [7] и контролируются постскладчатыми разломами северо-западного простирания в виде оперения северо-восточных региональных сдвиговых зон. Отчётливо проявлена вертикальная минералогогеохимическая зональность дальнегорских месторождений с серебро-сурьмяными рудами в головной части и серебро-висмутовыми корнями. Формирование руд происходит в близповерхностных условиях в потоке магматогенных флюидов при варьирующем участии метеорной составляющей.

Специфика изученного плутоногенного Южного месторождения должна учитываться при организации прогнозно-поисковых работ, ориентированных на выявление новых аномально сереброносных полиметаллических месторождений на юге Сихотэ-Алиня.

Выводы. По результатам выполненных региональных обобщений и детального изучения аномально сурьмяно-сереброносных Sn-Pb-Zn руд Южного месторождения можно утверждать, что в роли геохимического резервуара рудного свинца Южного месторождения выступали флишоиды Журавлевского террейна, сформированные в раннемеловом турбидитовом бассейне при доминирующем участии пермо-триасовой гранитогенной кластики эродируемого Сино-Корейского щита.

Рудосносный магматизм сопряжён с процессами позднего альб-раннесеноманского орогенного гранитно-метаморфического преобразования флишоидов на ювенильных глубинах, в основании Журавлевской аккреционной призмы.

Весьма своеобразные серебро-сурьмяные полиметаллические руды Южного месторождения формировались при участии магматогенного относительно высокотемпературного (500–300 °C) высокодебитного флюидного потока с участием ювенильной серы подкорового происхождения.

В рудах, образованных в температурно низкоградиентных условиях, в интервале 0–1000 м практически не выражена Ag-Pb-Zn продуктивная макрокомпонентная вертикальная зональность.

Выполненная типизация в полной мере соответствует высказанному ранее прогнозу [22], что в эпоху альб-раннесеноманского орогенеза, кроме известных вольфрамовых, золоторудных и меднопорфировых, формировались и иные, включая оловянные и полиметаллические, месторождения Сихотэ-Алиня. Высокая сереброносность полиметаллических орогенных месторождений обеспечивает их высокую востребованность в расширении современной ресурсной базы серебра южного Сихотэ-Алиня.

Благодарности. Изучение руд глубоких горизонтов Южного месторождения проводится в виде мониторинга по инициативе геологической службы ГМК «Дальполиметалл». Текущие исследования выполнены при непосредственном участии главного геолога рудника «Южный» В. И. Шишкиной, которая организовала сопровождение работ, включая отбор каменного материала и документацию подземных горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортников Н. С., Бородаев Ю. С., Вяльсов Л. Н. [и др.] Редкие минералы сурьмы и их парагенезисы в рудах месторождения Южного (Тетюхинский район, Южное Приморье) // Новые данные о минералах СССР. – Вып. 34. – М. : Наука, 1975. – С. 3–13.
- Валуй Г. А. Петрология гранитоидов и дифференциация расплавов в малоглубинных условиях (Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс). – Владивосток : Дальнаука, 2014. – 245 с.
- Василенко В. П. Актуальные проблемы изучения оловорудных месторождений Приморья // Генезис эндогенной минерализации Дальнего Востока. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1978. – С. 5–14.
- Голозубов В. В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 239 с.
- Гоневчук В. Г. Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудообразование. – Владивосток : Дальнаука, 2002. – 297 с.
- Гоневчук В. Г., Гоневчук Г. А., Лебедев В. А., Орехов А. А. Монцонитоидная ассоциация Кавалеровского рудного района (Приморье): геохронология и некоторые вопросы генезиса // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30, № 3. – С. 20–31.
- Елисеева О. А., Тихомиров Д. В., Раткин В. В. Рудоносные эксплозивные брекчии финальной фазы раннепалеоценового (дальнегорского) импульса магматизма: данные термобарогеохимического изучения включений в кварце // Вестник ДВО РАН. – 2023. – С. 92–107.
- Игнатова В. Ф., Маркевич П. В. О возрасте эндогенного оруденения в некоторых районах Восточного Приморья // Основные проблемы металлогении Тихоокеанского рудного пояса. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1971. – С. 334–335.
- Казаченко В. Т. Марганцовистые и железистые метасоматиты Южного Приморья. – М. : Наука, 1979. – 160 с.
- Казаченко В. Т. Южное свинцово-цинковое месторождение // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – С. 673–676.
- Костин А. Я., Королев В. Н., Пеженина Л. А., Лосив В. Н., Голозубов В. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Южно-Сихотэ-Алинская. Лист L-53-XXXIV, XXXV (Дальнегорск). Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2006. – 206 с.
- Крук Н. Н., Гвоздев В. И., Орехов А. А. [и др.] Раннемеловые гранитоиды и монцонитоиды южной части Журавлевского террейна (Сихотэ-Алинь): геохимические особенности и источники расплава //

Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 30–49.

- Малиновский А. И., Голозубов В. В. Литология и обстановки формирования терригенных отложений вдоль трансформных границ плит на примере раннемелового Журавлевского террейна (Южный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30, № 5. – С. 35–52.
- Осипова Г. А. Элементы-примеси и минеральные микровключения в касситеритах и сульфидах оловополиметаллических месторождений. – Владивосток : Дальнаука, 1993. – 147 с.
- Петрищевский А. М. Статистические гравитационные модели литосферы Дальнего Востока. – Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 1988. – 168 с.
- Раткин В. В., Симаненко Л. Ф., Елисеева О. А., Гоневчук В. Г. Пиротин-нисбит-брейтгауптит-сульфоантимонидная микроминеральная ассоциация: продукт высокотемпературной перекристаллизации руд жильного олово-серебро-полиметаллического месторождения Южное (Сихотэ-Алинь, Россия) // Записки Российского минералогического общества. – 2020. – Т. СХLIX, № 3. – С. 54–77.
- Раткин В. В., Томсон И. Н., Рязанцева М. Д., Сокарев А. Н., Полякова О. П. Соотношение рудной изотопно-геохимической и петрофизической зональности Восточно-Сихоте-Алинского вулканоплутонического пояса // Доклады АН СССР. – 1997. – Т. 356, № 3. – С. 990–994.
- Ростовский Ф. И., Хетчиков Л. Н. Рифтогенез и регенерация рудных компонентов в процессе формирования сульфидно-касситеритового оруденения Сихотэ-Алиня // Рудные месторождения континентальных окраин. – Владивосток : Дальнаука, 2000. – Вып. 1. – С. 113–123.
- Тейлор Х. П. Применение изотопии кислорода и водорода к проблемам гидротермального изменения вмещающих пород и рудообразования // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. – М. : Мир, 1977. – С. 213–298.
- 20. Тихомиров Д. В., Елисеева О. А., Раткин В. В. Структурно-петрологические особенности рудно-магматической системы Николаевского скарново-полиметаллического месторождения (Дальнегорский рудный район, Сихотэ-Алинь) // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 105–107.
- 21. У*ткин В. П.* Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование. М. : Наука, 1989. 165 с.
- Ханчук А. И., Гребенников А. В., Иванов В. В. Альбсеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 4–37.

- Cousens B., Weis D., Constantin M., Scott S. Radiogenic isotopes in enriched mid-ocean ridge basalts from Explorer Ridge, northeast Pacific Ocean // Geochim.Cosmochim. Acta. – 2017. – V. 213. – P. 63–90. – DOI: org/10.1016/j.gca.2017.06.032.
- Grebennikov A. V., Khanchuk A. I., Gonevchuk V. G., Kovalenko S. V. Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia) : Geochemistry and tectonic implications // Lithos. – 2016. – V. 261. – P. 250–261.
- Kasatkin S. A., Grebennikov A. V. The early Paleogene strike-slip tectonic setting along the northeastern Asian margin: structural control on magmatism // International Geology Review. – 2022. – V. 65(14). – P. 2288–2314.
- Khanchuk A. I., Kemkin I. V., Kruk N. N. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data // J. Asian Earth Sci. – 2016. – V. 120. – P. 117–138.

- Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // Canadian Mineralogist. – 1976. – V. 14, № 3. – P. 364–386.
- Pruseth K. L., Mishra B., Bernhardt H. J. Phase relations in the Cu₂S-PbS-Sb₂S₃ system: an experimental appraisal and application to natural polymetallic sulfide ores // Economic Geology. 1997. 92. P. 720–732.
- 29. *Stacey J. S., Kramers I. D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. V. 26, № 2. P. 207–221.
- Tsutsume Y, Yokoyama K., Kasatkin S. A., Golozubov V. V. Provenance study of accretionary complexes in Primory, Far East Russia, using ages and compositions of detrial minerals // Memoirs of the National Museum of Nature and Science. 2016. № 51. P. 79–87.
- Zhang L. G., Liu J. X., Zhou H. B., Chen Z. S. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system // Economic Geology. – 1989. – V. 89. – P. 1643–1650.

REFERENCES

- Bortnikov N. S., Borodayev YU. S., Vyal'sov L. N. [et al.] Redkiye mineraly sur'my i ikh paragenezisy v rudakh mestorozhdeniya Yuzhnogo (Tetyukhinskiy rayon, Yuzhnoye Primor'ye) [Rare antimony minerals and their parageneses in ores of the Yuzhnoye deposit (Tetyukhinsky district, Southern Primorye)], Novyye dannyye o mineralakh SSSR, Is. 34, Moscow, Nauka publ., 1975, pp. 3–13. (In Russ.)
- 2. Valuy G. A. Petrologiya granitoidov i differentsiatsiya rasplavov v maloglubinnykh usloviyakh (Vostochno-Sikhote-Alinskiy vulkanicheskiy poyas) [Petrology of granitoids and differentiation of melts in shallow conditions (East Sikhote-Alin volcanic belt)], Vladivostok, Dal'nauka publ., 2014, 245 p. (In Russ.)
- 3. Vasilenko V. P. Aktual'nyye problemy izucheniya olovorudnykh mestorozhdeniy Primor'ya [Actual problems of studying tin ore deposits of Primorye], Genezis endogennoy mineralizatsii Dal'nego Vostoka, Vladivostok, DVNTS AN SSSR publ., 1978, pp. 5–14. (In Russ.)
- 4. *Golozubov V. V.* Tektonika yurskikh i nizhnemelovykh kompleksov severo-zapadnogo obramleniya Tikhogo okeana [Tectonics of Jurassic and Lower Cretaceous complexes of the northwestern framing of the Pacific Ocean], Vladivostok, Dal'nauka publ., 2006, 239 p. (In Russ.)
- 5. *Gonevchuk V. G.* Olovonosnyye sistemy Dal'nego Vostoka: magmatizm i rudoobrazovaniye [Tin-bearing systems of the Far East: magmatism and ore for-

mation], Vladivostok, Dal'nauka publ., 2002, 297 p. (In Russ.)

- Gonevchuk V. G., Gonevchuk G. A., Lebedev V. A., Orekhov A. A. Montsonitoidnaya assotsiatsiya Kavalerovskogo rudnogo rayona (Primor'ye): geokhronologiya i nekotoryye voprosy genezisa [Monzonitoid association of the Kavalerovsky ore region (Primorye): geochronology and some questions of genesis], Tikhookeanskaya geologiya, 2011, V. 30, No. 3, pp. 20–31. (In Russ.)
- Yeliseyeva O. A., Tikhomirov D. V., Ratkin V. V. Rudonosnyye eksplozivnyye brekchii final'noy fazy rannepaleotsenovogo (dal'negorskogo) impul'sa magmatizma: dannyye termobarogeokhimicheskogo izucheniya vklyucheniy v kvartse [Ore-bearing explosive breccias of the final phase of the early Paleocene (Dalnegorsk) magmatic pulse: data from a thermobarogeochemical study of inclusions in quartz], Vestnik DVO RAN, 2023, pp. 92–107. (In Russ.)
- Ignatova V. F., Markevich P. V. O vozraste endogennogo orudeneniya v nekotorykh rayonakh Vostochnogo Primor'ya [On the age of endogenous mineralization in some areas of Eastern Primorye], Osnovnyye problemy metallogenii tikhookeanskogo rudnogo poyasa, Vladivostok, DVNTS AN SSSR publ., 1971, pp. 334–335. (In Russ.)
- 9. *Kazachenko V. T.* Margantsovistyye i zhelezistyye metasomatity Yuzhnogo Primor'ya [Manganese and ferruginous metasomatites of Southern Primorye], Moscow, Nauka publ., 1979, 160 p. (In Russ.)
- 10. Kazachenko V. T. Yuzhnoye svintsovo-tsinkovoye mestorozhdeniye [Geodynamics, magmatism and

metallogeny of the East of Russia], Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii, Vladivostok, Dal'nauka publ., 2006, pp. 673–676. (In Russ.)

- Kostin A. YA., Korolev V. N., Pezhenina L. A., Losiv V. N., Golozubov V. V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1, 200 000. Izd. 2-ye. Seriya Yuzhno-Sikhote-Alinskaya. List L-53-XXXIV, XXXV (Dal'negorsk). Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1, 200,000. 2nd Edition. South Sikhote-Alin Series. Sheet L-53-XXXIV, XXXV (Dalnegorsk). Explanatory Note], St. Petersburg, VSEGEI publ., 2006, 206 p. (In Russ.)
- Kruk N. N., Gvozdev V. I., Orekhov A. A. [et al.] Rannemelovyye granitoidy i montsonitoidy yuzhnoy chasti Zhuravlevskogo terreyna (Sikhote-Alin'): geokhimicheskiye osobennosti i istochniki rasplava [Early Cretaceous granitoids and monzonitoids of the southern part of the Zhuravlevka terrane (Sikhote-Alin): geochemical features and melt sources], Tikhookeanskaya geologiya, 2019, V. 38, No. 3, pp. 30–49. (In Russ.)
- Malinovskiy A. I., Golozubov V. V. Litologiya i obstanovki formirovaniya terrigennykh otlozheniy vdol' transformnykh granits plit na primere rannemelovogo Zhuravlevskogo terreyna (Yuzhnyy Sikhote-Alin') [Lithology and formation settings of terrigenous deposits along transform plate boundaries using the Early Cretaceous Zhuravlevka Terrane (Southern Sikhote-Alin) as an example], Tikhookeanskaya geologiya, 2011, V. 30, No. 5, pp. 35–52. (In Russ.)
- Osipova G. A. Elementy-primesi i mineral'nyye mikrovklyucheniya v kassiteritakh i sul'fidakh olovo-polimetallicheskikh mestorozhdeniy [Trace elements and mineral microinclusions in cassiterites and sulfides of tin-polymetallic deposits], Vladivostok, Dal'nauka publ., 1993, 147 p. (In Russ.)
- 15. *Petrishchevskiy A. M.* Statisticheskiye gravitatsionnyye modeli litosfery Dal'nego Vostoka [Statistical gravity models of the lithosphere of the Far East], Vladivostok, Izd-vo Dal'nevost. un-ta publ., 1988, 168 p. (In Russ.)
- Ratkin V. V., Simanenko L. F., Yeliseyeva O. A., Gonevchuk V. G. Pirotin-nisbit-breytgauptit-sul'foantimonidnaya mikromineral'naya assotsiatsiya: produkt vysokotemperaturnoy perekristallizatsii rud zhil'nogo olovo-serebro-polimetallicheskogo mestorozhdeniya Yuzhnoye (Sikhote-Alin', Rossiya) [Pyrotine-nisbitebreithauptite-sulfoantimonide micromineral association: a product of high-temperature recrystallization of ores from the Yuzhnoye vein tin-silver-polymetallic deposit (Sikhote-Alin, Russia)], Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva, 2020, V. CXLIX, No. 3, pp. 54–77. (In Russ.)
- 17. Ratkin V. V., Thomson I. N., Ryazantseva M. D., Sokarev A. N., Polyakova O. P. Sootnosheniye rudnoy izotopno-geokhimicheskoy i petrofizicheskoy zonal'nosti

Vostochno-Sikhote-Alinskogo vulkano-plutonicheskogo poyasa [The relationship between the ore isotope-geochemical and petrophysical zoning of the East Sikhote-Alin volcano-plutonic belt], Doklady AN SSSR, 1997, V. 356, No. 3, pp. 990–994. (In Russ.)

- Rostovskiy F. I., Khetchikov L. N. Riftogenez i regeneratsiya rudnykh komponentov v protsesse formirovaniya sul'fidno-kassiteritovogo orudeneniya Sikhote-Alinya [iftogenesis and regeneration of ore components during the formation of sulfide-cassiterite mineralization of Sikhote-Alin], Rudnyye mestorozhdeniya kontinental'nykh okrain, Vladivostok, Dal'nauka publ., 2000, Is. 1, pp. 113–123. (In Russ.)
- Teylor KH. P. Primeneniye izotopii kisloroda i vodoroda k problemam gidrotermal'nogo izmeneniya vmeshchayushchikh porod i rudoobrazovaniya [Application of Oxygen and Hydrogen Isotopes to Problems of Hydrothermal Alteration of Host Rocks and Ore Formation], Stabil'nyye izotopy i problemy rudoobrazovaniya, Moscow, Mir publ., 1977, pp. 213–298. (In Russ.)
- Tikhomirov D. V., Yeliseyeva O. A., Ratkin V. V. Strukturno-petrologicheskiye osobennosti rudno-magmaticheskoy sistemy Nikolayevskogo skarnovo-polimetallicheskogo mestorozhdeniya (Dal'negorskiy rudnyy rayon, Sikhote-Alin') [Structural and petrological features of the ore-magmatic system of the Nikolaevskoye skarn-polymetallic deposit (Dalnegorsk ore region, Sikhote-Alin)], Problemy geologii i osvoyeniya nedr, trudy XXV Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova, Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2021, pp. 105– 107. (In Russ.)
- 21. Utkin V. P. Sdvigovyye dislokatsii, magmatizm i rudoobrazovaniye [Shear dislocations, magmatism and ore formation], Moscow, Nauka publ., 1989, 165 p. (In Russ.)
- 22. *Khanchuk A. I., Grebennikov A. V., Ivanov V. V.* Al'bsenomanskiye okrainno-kontinental'nyy orogennyy poyas i magmaticheskaya provintsiya tikhookeanskoy Azii [Alb-Cenomanian continental margin orogenic belt and igneous province of Pacific Asia], Tikhookeanskaya geologiya, 2019, V. 38, No. 3, pp. 4–37. (In Russ.)
- Cousens B., Weis D., Constantin M., Scott S. Radiogenic isotopes in enriched mid-ocean ridge basalts from Explorer Ridge, northeast Pacific Ocean, Geochim.Cosmochim. Acta, 2017, V. 213, pp. 63–90, DOI: org/10.1016/j.gca.2017.06.032.
- Grebennikov A. V., Khanchuk A. I., Gonevchuk V. G., Kovalenko S. V. Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia), Geochemistry and tectonic implications, Lithos, 2016, V. 261, pp. 250–261.
- 25. *Kasatkin S. A., Grebennikov A. V.* The early Paleogene strike-slip tectonic setting along the northeastern

Asian margin: structural control on magmatism, International Geology Review, 2022, V. 65(14), pp. 2288–2314.

- Khanchuk A. I., Kemkin I. V., Kruk N. N. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data, J. Asian Earth Sci, 2016, V. 120, pp. 117–138.
- 27. *Kretschmar U., Scott S. D.* Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application, Canadian Mineralogist, 1976, V. 14, No. 3, pp. 364–386.
- 28. *Pruseth K. L., Mishra B., Bernhardt H. J.* Phase relations in the Cu₂S-PbS-Sb₂S₃ system: an experimental

appraisal and application to natural polymetallic sulfide ores, Economic Geology, 1997, 92, pp. 720–732.

- 29. *Stacey J. S., Kramers I. D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model, Earth Planet. Sci. Lett, 1975, V. 26, No. 2, pp. 207–221.
- Tsutsume Y., Yokoyama K., Kasatkin S. A., Golozubov V. V. Provenance study of accretionary complexes in Primory, Far East Russia, using ages and compositions of detrial minerals, Memoirs of the National Museum of Nature and Science, 2016, No. 51, pp. 79–87.
- Zhang L. G., Liu J. X., Zhou H. B., Chen Z. S. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system, Economic Geology, 1989, V. 89, pp. 1643–1650.

Статья поступила в редакцию 26.07.24; одобрена после рецензирования 09.09.24; принята к публикации 09.09.24. The article was submitted 26.07.24; approved after reviewing 09.09.24; accepted for publication 09.09.24.

По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию по тел. +7 (495)315-43-65 доб. 227 E-mail: ogeo@tsnigri.ru

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1

УДК 550.411 © И. В. Четвертаков, М. Ю. Джангиров, И. С. Шарыгин, Е. А. Гладкочуб, 2024

Золотоносные россыпи Юрского месторождения и их возможные коренные источники (Становой хребет)

Приведены сведения о геологическом строении Верхне-Тимптонского золотороссыпного района, в пределах которого расположено Юрское россыпное месторождение. Дана краткая характеристика россыпей в бассейне руч. Юрского по результатам геологоразведочных работ. Выполнены исследования типоморфных признаков самородного золота в долинной россыпи руч. Юрского. На основании исследований выделены два его типа, имеющие различные коренные источники. Высокопробное золото I типа представляет собой остаточное золото, поступившее в россыпь из докембрийских золотоносных диафторитов и из трещинных кор выветривания в диафторитах. Средне-низкопробное золото II типа гидротермального низкотемпературного генезиса поступало в россыпь из мезозойских вулканогенно-молассовых отложений. Вопрос, являются ли эти отложения промежуточным коллектором более раннего оруденения или имело место наложение поздней низкотемпературной минерализации, остаётся открытым. Оценены перспективы выявления в бассейне руч. Юрского промышленно значимых рудных объектов различных генетических типов.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит, глубинный разлом, свита, толща, магматический комплекс, рудная формация, диафторез, россыпь, плотик, самородное золото, типоморфные признаки, пробность, коренной источник.

ЧЕТВЕРТАКОВ ИВАН ВАСИЛЬЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер¹, chetvertakov.van@yandex.ru

ДЖАНГИРОВ МАКСИМ ЮНУСОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией², dmu@spirit-irk.ru

ШАРЫГИН ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией¹, isharygin@crust.irk.ru

ГЛАДКОЧУБ ЕГОР АЛЬБЕРТОВИЧ, инженер¹, gladkochub54@gmail.com

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЗК СО РАН), г. Иркутск,

² Общество с ограниченной ответственностью научно-производственная компания «Спирит» (ООО НПК «Спирит»), г. Иркутск

Gold-bearing placers of the Yurskoe deposit and their possible primary sources (Stanovoy Range)

I. V. CHETVERTAKOV¹, M. Yu. DZHANGIROV², I. S. SHARYGIN¹, E. A. GLADKOCHUB¹

¹ Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk

² Limited Liability Company scientific and production company "Spirit" (OOO NPK "Spirit"), Irkutsk

The article presents information on the geology of the Verkhne-Timptonsky gold placer region, within which the Yurskoe placer deposit is located. A brief description of gold placers in the Yurski Stream basin is presented based on geological exploration results. Typomorphic features of native gold from the valley placer of the Yurski Stream were studied. Based on the studies, two types of the native gold were identified, that were related to different primary sources. The high-fineness gold of type I represents residual gold that entered the placer from Precambrian gold-bearing diaphthorites and from fissured weathering crusts in the diaphthorites. The medium- to low-fineness gold of type II of a low-temperature hydrothermal genesis entered the placer from Mesozoic volcanogenic molasse sequences. The question of whether these deposits are an intermediate collector for fragments of earlier gold mineralization, or there was a superposition of a late low-temperature mineralization, remains open. The prospects for identifying economically significant ore objects of various genetic types in the Yurski Stream basin are assessed.

Key words: Aldan-Stanovoy Shield, deep-seated fault, stratigraphic formation, rock sequence, igneous complex, ore formation, diaphthoresis, placer, bedrock, native gold, typomorphic features, fineness, primary source.

Введение. Юрское россыпное месторождение расположено в южной части Алдано-Станового щита на площади Верхне-Тимптонского золотороссыпного района, который охватывает верховья рек Тимптон и Гонам, берущих начало на северных склонах Станового хребта. Руч. Юрский является правым притоком р. Гонам (рис. 1). Промышленная разработка россыпей Верхне-Тимптонского района ведётся с 1905 г. и довольно долго была сосредоточена на относительно крупных и богатых россыпях в бассейне р. Тимптон (участки Скобельцинский, Колбочи, Тимптон, Муравьевский, Андриановский, Джигдали, Утанах, Окурдан, Дорожный и др.). С небольшими перерывами она продолжается вплоть до настоящего времени. Некоторые россыпи отработаны по нескольку раз.

В бассейне р. Гонам большая часть россыпей относится к рангу малых объектов с низкими содержаниями металла (участки Гонамский, Незабытый, Безымянный, Медвежий, Половинка). Долгое время промышленные россыпи здесь выявить не удавалось. Только в 1992 г. было открыто месторождение руч. Юрского, которое является уникальным для всего Верхне-Тимптонского района – за время отработки с 1995 г. здесь добыто более 20 т золота.

Промышленно значимые объекты коренного золота в пределах Верхне-Тимптонского района не установлены. Источниками самородного золота в россыпях считаются мелкие кварцевые прожилки и зонки сульфидизации, рассеянные в докембрийских диафторированных породах. Кроме того, при проведении поисковых работ на рудное золото в бассейне руч. Юрского установлена слабая золотоносность мезозойских вулканогенномолассовых отложений с признаками оруденения типа палеороссыпей.

Нами выполнено изучение типоморфных признаков самородного золота в долинной россыпи ручья Юрского с использованием электронной микроскопии. Целью исследований являлось определение формационной принадлежности коренных источников россыпей и условий поступления золота в аллювиальные отложения.

Геологическая позиция Верхне-Тимптонского золотороссыпного района. В тектоническом отношении Верхне-Тимптонский золотороссыпной район расположен в пределах Пристанового орогенного пояса, по которому Становой супертеррейн в раннем протерозое причленился к Алданскому (см. рис. 1, врезка). Нижний архей в Пристановом поясе представлен глубоко метаморфизованными образованиями тангракской серии: гиперстеновыми плагиогнейсами, амфиболовыми и двупироксеновыми кристаллическими сланцами с прослоями биотито-гранатовых гнейсов, амфиболитов и амфиболо-магнетитовых кварцитов. По результатам палеореконструкций, тангракская серия (ранее известная как токариканская) сложена вулканитами толеитовой и известково-щелочной серий, претерпевшими высокоградиентный метаморфизм гранулитовой фации [4]. К нижнему архею относится также хорогочинский комплекс основных и ультраосновных пород (метагаббро, метапироксениты, метаперидотиты).

Считается, что в позднем архее нижнеархейские кристаллические комплексы подверглись интенсивной складчатости и региональному метаморфизму амфиболитовой фации, которые сопровождались формированием интрузий древнестанового плагиогранит-гранитового комплекса.



Рис. 1. Геологическое строение Верхне-Тимптонского золотороссыпного района. По данным геологосъёмочных работ (Ю. К. Дзевановский, 1964), с изменениями:

1–6 – отложения: 1 – современные четвертичные ($Q_{_{IV}}$), 2 – верхнечетвертичные-современные ($Q_{_{III+IV}}$), 3–5 – мезозойские вулканогенно-молассовые: 3 – карауловская (K_1kr), 4 – ундытканская (K_1un) и 5 – холоджиканская (J_3-K_1hn) свиты, 6 – нижнепротерозойские вулканогенно-терригенные (PR_1); 7 – нижнепротерозойский диафторитовый комплекс (dPR_1); 8 – нижнеархейские глубоко метаморфизованные образования тангракской серии (AR_1tr); 9–14 – интрузивные образования: 9 – джемериканский комплекс субвулканических интрузий ($\delta \pi K_1d$), 10 – тындинско-бакаранский монцонит-диоритовый комплекс ($\delta \mu_{2+3}$ tb), 11 – нерчинский гранодиорит-гранитовый комплекс (γPR_1nr), 12 – древнестановой плагиогранит-гранитовый комплекс (γAR_2ds), 13–14 – хорогочинский метаперидотит-метагаббровый комплекс: 13 – метагаббро, анартозиты (vARh), 14 – метаультрабазиты; 15–17 – тектонические нарушения: 15 – региональные и 16 – мелкие разломы, 17 – разломы, перекрытые четвертичными отложениями; 18 – россыпи золота, частично или полностью отработанные; 19 – Юрское россыпное месторождение; 20 – Верхне-Тимптонский золотороссыпной район Однако отмечено, что значения абсолютного возраста древнестанового комплекса, определённые различными методами, соответствуют раннему протерозою и не согласуются с геологическими данными [4].

Нижнепротерозойские стратифицируемые образования локализованы в грабенообразных структурах, ограниченных крупными тектоническими нарушениями субширотного простирания. Они сложены гранат-слюдяными сланцами, метаалевролитами, метаэффузивами среднего и кислого состава. В результате тектонического сжатия и надвигово-чешуйчатой тектоники в конце раннего протерозоя на границе Алданского и Станового супертеррейнов произошло совмещение блоков, линз, чешуй, сложенных различными архейскими и раннепротерозойскими метаморфическими образованиями, и сформировались прорывающие их гранитоидные комплексы с абсолютным возрастом 1,95-1,90 млрд лет [6]. На завершающем этапе коллизии в межблоковых зонах образовались зеленосланцевые диафториты, содержащие рассеянную золоторудную минерализацию.

Одной из таких зон является Джигдалинская зона зеленосланцевых диафторитов северо-западного простирания (см. рис. 1). Она имеет ширину до 5 км и вытянута в северо-западном направлении на расстояние более 30 км. Слагающие её диафториты неоднократно преобразовывались. В настоящее время они представляют собой рассланцованные и зеленокаменно изменённые породы с реликтами докембрийского субстрата. Местами диафториты пронизаны многочисленными согласными и секущими прожилками кварцевого, кварц-хлорит-серицитового и кварц-карбонатного состава. К зонам окварцованных и пиритизированных пород приурочены мелкие проявления золота с содержанием от 0,1 до 24 г/т. В метагаббро, подвергшихся диафторезу, также установлены повышенные содержания золота. Рассеянная золотокварц-сульфидная минерализация метаморфогенно-гидротермального типа, локализованная в диафторитах Джигдалинской зоны, традиционно считается источником золотоносных россыпей Верхне-Тимптонского района.

В позднеюрское-раннемеловое время на докембрийский фундамент наложены образования Северо-Станового вулкано-плутонического пояса. В кристаллические породы фундамента внедрялись сложнодифференцированные монцонит-

сиенитовые интрузии тындинско-бакаранского комплекса, для которых характерны структуры внутреннего обрушения. В связи с этими структурами формировались крупные тектонические впадины, заполненные континентальными вулканогенно-молассовыми отложениями. В соседних рудных районах (Апсакано-Нагорненском и Сутамо-Брянтинском) с мезозойскими вулканическими комплексами генетически связано гидротермальное оруденение золото-молибден-порфировой, золото-сульфидно-кварцевой, золото-серебряной и золото-ртутной формаций. Наиболее крупное из них – Бамское месторождение золотосульфидно-кварцевой формации – расположено в 150 км западнее Юрского. Однако на площади Верхне-Тимптонского района коренные золоторудные объекты, связанные с мезозойской активизацией, до настоящего времени не установлены.

Геология юрского месторождения. Описание геологического строения Юрского месторождения приводится по данным поисковых работ на коренное золото в бассейнах ручьёв Юрский, Придорожный, Половинка (отв. исполнитель Ю. А. Зубков, 2003). В бассейне руч. Юрского на докембрийский фундамент наложен Половинкинский грабен, выполненный вулканогенно-молассовыми отложениями верхней юры–нижнего мела. Это типичная вулканотектоническая структура шириной до 6 км. Грабен ограничен сбросами субширотного простирания, которые смещаются северовосточными сдвигами (рис. 2). Преобладающее залегание мезозойских пород моноклинальное с падением на север под углом 20–40°.

В нижней части мезозойских отложений залегает холоджиканская свита позднеюрского-раннемелового возраста, мощностью 1000–1200 м, сложенная полимиктовыми песчаниками с прослоями тёмно-серых алевролитов и линзами углей. В основании свиты залегает пачка базальных конгломератов, в которых установлены знаки кластогенного золота.

На отложениях холоджиканской свиты залегает песчано-конгломератовая толща раннемелового возраста общей мощностью более 800 м (ундытканская свита). Она представлена мелкокрупнозернистыми полимиктовыми песчаниками с пачками крупногалечных валунных конгломератов. Галька и валуны до 1 м в диаметре сложены архейскими породами и диафторитовыми сланцами серицит-хлорит-эпидот-кварцевого состава. В отложениях ундытканской свиты канавами



Рис. 2. Схематическая геологическая карта Юрского россыпного месторождения. По результатам поисковых работ (Зубков, 2003), с добавлениями и изменениями:

1–7 – отложения: 1–3 – современные: 1 – аллювиальные ($\alpha Q_{_{IV}}$), 2 – пролювиальные ($\rho Q_{_{IV}}$), 3 – делювиально-солифлюкционные ($ds Q_{_{IV}}$), 4 – верхнечетвертичные флювиогляциальные ($f Q_{_{III}}$), 5–7 – мезозойские вулканогенно-молассовые: 5 – карауловская свита (K_1kr), 6 – ундытканская свита (K_1un), 7 – холоджиканская свита (J_3+K_1hl); 8 – нижнепротерозойский диафторитовый комплекс: зеленосланцевые диафториты и диафторитизированные породы; 9 – нижнеархейские глубоко метаморфизованные образования тангракской серии (AR_1tr); 10–13 – интрузивные образования: 10 – джемериканский комплекс субвулканических интрузий ($\delta \pi K_1$ d), 11 – тындинско-бакаранский монцонит-сиенитовый комплекс ($\delta \mu_{2+3}$ tb), 12 – древнестановой плагиогранит-гранитовый комплекс ($\rho \gamma - \gamma AR_2$ ds), 13 – хорогочинский метаперидотит-метагаббровый комплекс ($\nu - \sigma AR_2$ h); 14 – крутопадающие разломы; 15 – разломы, перекрытые четвертичными отложениями; 16 – россыпи золота, частично или полностью отработанные

вскрыты шесть пластов конгломератов мощностью 2–6 м с содержанием золота в протолочках 0,17–0,75 г/м³. Большая часть золотин чешуйчатой и пластинчатой формы. Значимые гидротермально-метасоматические изменения с наложенной минерализацией в конгломератах не установлены. На песчано-конгломератовых отложениях ундытканской свиты с угловым и азимутальным несогласием залегают вулканогенно-молассовые отложения карауловской свиты. В её основании лежит пачка туфоконгломератов, которая вверх по разрезу сменяется туфопесчаниками и туфами в переслаивании с покровами андезитов. Химический состав вулканитов отвечает нормальному, реже субщелочному ряду натрий-калиевой серии. Джемериканский комплекс субвулканических интрузий представлен дайками, силлами и штоками андезитовых порфиритов. Мощности дайкообразных субвулканических тел варьируют от полуметра до 300–400 м, а протяжённость достигает 3 км. Встречаются мелкие туфовые диатремы (брекчиевые трубки) до 30 м в диаметре. Из вторичных изменений в дайках отмечаются карбонатизация и хлоритизация. Субвулканические тела обладают повышенными содержаниями хрома (2,3 кларка) и серебра (5,4 кларка).

Бассейн руч. Юрского в геоморфологическом отношении приурочен к позднекайнозойской межгорной впадине, наследующей меловую вулканотектоническую структуру.

В поперечном плане долина руч. Юрского имеет корытообразный асимметричный профиль с очень пологим левым бортом и относительно крутым правым (рис. 3). Продольный профиль долины вогнутого типа. Днище долины руч. Юрского отличается большой шириной (1000–1200 м), сужаясь лишь в самых верховьях до 150–200 м. По данным эксплуатации, в днище долины отмечаются многочисленные уступы, провалы и выступы плотика, приуроченные к тектоническим нарушениям. Наиболее крупные уступы установлены в районе устья ручьёв Длинного и Нижнего. Они обусловлены поперечными сбросами субширотного простирания. Значительная ширина долин характерна и для крупных притоков руч. Юрского.

В строении долины руч. Юрского принимают участие низкая пойма (0-0,3 м), высокая пойма (1,0-1,8 м), 1-я надпойменная терраса (1,8-4,0 м), 2-я надпойменная терраса (4,0-6,0 м) и увальная терраса (6,0-15,0 м). Аллювиальные отложения сложены перемытым местным пролювиальноделювиальным материалом. Основную часть аллювиальных отложений в долине руч. Юрского составляют супеси серого, зеленовато-серого цвета с дресвой и небольшим количеством гальки и гравия. Галька мелкая без определённой ориентировки. Содержание крупногалечного материала класса +80 мм крайне незначительное. Валуны практически отсутствуют. Степень окатанности галек весьма низкая. Хорошую окатанность имеют только галька и редкие валуны, переотложенные из мезозойских конгломератов. Песчаная фракция плохо отсортирована. В верхней части долины, до устья руч. Среднего, в аллювии встречаются неокатанные глыбы серого халцедоновидного кварца размером 0,1-0,3 м без рудной минерализации.

Геоморфологическое строение долин руч. Юрского и его притоков показывает, что их разработанность и ширина днищ не соответствуют площадям водосборных бассейнов, протяжённости водотоков, их транспортирующей способности



Рис. 3. Геологический разрез Юрского месторождения по Л–4 (см. рис. 2). По данным геологоразведочных работ (Скороходов, 2004):

1 — пролювиально-аллювиальные отложения слабозолотоносные (торфа); 2—3 — кондиционный золотоносный пласт (пески): 2 — с низкими и средними содержаниями металла, 3 — с высокими и ураганными содержаниями; 4—8 — коренные породы (плотик): 4 — диафториты, 5 — гнейсы, 6 — катаклазиты, 7 — андезитовые порфириты, 8 — песчаники

и энергии рельефа. Причиной является длительный двухэтапный период формирования россыпей. На раннечетвертичном этапе, когда ручей Юрский был подпружен ледником в долине р. Гонам, произошло первичное заполнение межгорной впадины рыхлым золотосодержащим материалом аллювиально-пролювиального генезиса. Золото в этот материал поступало за счёт разрушения слабозолотоносных молассовых отложений холоджиканской и ундытканской свит, а также диафторитов Джигдалинской зоны. После заложения Верхне-Гонамской впадины в позднечетвертичное время и резкого понижения базиса эрозии в устье руч. Юрского накопленный золотосодержащий рыхлый материал пролювиально-делювиального генезиса был переработан постоянными водотоками с формированием промышленных россыпей. Этому способствовало потепление климата в связи с окончанием зырянского оледенения. Остатки непереработанного рыхлого материала сохранились на поверхности увальной террасы.

Россыпное месторождение руч. Юрского состоит из долинной россыпи ручья Юрского и сочленяющихся с ней россыпей боковых притоков: ручьёв Верхний, Средний, Правый, Хребтовый, Промежуточный, Длинный, Нижний (см. рис. 2). Характеристика россыпей приводится по результатам геологоразведочных работ (ответственные исполнители: В.А. Василевский, 1998, С.П. Попов, 2004, Н.И. Скороходов, 2004, И.В. Четвертаков, 2021, С.В. Вишняк, 2023).

Все россыпи представляют собой лентообразные мелкозалегающие залежи как простого, так и сложного строения. Промышленный пласт локализован вблизи плотика. Содержание тяжёлой фракции в песчаном материале золотоносных пластов колеблется в пределах 5-10%. Её минеральный состав на всём месторождении примерно одинаков. Основными минералами являются магнетит, ильменит, гранаты, пироксены и амфиболы. Реже встречаются циркон, рутил, пирит, шеелит, галенит, киноварь, самородное золото. Значимые концентрации пирита отмечаются только на нижнем участке россыпи. Из породообразующих минералов прямая корреляция их повышенных содержаний с золотоносным пластом отмечается для хлорита и биотита. Поэтому пласт имеет характерный зеленоватый оттенок. В целом минеральный состав песчаной фракции промышленных пластов соответствует составу диафторитов.

На верхнем и среднем участках долины руч. Юрского ширина промышленного контура изменяется от 20 в истоках ручья до 700–1000 м в средней части долины ниже устья руч. Хребтового (см. рис. 2). Среднее содержание золота по линиям колеблется в пределах 0,40–0,60 г/м³, достигая в отдельных линиях 1,27 г/м³. Мощность промышленного пласта вниз по течению нарастает от 0,4–0,6 до 2,5 м. Плотик в верхней и средней частях долины сложен груботерригенными породами холоджиканской и ундытканской свит, пронизанными субвулканическими телами джемериканского комплекса.

Нижний участок долины отличается от остальной россыпи более сложным геологическим строением. Коренными породами здесь являются метагаббро, граниты, плагиограниты, кристаллические сланцы и гнейсы, в различной степени диафторированные (см. рис. 2). Поверхность плотика осложнена серией поперечных сбросов с проседанием отдельных участков. Ниже слияния ручьёв Юрского и Длинного образовался продольный выступ с обратным уклоном плотика. Этот выступ рассекают два древних тальвега глубиной 8-10 м, приуроченных к сбросо-сдвигам северовосточного направления. Левый тальвег является древним руслом руч. Длинного, а правый – ручья Юрского. Погребённые тальвеги разделены гребнем шириной 100-120 м (см. рис. 3). Возраст отложений, выполняющих древние тальвеги, определяется позднечетвертичным временем заложения Верхне-Гонамской впадины.

В древнем тальвеге руч. Длинного отработана наиболее обогащённая золотом полоса долинной россыпи ручья Юрского шириной до 300 м. Мощность золотоносного пласта здесь увеличивается до 10,0–13,2 м при среднем содержании до 1,5 г/м³. Нижняя часть пласта сложена переотложенной корой выветривания мощностью от 1,5 до 3,0 м, которая представляет собой серо-зелёную супесчаную массу с содержанием металла до 4,0 г/м³ (см. рис. 3). В серо-зелёной коре выветривания содержатся линзы глинистой коры выветривания оранжево-бурого цвета с большим количеством хлорита, полуокисленного пирита и обломков кварца. Содержание в глинистой коре по отдельным выработкам достигает 3-8 г/м³, а по отдельным пробам – 27–80 г/м³. В пробах с ураганными содержаниями встречались самородки размером до 5-8 мм. Всё золото имеет субрудный или рудный облик.

Плотик тальвега сложен интенсивно катаклазированными диафторитами, окварцованными и в различной степени пиритизированными. Окварцевание проявлено в виде тонких прожилков, жил и пропитывающего тонкозернистого агрегата. Часть разведочных скважин на этом участке остановлена в крепком плотике с промышленными содержаниями золота. Наличие золотоносной коры выветривания, рудный облик шлихового золота, состав плотика – всё указывает на то, что коренной источник самородного золота находится в самом размываемом плотике или на левом склоне долины. В торфах мощностью 10–15 м, перекрывающих промышленный пласт, значимые концентрации золота не установлены.

В пределах погребённого тальвега руч. Юрского золото концентрируется в тонких прослоях, распределённых по всей мощности аллювия. Промышленный пласт мощностью 12–15 м и со средним содержанием, близким к минимальному промышленному (0,270 г/м³), включает 5–8 тонких прослоев с содержаниями до 1 г/м³.

На приустьевом участке долина руч. Юрского вложена в поверхности первой и второй надпойменных террас р. Гонам. Мощность рыхлых отложений здесь увеличивается до 20–25 м. Приплотиковый пласт разубоживается аллювиальными отложениями р. Гонам и становится беднее. Во вскрыше появляются пропластки, обогащённые мелким золотом и характерные для шлейфа выноса.

Типоморфные признаки самородного золота. Нами выполнено изучение типоморфных признаков самородного золота с использованием электронной микроскопии. Цель исследований – определение формационной принадлежности его коренных источников. При классификации и интерпретации типоморфных признаков применялась методика, рекомендованная ЦНИГРИ [3].

Задача полевого опробования осложнялась тем, что основная часть целиковых россыпей уже отработана. Шлиховое опробование проводилось по сохранившимся целикам в забоях отработанных карьеров, в стенках нагорных канав. Пробы объёмом 0,05 м³ промывались лотком до черного шлиха, из которого золото извлекалось и исследовалось под бинокулярным микроскопом в лаборатории ИЗК. На всём протяжении долинной россыпи ручья Юрского промыто 126 шлиховых проб.

Для изучения гранулометрического состава и морфологии зёрен были составлены 8 групповых

проб, характеризующих отдельные участки долины. Групповые пробы были рассеяны на стандартном наборе сит. В результате минералогических исследований было установлено, что характерной особенностью золота долинной россыпи руч. Юрского является высокое содержание золотин мелких и весьма мелких классов (-1 мм).

На верхнем и среднем участках доля мелкого и тонкого золота составляет 63%, а крупного и весьма крупного – 21,1%. Встречаются и отдельные самородки весом до 5 и более граммов. Во всех классах зёрна золота относятся к гемидиоморфному морфологическому типу. Преобладают дендроиды, досковидные, столбчатые, брусковидные формы с небольшим количеством лепёшковидных золотин в крупных классах (рис. 4, А). Отдельные золотины имеют моховидную поверхность из-за нарастающего на золотину нового золота. Цвет золота – жёлтый и светло-жёлтый. Окатанность – от слабой до средней. Встречаются слабоокатанные кристаллы октаэдрического габитуса, лишь слегка деформированные.

На нижнем и приустьевом участках доля мелкого и тонкого золота увеличивается до 82%, а крупного (+2 мм) уменьшается до 0,6%. Цвет зёрен – золотисто-жёлтый и оранжево-жёлтый. Встречаются зёрна с зеленоватым и медно-красными оттенками. Блеск – типичный металлический. Преобладающие формы золотин – плоские зёрна кристаллического облика, чешуйки или тонкие пластинки с загнутыми краями (см. рис. 4, Б). Реже распространены зёрна пластинчатой, крючковидной или проволочковидной формы. Довольно часто на зёрнах отмечаются пальцеобразные выступы кристаллического облика.

Поверхность зёрен в основном неровная, ячеистая с мелкими ямками и углублениями. Отмечаются сростки золота с кварцем серовато-белого цвета тонкозернистой структуры. Реже встречаются сростки с халцедоном. Единичные золотины образуют *сростки с мусковитом и роговой обманкой*. Первичная форма золотин диагностируется как трещинно-прожилковая, реже – цементационная. Окатанное золото составляет около 4%, полуокатанное – 53%, слабоокатанное и неокатанное – 43%. Некоторые золотины имеют «рубашку» из глинистых минералов и гидроокислов.

Для изучения вещественного состава и внутреннего строения зёрен на электронном микроскопе из каждой групповой пробы были отобраны 40–70 зёрен золота, характеризующих все классы



Рис. 4. Самородное золото долинной россыпи руч. Юрского (общий вид):

А – на среднем и Б – на нижнем участках долины

крупности и формы золотин. Эти зёрна сначала были сканированы, затем запрессованы в шашки из эпоксидной смолы и пришлифованы.

Исследование вещественного состава золота производилось в ЦКП Изотопно-геохимических исследований Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН на сканирующем электроном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMH в режиме обратно-рассеянных электронов. Определение элементного состава выполнено на искусственных аншлифах при ускоряющем напряжении (HV) 20 Кэв, рабочем расстоянии (WD) 15 мм с помощью системы энергодисперсионного микроанализа (СЭМ-ЭДС) Ultim Max 40. Данные были обработаны при помощи AztecLive. В результате электронно-микроскопических исследований в долинной россыпи ручья Юрского установлены два типа самородного золота:

I тип – высокопробное золото с вростками минералов из докембрийских диафторитов и корочками гипергенных минералов (рис. 5);

II тип — средне-низкопробное золото в сростках с мелкозернистым агрегатом низкотемпературной минеральной ассоциации аргиллизитового типа (рис. 6).

Высокопробное золото I типа по гранулометрическому составу мелкое (40,7%), весьма мелкое и тонкое (41,9%), при незначительном содержании среднего (10,5%) и крупного 6,9 (2,6%) (табл. 1). Встречаются самородки весом до 38 г (по данным разведки). Преобладают золотины в виде тонких пластин и листочков (чешуйки) по форме изометричные или слегка вытянутые в отношении 1:2, с неровными зазубренными краями. Более крупные пластины, как правило, причудливо изогнуты. Поверхность зёрен – сглаженная с ячеистыми углублениями (см. рис. 5). Для большого числа зёрен всех классов крупности диагностируется первичная трещинно-прожилковая форма золотин.

Средне- и хорошоокатанное золото составляет около 57%, полуокатанное – 40%, слабоокатанное и неокатанное – 3%. Цвет золота золотистожёлтый и соломенно-жёлтый. Отмечается значительное количество золотин в «рубашке» из опаловидного кварца, гидроокислов и глинистых минералов.

В корочках гипергенных минералов содержатся мелкие обломки зёрен эндогенных минералов: эпидота, мусковита, амфибола, плагиоклаза, кварца 1 – неокисленных частиц из дезинтегрированных диафторитов. На некоторых зёрнах золота I типа отмечаются корочки гипергенного пирита (см. рис. 5, В). По-видимому, они сформировались в закисной обстановке на нижних горизонтах кор выветривания.



Рис. 5. Самородное золото I типа:

А – зерно средней окатанности с корочками гипергенных минералов; Б – зерно золота с вростками кварца закрытого типа (результаты замеров: 1 – Au 929 ‰, 2 – кварц 1, 3 – кварц 1, 4 – Au 923 ‰, 5 – кварц 1, 6 – Au 900 ‰); В – зерно высокопробного золота, покрытое корочкой гипергенных минералов с микровключениями золота и вростками эпидота (результаты замеров: 1 – Au 1000 ‰, 2 – Au 1000 ‰, 3 – кварц 2, 4 – эпидот, 5 – эпидот, 6 – каолинит, 7 – Au 993 ‰); Г – зерно золота с корочкой пирита (результаты замеров: 1 – Au 941 ‰, 2 – Au 941 ‰, 3 – пирит, 5 – пирит, 6 – пирит, 6 – пирит (с Au 18,62 %), 7 – Au 945 ‰); Д – зерно высокопробного золота с губчатыми участками золото-оксидного состава (результаты замеров: 1 – Au 955 ‰, 2 – Au 916 ‰, 3 – Au 915 ‰, 4 – Au 928 ‰); Е – зерно высокопробного золота, покрытое корочкой гипергенных минералов с микровключениями золота и золотоносных оксидов (результаты замеров: 1 – Au 909 ‰, 2 – Au 988 ‰, 3 – Au 902 ‰, 4 – Au 995 ‰, 5 – каолинит (с Au 2,07 %), 6 – оксид (с Au 0,34 %) , 7 – оксид (с Au 76,75 %, Ag 7,33 %), 8 – оксид (с Au 77,29 %, Ag 5,81 %), 9 – оксид (с Au 0,48 %), 10 – оксид (с Au 1,03 %), 11 – Au 994 ‰, 12 – Au 984 ‰)

Отечественная геология, № 4 / 2024



Рис. 6. Самородное золото II типа:

А – зерно среднепробного золота средней окатанности с межзерновыми прожилками и высокопробной оболочкой; Б – зерно золота в сростании с мелкозернистым пирит-калишпат-альбитовым агрегатом (результаты замеров: 1 – пирит, 2 – альбит, 3 – калиевый полевой шпат, 4 – Au 984 ‰, 5 – Au 877 ‰, 6 – Au 986 ‰, 7 – Au 876 ‰); В – зерно золота с межзерновыми высокопробными прожилками и секущим каолинит-гидрослюдистым прожилком (результаты замеров: 1 – Au 871 ‰, 2 – Au 869 ‰, 3 – каолинит, 4 – гидрослюда, 5 – Au 987 ‰); Г – зерно золота с секущим прожилком каолинита (результаты замеров: 1 – Au 761 ‰, 2 – Au 786 ‰, 3 – Au 941 ‰, 4 – Au 967 ‰, 5 – Au 773 ‰, 6 – Au 971 ‰, 7 – каолинит); Д – зерно среднепробного золота с вростками кристаллов пирита (результаты замеров: 1 – Au 834 ‰, 2 – Au 989 ‰, 3 – пирит, 4 – пирит (с Au 14 %, Ag 2,21 %, Ni 0,44 %), 5 – Au 836 ‰, 6 – Au 834 ‰); Е – зерно низкопробного золота таблитчатой формы с межзерновыми высокопробными прожилками и высокопробной оторочкой, с признаками дезинтеграции (результаты замеров: 1 – Au 574 ‰, 2 – Au 591 ‰, 3 – Au 987 ‰, 4 – Au 960 ‰, 5 – Au 980 ‰, 6 – Au 930 ‰, 7 – Au 582 ‰, 8 – Au 694 ‰)

Ŧ
у.
á
Z
۲,
ö
ŏ
<u>р</u>
ő
Ŧ
Ż
5
ĕ
8
та
ē
5
m
5
오
đ
ğ
0
S
ö
ž
1ai
μ.
Ы
E
e
운
ē
9
ž
2
И
Η.
Ĺ.
5
a

5	Морфология	Поверхность	Окатанность	Пробность І тип	Элементы- примеси	Сростки	Включения	Внутрениее строение
Тонкопл чеши крючу проволо В крупп лепёц Перви пром пром	астинчатое, уйчатое, ковидное, очковидное. ных зёрнах – иковидное. нная форма т трещинно- килковая	Сглаженная, с ячеистыми углублениями	От слабоока- танного до средне- и хорошо окатанного	895–950 %0 – 43 % 950–995 %0 – 57 % Средняя 953 %0	Исследования СЭМ-ЭДС: Аg cp. 4,56 % В ед. зёрнах Pt до 2,58 %, Nb до 3,63 %	Сростки с бельым полупроз- рачным кварцем, эпидотом, мусковитом, амфиболом, цирконом. Корочки гипергенных минералов	Встречаются включения гранули- рованного кварца	Монозернистое с прерывистыми высокопробными оторочками, реже – каркасное и ячеистое с вростками эндогенных минералов закрытого типа
				II тип				
Плас табл гемиид реже де Первич прож цемен	тинчатое, илчатое, иоморфное, ндроидное. ндая форма г трещинно- илковая и тационная	Неровная, шагреневая, микробу- горчатая, ямчатая	От слабоока- танного и полуока- танного до среднеока- танного	900–939 ‰ – 11 % 800–899 ‰ – 71 % 700–799 ‰ – 15 % 574–699 ‰ – 3 % Средняя 848 ‰	Исследования СЭМ-ЭДС: Аg _{tp} 14,90 % В ел. зернах: Нg до 3,16 %, Fe до 0,38 %, Fe до 0,36 %, Ti до 0,26 %, Si до 0,71 %, Al до 0,55 %	Гнёзда и прожилки из агрегата, состоящего видного кварца, пирита, альбита, калишпата, эпидота, каолинита	Встречаются включения пирита	Характерны межзерновые прожилки петельчатого строения и высокопробные оторочки. Встречаются признаки дезинтеграции зёрен

В зёрнах золота I типа встречаются вростки эндогенных минералов – кварца 1, плагиоклаза, циркона, амфибола, – образовавшихся в диафторитах. Подобные вростки закрытого типа характерны для древнего метаморфогенно-гидротермального оруденения в диафторитах.

В срастаниях с золотом выделяется кварц двух типов. Кварц 1 серовато-белый или бесцветный, полупрозрачный, в виде сростков или включений закрытого типа. Иногда включения кварца имеют форму огранённых кристаллов размерами 10–20 мкм (см. рис. 5, Б). Этот кварц эндогенный, скорее всего, древний, архейский или раннепротерозойский. Кварц 2 опаловидный, образующий на зёрнах золота пёстрые корочки гипергенного происхождения совместно с каолинитом и оксидами металлов (см. рис. 5, А, В). Скорее всего, он имеет палеогеновый возраст с учётом времени формирования кор выветривания в данном регионе.

Пробность золота I типа колеблется в пределах 895–995 ‰ с модальным значением в интервале 943–958 ‰ (рис. 7). Среднее значение пробности, оценённое как среднеарифметическое, равно 953 ‰ (см. табл. 1). Кроме Ag со средним содержанием 4,56 %, в единичных зёрнах установлены значимые содержания Pt (до 2,58 %) и Nb (до 3,63 %). В кварце I и других эндогенных минералах-вростках не установлены примеси золота и его элементов-спутников (табл. 2).

В гипергенных минералах спектр элементовпримесей более широкий. В кварце II установлены повышенные содержания Au (0,52%), Fe (0,41%), Ti (0,26%), Al (1,7%), Ca (0,11%), в каолините – Au (0,31%), Fe (2,48%), Ti (0,28%), Ba (до 0,41%), в оксидах – Au (0,61%), Zn (0,31%), Fe (16,67%), Ti (4,32%), V (0,3%), Ba (до 0,72%), P (до 0,46%), в пирите – Au (до 20,27%), Co (до 0,29%) (см. табл. 2).

В мелкозернистом агрегате гипергенных минералов содержатся микровключения вторичного золота размером менее 1 мкм (см. рис. 5, В, Е). Известно, что новообразование наночастиц золота в корах выветривания происходит за счёт разложения сульфидов и других неустойчивых соединений, содержащих золото [2].

Зёрна золота I типа в краевых частях и вдоль трещин содержат участки губчатого строения размером 10–15 мкм (см. рис. 5, Д). Эти участки с расплывчатыми границами состоят из мельчайших сростков высокопробного золота с оксидами Fe, Ti, Mn, V. Подобные образования вторичного золота формируются в зонах гипергенеза [3].

Судя по типоморфным признакам, высокопробное золото I типа представляет собой «докембрийское» золото, хорошо изученное и описанное 3.С. Никифоровой на востоке Сибирской платформы [1]. Оно образуется за счёт окисления золотосодержащих минералов архейских зеленокаменных пород в зонах тектонического меланжа. В процессе раннепротерозойского динамометаморфизма вторичное золото полностью перекристаллизовывается, очищается от примесей и превращается в весьма высокопробное золото, рассеянное в диафторитах. В нашем случае этот процесс подтверждается вростками в золоте I типа дорудных эндогенных минералов - кварца 1, амфибола, плагиоклаза, циркона, эпидота, - характерных для докембрийских диафторитов. Таким образом, золото I типа представляет собой остаточное золото, поступившее в россыпь из докембрийских диафторитов и из трещинных кор выветривания, развитых в диафторитах вдоль тектонических нарушений.

Доля золота I типа в целом по россыпи составляет 42%. Оно распространено на всём протяжении долины руч. Юрского, но наиболее широко представлено на нижнем участке, где плотиком россыпи служат тектонизированные диафториты с трещинной корой выветривания. Его доля здесь превышает 70%.

Следует отметить, что на нижнем участке долины руч. Юрского золото мелкое, тонкопластинчатое средней и хорошей окатанности (см. рис. 4, Б). Однако в левом борту долины в районе устья руч. Длинного, под современными аллювиальными отложениями, установлен древний тальвег, выполненный переотложенной корой выветривания с ураганными содержаниями золота (см. рис. 3). Этот тальвег фактически является древним руслом руч. Длинного, а ураганные содержания золота – обусловленными наличием крупных зёрен и самородков золота рудного облика весом до 8 г.

К моменту проведения наших работ участок тальвега был полностью отработан и затоплен на дне водоёма-отстойника. Отобрать пробы и изучить типоморфные особенности крупного золота и самородков нам не удалось. Судя по высокой пробности золота на этом участке (порядка 950‰, по данным разведки), золото и самородки в пробах с ураганными содержаниями также можно отнести к I типу.





[574, 608] [608, 642] (642, 676] (676, 710] (710, 744] (744, 778] (778, 812] (812, 846] (846, 880] (880, 914] (914, 948] Пробность, ‰



Общая (тип I+II тип)

Рис. 7. Гистограммы распределения пробности самородного золота различных типов по частоте встречаемости

Табл 2. Химический состав самородного золота различных типов и сросшихся с ним минералов в россыпи ручья Юрского

	0		(0,79)	41,7	50,04	53,71	36,77	4,63	41,97		(0,91)	40,59	49,73	(4,38)	41,41	
			I	0,15	I	I	0,26	48,54	I		I	(0,21)	I	50,84	I	
	Ч		I	I	I	I	(0,46)	I	I		I	I	I	I	I	
	Te		I	I	I	I	I	I	I		(0,38)	I	I	I	I	
	Νb		(3,63)	I	I	I	I	I	I		I	I	I	I	I	
	Hg		I	I	I	I	I	I	I		(3,16)	I	I	I	I	
	Pt		(2,58)	I	I	I	I	I	I		(3,03)	I	I	I	I	
	Ag		4,56	I	I	I	(0,21)	I	I		14,9	1,22		(2,34)	I	-
3, %	Au		95,3	0,31	0,04	0,52	0,61	(20,27)	I		84,9	2,32	(1,52)	[14,47]	I	MM.
ментон			I	I	I	I	(0,3)		I		I	I	I		I	еления
ия эле	Zn	I	I	I	I	I	(0,31)	I	I	П	I	I	I	I	I	и опред
ржанı	Ż	Тип	I	I	I	I	I	I	I	Тип	I	I	I	0,38	I	MIBIMI
че соде	Co		I	I	I	I	I	(0,31)	I		I	I	I	0,37	I	ии знач
Средни	Ba		I	(0,41)	I		(0,72)	I	I		I	I	I	I	I	ланрин
	K		I	0,83	I	(0,1)	2,23	I	I			0,202	I	I	I	и с ели
			I	0,21	I	0,11	0,33	(0,1)	16,08			0,24	I	I	15,66	Юоркал
	Mg		I	0,61	I	(0,22)	(3,72)					(1,19)	I	I	I	IN DO BI
	Mn		I	I	I	I	I	I	0,17		I	I	I	I	0,14	спжан
	Fe		I	2,48	I	0,41	16,67	42,43	5,92		(0,36)	2,91	(0,23)	44,29	8,33	ble con
			I	I	I		0,205	I	(0,12)		I	I	I	Ι	I	имальн
	VI		I	16,59	I	1,70	8,35	(0,67)	14,3		(0,55)	16,07	0,31	(0,12)	13,1	HbI Makc
	H		I	0,28	I	0,26	4,32	I	I		(0,26)	0,36	I	Ι	I	телен
	Si		I	20,18	45,72	44,7	16,69	(1,1)	17,48		(0,71)	18,7	45,12	(0,21)	17,15	обках ш
ыляд	эниМ		Золото	Каолинит	Кварц 1	Кварц 2	Оксид	Пирит	Эпидот		Золото	Каолинит	Кварц халц.	Пирит	Эпидот	чание. В ско
еров сло	иН омве		163	12	11	4	11	7	9		216	9	S	8	5	Приме

Золото II типа мелкое (43,8%) и среднее (33,5%) по размерам при значительном содержании весьма мелкого и тонкого (20,1%). Крупных зёрен мало (2,6%) (см. табл. 1).

Во всех фракциях зёрна имеют пластинчатую, таблитчатую, гемиидиоморфную, реже дендроидную формы с небольшим количеством лепёшковидных золотин в крупных классах. Нередко отмечаются слабоокатанные кристаллы октаэдрического габитуса, лишь слегка деформированные. Первичная форма золотин трещинно-прожилковая и цементационная.

Окатанность зёрен от слабой до средней. Чем мельче золото, тем больше встречается кристаллов слабой окатанности. Чешуйчатого или хорошо окатанного золота мелких классов нет. Поверхность зёрен в основном неровная, бугорчатая, шероховатая с мелкими ямками и углублениями (см. рис. 6, А).

Встречаются зёрна слабоокатанные, дендритовидные в срастаниях с мелкозернистым минеральным агрегатом, выполняющим гнёзда и тонкие извилистые прожилки в зёрнах золота (рис. 6, Б, В, Г). В составе этого агрегата установлены халцедоновидный кварц, пирит, альбит, калишпат, каолинит. Пирит иногда образует самостоятельные идиоморфные вростки в центральной части зёрен (см. рис. 6, Д).

Пробность золота II типа колеблется в пределах 744–914‰ с модальным значением в интервале 846–880‰ (рис. 7). Судя по гистограмме на рис. 7, встречаются отдельные зёрна II типа с более низкой пробностью (до 574‰), но они являются редкими исключениями из общего ряда. Высокая пробность некоторых зёрен (интервал 914–948‰) объясняется влиянием гипергенных изменений, которое не удалось полностью исключить при производстве замеров. При сравнении гистограмм I и II типов видно, что они частично перекрываются в интервале 895–914‰, поэтому на сводной гистограмме два модальных значения слабо различимы (рис. 7).

Из элементов-примесей в золоте II типа установлены Ag (14,90%), Hg (до 3,16%), Te (до 0,38%), Pt (до 3,03%), Fe (0,36%), Ti (0,26%), Si (до 0,71%), Al (до 0,55%) (см. табл. 2). В каолините установлены повышенные содержания Au (2,32%), Ag (1,22%), Fe (2,91%), Ti (0,36%), в кварце – Au (до 1,52%), Fe (до 0,23%), Al (0,31%), в пирите – Au (до 14,47%), Ag (до 2,34%), Co (0,37%), Ni (0,38%). Повышенные содержания Au и Ag в минералах-сростках, таких как кварц, пирит, каолин, позволяют включить эти минералы в состав продуктивной ассоциации, характерной для низкотемпературных метасоматитов – аргиллизитов.

В зёрнах золота II типа установлены признаки гипергенных преобразований – межзерновые высокопробные прожилки и высокопробные оболочки изменчивой мощности. Межзерновые прожилки имеют петельчатые интергранулярные формы толщиной 1–10 мкм (см. рис. 6, Г, Е). В некоторых зёрнах заметны признаки дезинтеграции – в межзерновых прожилках появляются частицы гидроокислов и других аутигенных минералов (см. рис. 6, Е). По данным ЦНИГРИ, подобные преобразования зёрен золота характерны для палеороссыпей [3].

Доля золота II типа в целом по россыпи руч. Юрского составляет около 60%. Оно распространено на всём протяжении долины, но наиболее широко представлено на её верхнем и среднем участках, там, где плотик россыпи сложен песчано-конгломератовой толщей нижнего мела, прорванной многочисленными дайками джемериканского комплекса. Здесь доля золота II типа достигает 75%.

Обсуждение результатов и заключение. Высокопробное золото I типа характеризуется тесными срастаниями с эндогенными минералами, характерными для диафторитов: кварцем 1, плагиоклазом, амфиболом, цирконом, эпидотом. Оно распространено на всём протяжении долины руч. Юрского, но наиболее широко представлено на нижнем участке, где плотиком россыпи служат диафторированные породы основного состава. На верхний и средний участки долины золото I типа выносится левыми притоками ручья Юрского, эродирующими диафториты Джигдалинской зоны.

Для золота I типа характерно преобладание мелкого, весьма мелкого и тонкого золота (82,6%) в сочетании с довольно значительным содержанием крупного золота и самородков (6,9%). Источником крупного золота служат кварцевые жилы, изредка встречающиеся в диафторитах.

В левом борту долины руч. Юрского, под современным аллювием установлен древний тальвег ручья Длинного с ураганными содержаниями крупного высокопробного золота. Источником подобного золота обычно служат крупные кварцевые жилы или жильно-прожилковые зоны [3]. Они могут представлять промышленный интерес. Судя по слабой окатанности и рудному облику золотин, источник расположен в пределах ближнего сноса. Поскольку в плотике россыпи такие жилы не установлены, они могут быть расположены на прилегающем левом борту долины ручья Юрского, на стрелке с руч. Длинным.

Богатый промышленный пласт в погребённом древнем тальвеге руч. Длинного сложен в основном переотложенной корой выветривания трещинного типа. О развитии кор выветривания, обогащённых золотом, свидетельствует и наличие в россыпи золотин I типа в «рубашке» из гипергенных минералов. Золотоносные коры выветривания также представляют поисковый интерес.

Средне-низкопробное золото II типа представляет собой остаточное золото низкотемпературного гидротермального генезиса. На это указывают его чрезвычайно изменчивая пробность (от 574 до 914‰), характерный спектр элементов-примесей (Ag, Hg, Te) и состав продуктивной минеральной ассоциации аргиллизитового типа, реконструируемый по характерным минеральным срастаниям. Внутреннее строение зёрен с хорошо развитыми межзерновыми высокопробными прожилками и высокопробными коррозионными оболочками свидетельствует о длительном гипергенном преобразовании золота II типа.

Первичный источник низкотемпературного золота не совсем ясен. Типоморфные признаки золота II типа в основном соответствуют самородному золоту россыпей, описанных С. В. Яблоковой в районе золото-серебряного месторождения Многовершинное [5]. Геологическое строение района и приуроченность Юрского месторождения к молодой вулкано-тектонической структуре в целом благоприятны для оруденения подобного типа. Но прямые поисковые признаки золото-серебряных руд в бассейне руч. Юрского не установлены. Косвенные признаки, такие как глыбы халцедоновидного кварца, редкие знаки киновари и галенита в шлиховых пробах, распространены, особенно в верхней части долины.

Ещё одним потенциальным источником золота II типа могут служить палеороссыпи в песчаноконгломератовой толще ундытканской свиты. По мнению Л. А. Николаевой, при глубоких преобразованиях палеороссыпей, сопровождавшихся тепловым воздействием, возможно наложение низкотемпературной золото-серебряной минерализации [3]. Такой процесс возможен и в песчано-конгломератовой толще ундытканской свиты, испытавшей интенсивное тепловое воздействие субвулканических интрузий джемериканского комплекса и вышезалегающих эффузивов карауловской свиты.

В любом случае в районе Юрского месторождения имеются определённые перспективы на выявление промышленно значимых рудных объектов золото-кварцевого, золото-серебряного типа, золотоносных кор выветривания или палеороссыпей. Учитывая пологосклонный денудационный рельеф участка, сильную задернованность и заболоченность его поверхности, рекомендуется провести здесь полноценные поисковые работы с геофизикой, проходкой траншей мехспособом и бурением поисковых скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Никифорова З. С.* Перспективы золотоносности востока Сибирской платформы // Наука и образование. 2016. № 4. С. 25–34.
- Никифорова З. С., Калинин Ю. А., Макаров В. А. Эволюция самородного золота в экзогенных условиях // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61, № 11. – С. 1514–1534.
- 3. *Николаева Л. А., Яблокова С. В.* Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах // Руды и металлы. – 2007. – № 6. – С. 41–57.
- Петрук Н. Н., Шилова М. Н., Козлов С. А. [и др.] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-51 (Сковородино). Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. – 448 с.
- Яблокова С. В., Самосоров Г. Г., Позднякова Н. Н. Типоморфные особенности золота как критерии связи россыпей с коренными источниками золотосеребряного типа (на примере рудно-россыпного узла Многовершинное) // Отечественная геология. – 2020. – № 4–5. – С. 24–38.
- Donskaya T. V. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleo proterozoic granitoids // Precambrian Research. – 2020. – V. 348. – P. 105869.

REFERENCES

- Nikiforova Z. S. Perspektivy zolotonosnosti vostoka Sibirskoy platformy [Prospects for gold content in the east of the Siberian Platform], Nauka i obrazovaniye, 2016, No. 4, pp. 25–34. (In Russ.)
- Nikiforova Z. S., Kalinin Yu. A., Makarov V. A. Evolyutsiya samorodnogo zolota v ekzogennykh usloviyakh [Evolution of native gold under exogenous conditions], Geologiya i geofizika, 2020, V. 61, No. 11, pp. 1514– 1534. (In Russ.)
- Nikolayeva L. A., Yablokova S. V. Tipomorfnyye osobennosti samorodnogo zolota i ikh ispol'zovaniye pri geologorazvedochnykh rabotakh [Typomorphic features of native gold and their use in geological exploration], Rudy i metally [Ores and Metals], 2007, No. 6, pp. 41–57. (In Russ.)
- 4. *Petruk N. N., Shilova M. N., Kozlov S. A.* [et al.] Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy

Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Dal'nevostochnaya. List N-51 (Skovorodino). Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (third generation). Far Eastern series. Sheet N-51 (Skovorodino). Explanatory note], St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI publ., 2009, 448 p. (In Russ.)

- Yablokova S. V., Samosorov G. G., Pozdnyakova N. N. Tipomorfnyye osobennosti zolota kak kriterii svyazi rossypey s korennymi istochnikami zoloto-serebryanogo tipa (na primere rudno-rossypnogo uzla Mnogovershinnoye) [Typomorphic features of gold as criteria for the connection of placers with primary sources of the gold-silver type (using the example of the Mnogovershinnoe ore-placer cluster)], Otechestvennaya geologiya [Domestic Geology], 2020, No. 4–5, pp. 24–38. (In Russ.)
- Donskaya T. V. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleo proterozoic granitoids, Precambrian Research, 2020, V. 348, pp. 105869.

Статья поступила в редакцию 18.04.24; одобрена после рецензирования 24.07.24; принята к публикации 25.07.24. The article was submitted 18.04.24; approved after reviewing 24.07.24; accepted for publication 25.07.24.

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.

DOI:10.47765/0869-7175-2024-10020

УДК 620.187(550.841) © Г. К. Хачатрян, Н. Е. Анашкина, 2024

Экспрессное определение полиморфных минералов в шлиховых пробах методом ИК-микроскопии (на примере кианита, силлиманита, андалузита)

На примере кианита, силлиманита и андалузита показана информативность ИК-Фурье микроскопии в изучении полиморфизма минералов. Разработана методика диагностики минералов группы кианита под ИК-микроскопом. Полученные данные свидетельствуют о том, что использование ИК-микроскопии позволяет усовершенствовать метод анализа минералов шлиховых проб и способствует повышению эффективности прогнозно-поисковых работ.

Ключевые слова: ИК-Фурье микроскоп, ИК-спектры, волновое число, кианит, андалузит, силлиманит, гидроксильные группы.

ХАЧАТРЯН ГАЛИНА КАРЛЕНОВНА, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, khachatryan_g_k@mail.ru

АНАШКИНА НАТАЛИЯ ЕВГЕНЬЕВНА, кандидат технических наук, научный сотрудник, anashkina@tsnigri.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

Express determination of polymorphic minerals in heavy mineral concentrates with the use of the IR-microscopy technique (the examples of kyanite, sillimanite, and andalusite)

G. K. KHACHATRYAN, N. E. ANASHKINA

Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals" (FSBI "TSNIGRI"), Moscow

Using the examples of kyanite, sillimanite, and andalusite, the Fourier transform infrared microscopy is shown to be highly informative for studying the polymorphism of minerals. A technique has been developed for diagnosing the kyanite group minerals under the IR microscope. The data obtained confirm that the use of IR microscopy makes it possible to improve the method of analyzing minerals in heavy mineral concentrates and facilitates increasing the forecasting and prospecting efficiency.

Key words: FTIR microscope, IR spectra, wave number, kyanite, and alusite, sillimanite, hydroxyl groups.

Благодаря своей информативности, экспрессности и простоте исследования прозрачных минералов ИК-микроскопия является одним из самых перспективных методов, используемых в поисковой минералогии [4]. Вместе с тем на практике применение ИК-микроскопа в минералогических исследованиях затруднено из-за отсутствия в литературе эталонных спектров индивидуальных зёрен большинства минералов, случайно ориентированных по отношению к источнику излучения. Решить эту проблему можно на основе создания собственной библиотеки эталонных спектров разнообразных минералов и разработки методических приёмов их анализа под ИК-микроскопом [3, 5].

Минералы группы кианита – кианит, силлиманит и андалузит – представляют собой полиморфные модификации Al₂SiO₅, структура которых зависит от термодинамических условий кристаллизации. В связи с этим минералы группы кианита представляют интерес для геотермобарометрии. Они часто образуются при региональном метаморфизме и служат индикаторами термодинамических условий процесса. Силлиманит и андалузит также встречаются в контактовометаморфических и в изменённых эффузивных породах.

Кианит преимущественно кристаллизуется при высоких давлениях на значительных глубинах в земной коре и верхней мантии. Он распространён в кристаллических глинистых сланцах, гнейсах, гранулитах и эклогитах. Кроме того, кианит встречается в телах кимберлитов в составе содержащихся в них эклогитовых ксенолитов, а также иногда присутствует в виде включений в кристаллах алмаза, что позволяет рассматривать этот минерал в качестве индикатора условий алмазообразования. Благодаря своей химической устойчивости и относительной прочности кианит может накапливаться в россыпях.

Образцы и методика эксперимента. Исследования индивидуальных зёрен минералов группы кианита проводились с помощью ИК-Фурье спектрометра Nicolet 380 и ИК-Фурье микроскопа Сепtaurus компании THERMO Scientific в диапазоне 650–4000 см⁻¹. Особенности методики эксперимента описаны в работе [4]. Спектры порошковых препаратов (иммерсионная среда – KBr) записывались в области 400–4000 см⁻¹ на том же спектрометре с использованием приставки Smart Diffuse Reflectance.

С помощью ИК-микроскопа были изучены мелкие кристаллы и зёрна кианита (18 образцов), андалузита (8 образцов) и силлиманита (6 образцов) из коллекции минералов отдела минералогии и изотопной геохимии ЦНИГРИ. Предварительно идентификация этих минералов осуществлялась по ИК-спектрам порошковых препаратов на основе электронной библиотеки спектров HR Minerals, входящей в программное обеспечение спектрометра Nicolet 380.

Номера изученных образцов, представленных в таблицах 1–3, содержат информацию о местах отбора проб: Бо – Бодайбо, Ир – Иркутская область, Кп – Кольский полуостров, О – Осетия, С – Салаир, СЛ – Сухой Лог, У – Урал, ЮАР – Южная Африка, Я – Якутия.

Особенности химического состава и структуры кианита, андалузита и силлиманита. Минералы группы кианита часто содержат примесь Fe₂O₃ (2–3%). Помимо этого, в андалузите отмечается

примесь марганца, в силлиманите – B_2O_3 и MgO, а в кианите отмечаются примеси Cr_2O_3 и в незначительных количествах CaO, MgO, FeO, TiO₂ [1]. Характерно, что самые высокие содержания Cr_2O_3 (до 10%) зафиксированы в кианите из эклогитовых ксенолитов в кимберлитах.

В структуре силлиманита, кристаллизующегося в ромбической сингонии, группы Al-O образуют цепочки, параллельные кристаллографической оси «с». Эти цепочки состоят из октаэдров AlO₆, каждый из которых связан общими рёбрами с двумя соседними аналогичными октаэдрами. Цепочки соединяются одна с другой атомами кремния и алюминия, находящимися в четверной координации (Si^{IV} и Al^{IV}).

Подобно силлиманиту андалузит относится к ромбической сингонии. В его структуре также имеются AlO₆-цепочки, однако они связываются чередующимися атомами Si^{IV} и атомами алюминия в пятерной координации (Al^V).

Кианит в отличие от силлиманита и андалузита принадлежит к триклинной сингонии. В структуре кианита цепочки из AlO_6 октаэдров, подобные рассмотренным выше, соединяются между собой атомами кремния Si^{IV} и атомами алюминия в шестерной координации (Al^{VI}).

Разная координация алюминия в минералах группы кианита отражается на длинах связей Al-O, которые составляют: для Al^{IV} (силлиманит) – 1,77 Å, для Al^V (андалузит) – 1,84 Å, для Al^{VI} (андалузит, силлиманит, кианит) – 1,90– 1,91 Å. Эти структурные особенности минералов группы кианита в значительной мере определяют различие их ИК-спектров.

ИК-спектроскопия. Метод ИК-спектроскопии позволяет исследовать не только химический состав минералов, но и особенности их кристаллической структуры. Это является одним из преимуществ данного метода по сравнению с химическим и микрорентгеноспектральным видами анализа.

ИК-спектры кианита, андалузита и силлиманита обусловлены разнообразными колебаниями групп атомов в Si-O-тетраэдрах и Al-O-полиэдрах с координационными числами 6, 5 и 4. Структурные особенности полиморфных модификаций Al_2SiO_5 чётко проявляются в ИК-спектрах, представленных в электронной библиотеке HR Minerals, что служит основой для надёжной идентификации минералов группы кианита. Спектры из этой библиотеки получены с помощью стандартной пробоподготовки (так называемый



Рис. 1. ИК-спектры кианита из библиотеки спектров HR Minerals (А) и индивидуального зерна (Б):

v – валентные колебания

«порошковый» метод), основанной на растирании исследуемых образцов до тонкодисперсного состояния с размером частиц ≤ 2 мкм [2]. Наиболее простой ИК-спектр наблюдается у кианита (рис. 1, А). Характеристическими линиями спектра являются максимумы поглощения в диапазоне 900–1100 см⁻¹, обусловленные валентными Si-Oколебаниями [12].



Рис. 2. ИК-спектры андалузита из библиотеки спектров HR Minerals (А) и индивидуального зерна (Б):

 ν и δ – соответственно валентные и деформационные колебания

В отличие от кианита, в котором координационное число Al равно 6, андалузит является единственным минералом, содержащим Al в пятерной координации. Следствием этого являются относительное усложнение «порошкового» спектра андалузита (рис. 2, A) и появление линий, обусловленных колебаниями Al^v-O, например, 737 см⁻¹ [6].

По форме «порошковый» спектр силлиманита (рис. 3, А) отличается от спектров кианита и андалузита присутствием интенсивной линии около 1180 см⁻¹, обусловленной валентными Si-O-колебаниями.

В спектрах случайно ориентированных индивидуальных зёрен минералов группы кианита, записанных под ИК-микроскопом, наиболее характерными линиями являются обертоны валентных колебаний Si-O и Al-O в алюмокремниевых тетраэдрах. Указанные спектральные линии проявляются в интервале 1650–2020 см⁻¹ и, как будет показано ниже, важны для идентификации кианита, андалузита и силлиманита под ИК-микроскопом.

Поляризованные ИК-спектры плоскопараллельных пластин, изготовленных из кристаллов кианита, андалузита и силлиманита, свидетельствуют о наличии структурных ОН-групп в этих номинально безводных минералах [8, 9, 11, 13]. Линии гидроксила проявлены в спектрах минералов группы кианита в области 3200–3700 см⁻¹. Происхождение этих структурных дефектов обычно связывают с изоморфными замещениями атомов в кристаллической решётке кианита, силлиманита и андалузита, однако единой точки зрения по этому вопросу в настоящее время нет.

Волновые числа, интенсивности и количество соответствующих полос поглощения в спектрах каждой из полиморфных модификаций Al₂SiO₅ зависят от её генезиса, температуры отжига и ориентации колебаний ОН-групп в структуре минерала [8, 11, 13]. В этом плане гидроксильные группы в кианите, силлиманите и андалузите могут рассматриваться в качестве их типоморфных характеристик. Как видно на рисунке (рис. 4, А), в области колебаний гидроксильных групп поляризованные спектры кианита обнаруживают систему узких линий ~ 3275, 3386, 3410 и 3440 см⁻¹. При этом кианит из эклогитового ксенолита в кимберлитах трубки Робертс Виктор (ЮАР) отличается от кианита из высокометаморфизованных голубых сланцев Дора Майра (Италия) по соотношению интенсивностей указанных пиков. Кроме того, в спектре кианита из метаморфических пород дополнительно присутствуют линии небольшой интенсивности ~ 3260 и 3505 см⁻¹.



Рис. 3. ИК-спектры силлиманита из библиотеки спектров HR Minerals (А) и индивидуального зерна (Б):

 ν и δ – соответственно валентные и деформационные колебания



Рис. 4. Поляризованные ИК-спектры поглощения кианита (А), андалузита (Б) на срезах в плоскости (100) и силлиманита (В) на срезе в плоскости (010). По данным работ [8, 11, 13]:

1-2 – спектры кианита соответственно из трубки Робертс Виктор (ЮАР) и метаморфических пород Дора Майра (Италия); 3-5 – поляризованные в разных направлениях спектры андалузита; 6-7 – спектры силлиманита при температурах соответственно 20 и 1040 °C; Е – вектор напряжённости электрического поля; а, b, с – оси кристаллической решётки андалузита; Е∥а, Е∥b, Е∥с – направления поляризации

В отличие от кианита спектр андалузита в области колебаний гидроксильных групп более сложен и смещён в область больших волновых чисел 3400-3700 см⁻¹ [13]. Он представлен пятью главными линиями 3437, 3461, 3527, 3598, 3654 см⁻¹, а также двумя пиками с меньшей интенсивностью: 3480 и 3516 см⁻¹ (см. рис. 4, Б). Все эти линии индивидуальны и могут учитываться при диагностике данного минерала под ИК-микроскопом. Рисунок демонстрирует анизотропию ИК-поглощения минералов группы кианита в области колебаний ОН-групп [7, 9, 13]. На примере андалузита видно, что в зависимости от ориентировки кристалла по отношению к падающему лучу в разных кристаллографических направлениях интенсивность спектральных линий меняется. В случае, когда вектор напряжённости электрического поля направлен вдоль кристаллографической оси «с» (E||c), эти линии практически исчезают (см. рис. 4, Б).

В диапазоне волновых чисел 3200–3700 см⁻¹ в спектрах образцов силлиманита (см. рис. 4, В) присутствует иной набор линий (3247, 3307, 3562 см⁻¹ и др.), чем в спектрах кианита и андалузита. В процессе поэтапного нагревания силлиманита при температуре 800 °С интенсивность пика около 3247 см⁻¹ заметно уменьшается, а при 1040 °С все линии в области 3200–3600 см⁻¹ практически исчезают [9]. Не исключено, что подобный эффект возможен и в природных условиях, например, при прогрессивном региональном метаморфизме пород, содержащих силлиманит.

Помимо структурных гидроксильных групп в силлиманите представляет интерес примесь бора. По данным работы [10], структурные ВО₃-группы иногда проявляются в ИК-спектрах силлиманита в форме пиков средней интенсивности около 1317–1327 см⁻¹, а также более слабой линии ~ 1372 см⁻¹.

Диагностика под ИК-микроскопом. Для разработки методических приёмов идентификации полиморфных модификаций Al_2SiO_5 с помощью ИК-Фурье микроскопа проводилось сравнительное изучение спектров индивидуальных зёрен андалузита, силлиманита и кианита из разных проб. Выявлялись характерные полосы поглощения, постоянно присутствующие в спектрах каждого из этих минералов, независимо от его внешних признаков, места отбора и особенностей генезиса. Именно эти спектральные линии, которые одновременно являются специфическими для каждого минерала, позволяют диагностировать кианит, андалузит и силлиманит под ИК-микроско-

Интервал			Обра		зцы			
спектра	СЛ-1	СЛ-2	СЛ-3	СЛ-4	Бо-1	0-1	O-2	O-3
660-690	<u>670</u>	<u>670</u>	<u>670</u>	<u>671</u>	<u>672</u>	<u>670,685</u>		<u>670</u>
770–790	<u>783</u>	<u>773,784</u>	<u>792</u>	<u>785</u>	<u>797</u>	<u>785</u>	<u>786</u>	<u>784</u>
920 ± 1	<u>/919/</u>		<u>/920/</u>	<u>/919/</u>	<u>/920/</u>	<u>/920/</u>	<u>/921/</u>	
963 ± 1	<u>964</u>	<u>964</u>	<u>962</u>	<u>964</u>	<u>964</u>	<u>964</u>	<u>962</u>	<u>963</u>
1030-1050			1031			1045	1041	1031
1100-1200	1167	1155	1110	1159		1178		
1260-1280		1267		1274	1277			
1451 ± 1	1450	1450		1451	1450	1452	1451	
1500-1510	1508	1509	1501	1509	1510	1503	1509	
1578 ± 1			1578	1578		1577	1578	
1670–1680	1670	1671	1676	1676	1671	1671	1676	1670
1815 ± 2	<u>1813</u>	<u>1817</u>	<u>1813</u>	<u>1814</u>	<u>1816</u>	<u>1814</u>	<u>1814</u>	<u>1816</u>
1850 ± 3	<u>1850</u>	<u>1848</u>	<u>1850</u>	<u>1853</u>	<u>1849</u>	<u>1850</u>	<u>1853</u>	<u>1852</u>
1900 ± 2	<u>1901</u>		<u>1901</u>	<u>1902</u>	<u>1899</u>	<u>1899</u>	<u>1902</u>	<u>1901</u>
1955 ± 1	<u>1954</u>	<u>1954</u>	<u>1955</u>	<u>1955</u>	<u>1954</u>	<u>1955</u>	<u>1955</u>	<u>1954</u>
2018 ± 2	<u>2019</u>	<u>2017</u>	<u>2019</u>	<u>2020</u>	<u>2016</u>	<u>2019</u>	<u>2020</u>	<u>2019</u>
3273 ± 3	3275	3276			3276			3270
3437	3437		3437					
3461	<u>3461</u>	<u>3461</u>	<u>3461</u>	<u>3461</u>	<u>3461</u>	/3461/	/3461/	/3461/
3527 ± 1	<u>3526</u>	<u>3526</u>	<u>3526</u>	<u>3528</u>	<u>3526</u>	/3526/	/3528/	/3526/
3560-3600	3568		3597	3595		/3597/	/3595/	

Табл. 1. Волновые числа спектров андалузита, по данным ИК-микроскопии

Примечание. Жирным шрифтом показаны пики большой интенсивности, обычным – средней, в скобках – малой; характеристические линии выделены подчёркиванием.

пом. Помимо них в спектрах минералов группы кианита присутствуют и другие полосы поглощения, проявляющиеся спорадически. Они характеризуют специфические особенности конкретного минерального индивида, но не могут использоваться для идентификации минерального вида в целом (в данном случае кианита, андалузита или силлиманита).

Спектральные характеристики (волновые числа и относительные интенсивности пиков) изученных образцов кианита, андалузита и силлиманита приведены на рисунках 1, Б, 2, Б и 3, Б, а также в таблицах 1–3.

В спектрах поглощения андалузита, полученных под ИК-микроскопом, наиболее характерной и воспроизводимой является область обертонов валентных колебаний Si-O в кристаллической решетке этого минерала. Именно спектральные линии, находящиеся в этом диапазоне, наиболее интенсивные из которых ~1815, 1850, 1900, 1955 и 2018 см⁻¹, рекомендуется использовать для диагностики андалузита.

В качестве вспомогательных можно учитывать линии валентных и деформационных колебаний кремнекислородных тетраэдров в интервале 650–1000 см⁻¹ с главным пиком около 770–790 см⁻¹. В спектрах андалузита неизменно присутствует система линий ОН-групп: около 3461 и 3526 см⁻¹ (см. табл. 1). Благодаря своей характеристичности и распространённости в спектрах андалузита из разных месторождений данные линии могут быть использованы для диагностики этого минерала под ИК-микроскопом.

Типичным фрагментом спектра силлиманита (см. рисунки 3, Б и 5) является система полос поглощения в интервале 1500–2000 см⁻¹, принадлежащих к обертонам валентных колебаний Al-Si-O тетраэдров. Самые интенсивные из них – линии




серым цветом выделены области, рекомендуемые для идентификации минералов группы кианита

около 1670, 1800–1830 и 1916 см⁻¹. В области 1500– 2000 см⁻¹ волновые числа и соотношения интенсивностей указанных пиков чётко отличаются от соответствующих спектральных характеристик андалузита. Кроме того, в отличие от андалузита в спектрах всех изученных образцов силлиманита присутствуют линии около 1300-1320, 1350-1360 и 1380-1400 см-1 (см. табл. 2). Представляется вероятным, что эти полосы поглощения обусловлены структурной примесью бора в тройной координации [10]. В области колебаний ОНгрупп спектры изученных случайно ориентированных зёрен силлиманита заметно отличаются от поляризованных спектров этого минерала, приводимых в литературе [9]. Только в двух образцах (Кп-1 и У-1) обнаружена спектральная линия около 3580-3590 см⁻¹. По-видимому, она соответствует одной из главных линий ~ 3562 см⁻¹ структурных ОН-групп в поляризованном спектре силлиманита (см. рис. 4, В). Примечательно, что в спектрах всех изученных силлиманитов наблюдаются нетипичные слабые пики около 2979 и 3018 см⁻¹, которые могут быть обусловлены валентными колебаниями связанных ОН-групп. Вместе с тем спектральные линии около 3600-3680 см⁻¹ (см. табл. 2), по-видимому, к силлиманиту не относятся, так как они более характерны для пирофиллита [2].

Весьма вероятно, что отсутствие в спектрах большинства образцов линий структурных ОНгрупп обусловлено векторной природой их колебаний. В сочетании с естественной ориентировкой зёрен силлиманита под микроскопом (за счёт совершенной спайности) это может быть причиной резкого снижения интенсивности соответствующих пиков. Это согласуется с результатами изучения поляризованных спектров силлиманита [9], андалузита [13] и кианита [8].

Для диагностики кианита под ИК-микроскопом (см. рис. 5) можно использовать характеристические линии колебаний кремнекислородных тетраэдров в структуре этого минерала. Среди них наиболее информативными являются «размытые» полосы поглощения (от одной до трёх) в интервале 1820–1880 см⁻¹, а также система узких линий около 720–780, 790–820, 911–914 и 990– 1000 см⁻¹.

В спектрах кианита проявляются полосы поглощения колебаний структурных ОН-групп 3274–3280, 3293, 3386, 3414–3452, 3564–3569 см⁻¹, подобные линиям, приведённым в работе [8] (см. табл. 3 и рис. 4, А). Однако в спектрах, полученных нами

Интервал	Образцы								
спектра	Кп-1	Ир-1	У-1	Я-1	Кп-2	Кп-3			
700–750	707	701 , 739	704, /750/	711	711				
780 ± 2		781	781	778	781				
800-860	/820/	808	/809/	835	854				
910-1000		925	/993/	911	978	/966/			
1050-1060	1060	1055	1057	1054	1051	1052			
1160–1240		1183	1203	1206	1160	1232			
1300–1320	1301	1314	1310	1309	1313	/1306/			
1350-1400	1386	1356,1396	1354,1395	1350,1391	/1355/	/1350/,1392			
1520-1540	<u>1527</u>	/1527/	<u>1526</u>	/1528/	/1534/	/1529/			
1670 ± 2	<u>1671</u>	<u>1670</u>	<u>1671</u>	<u>1670</u>	<u>1670</u>	<u>1668</u>			
1708 ± 1	<u>1708</u>	<u>1707</u>	<u>1709</u>	<u>1708</u>	<u>1707</u>	<u>1707</u>			
1762 ± 1	<u>1762</u>	<u>1762</u>	<u>1763</u>	<u>1761</u>	<u>1761</u>	/1762/			
1800–1830	<u>1819</u>	<u>1818</u>	<u>1821</u>	<u>1806</u>	<u>1815</u>	<u>1816</u>			
1862 ± <u>2</u>	<u>1863</u>	<u>1864</u>	<u>1864</u>	<u>1861</u>	<u>/1861/</u>	<u>/1861/</u>			
1916 ± 1	<u>1916</u>	<u>1917</u>	<u>1916</u>	<u>1915</u>	<u>1917</u>	<u>1916</u>			
2020-2030	2023		/2025/	2020	/2022/	/2021/			
2120-2150	2124		/2150/	2121		/2148/			
2979 ± 1	2978	/2978/	/2978/	/2979/	/2980/	/2979/			
3018 ± 1	3018	/3018/	/3019/	/3017/	/3018/	/3017/			
3412	3412								
3580-3590	3589		3580						
3600–3680	3666	3675,3694	3660,3676	3607,3659,3674	3659,3674	3607,3643,3676			

Табл. 2. Волновые числа спектров силлиманита, по данным ИК-микроскопии

Примечание. Жирным шрифтом показаны пики большой интенсивности, обычным – средней, в скобках – малой; характеристические линии выделены подчёркиванием.

под ИК-микроскопом, интенсивность указанных пиков очень мала, причём зачастую они практически не видны. Причина этого, по всей вероятности, та же, что и в случае силлиманита, и связана с естественной ориентировкой зёрен кианита на столике микроскопа, обусловленной совершенной спайностью минерала.

Выводы. Полиморфные модификации Al₂SiO₅ – кианит, андалузит, силлиманит – могут быть идентифицированы под ИК-микроскопом по системам характеристических линий: их количеству, волновому числу и соотношению интенсивностей.

Кианит предлагается определять по поглощению в области 1820–1880 см⁻¹ (от одного до трёх максимумов), а также системе узких линий около 720–780, 790–820, 911–914 и 990–1000 см⁻¹. На основе этого предоставляется возможность идентифицировать кианит не только в шлиховых и протолочных пробах, но и в виде включений в кристаллах алмаза.

Для диагностики андалузита рекомендуется использовать узкие полосы поглощения ~ 1815, 1850, 1900, 1955 и 2018 см⁻¹, а также в качестве вспомогательных следует учитывать линии около 770–790 см⁻¹ и 3461 и 3527 см⁻¹.

Характеристическими для силлиманита являются линии около 1520–1540, 1670, 1708, 1762, 1800–1830, 1862 и 1916 см⁻¹.

В спектрах индивидуальных зёрен силлиманита, полученных под ИК-микроскопом, в области 1300–1400 см⁻¹ присутствуют линии структурных

Образцы	Волновые числа, см-1										
	720–780	790-820	910–920	990–1000	1005–1190	1430–1510	1820–1880	1920–1950	3200-3570		
СЛ-5	<u>750</u>	<u>803</u>	<u>911</u>	<u>993</u>	1175	1430	<u>1880</u>		/3386/		
СЛ-6	<u>747</u>		<u>914</u>		1167		<u>1880</u>				
СЛ-7	<u>747</u>	<u>798</u>	<u>914</u>		1167		<u>1880</u>				
Бо-2	<u>728</u>			996	1025	1467	<u>1820, 1879</u>	<u>1928</u>	/3293, 3452/		
Бо-3	<u>748</u>	<u>796</u>	<u>912</u>	<u>992</u>	1125	1502	<u>1878</u>				
ЮАР-1	<u>750</u>	<u>795</u>	<u>910</u>		1137	1481	<u>1847</u>	<u>1947</u>	/3414/		
ЮАР-2	<u>749</u>	<u>792</u>	<u>911</u>	<u>993</u>	1064, 1181		<u>1875</u>		/3432/		
ЮАР-3	<u>752</u>	<u>796</u>	<u>912</u>		1005, 1131		<u>1824</u>	<u>1922, 1946</u>	/3277/		
ЮАР-4	<u>751</u>	<u>794</u>	<u>911</u>	<u>993</u>	1147	1479	<u>1879</u>				
C-1	<u>726</u>	<u>814</u>		<u>1000</u>	1082, 1182		<u>1826, 1854</u>	<u>1919</u>	/3216/		
Я-2	<u>746</u>	<u>800</u>	<u>914</u>	<u>994</u>	1145	1480	<u>1881</u>	<u>1922</u>			
У-2	<u>748</u>	<u>792,</u> <u>806</u>	<u>914</u>	<u>994</u>	1137		<u>1867</u>	<u>1931</u>	/3274, 3435, 3565/		
У-3	<u>748</u>	<u>798</u>	<u>913</u>	<u>995</u>	1179		<u>1878</u>				
У-4		<u>795</u>	<u>911</u>	<u>992</u>	1172		<u>1877</u>		/3280, 3387, 3569/		
У-5	<u>752</u>	<u>796</u>	<u>912</u>		1006, 1131	1481		<u>1947</u>	/3277/		
Кп-4	775	<u>802</u>	<u>913</u>	<u>991</u>	1188	1434	<u>1879</u>	<u>1915</u>			
Кп-5	<u>753</u>		<u>913</u>		1006, 1112	1484	<u>1817</u>	<u>1945</u>			
Кп-6	<u>747</u>	<u>801, 812</u>	<u>914</u>	<u>993</u>	1065, 1132	1454, 1505	<u>1857</u>	<u>1920</u>	/3564/		

Табл. З. Волновые числа спектров кианита, по данным ИК-микроскопии

Примечание. Жирным шрифтом показаны пики большой интенсивности, обычным – средней, в скобках – малой; характеристические линии выделены подчёркиванием.

ВО₃-групп. Кроме того, во всех минералах группы кианита выявлены структурные гидроксильные группы. Не исключено, что все названные примеси в кристаллической структуре андалузита, силлима-

нита и кианита могут рассматриваться в качестве их типоморфных свойств, возможности использования которых в прогнозно-поисковом аспекте будут оценены в процессе дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Годовиков А. А.* Минералогия. М. : Недра, 1975. 519 с.
- Плюснина И. И. Инфракрасные спектры минералов. – М. : Издательство Московского университета, 1977. – 176 с.
- Хачатрян Г. К., Колесникова Т. И. Методика исследования оливина и хромдиопсида с помощью ИК-микроскопа и возможности ее применения при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза // Отечественная геология. – 2019. – № 3. – С. 63–73.
- Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г. Методика анализа породообразующих и акцессорных минералов рудных месторождений с использованием ИК-Фурье микроскопа // Руды и металлы. – 2010. – № 5. – С. 64–73.
- Хачатрян Г. К., Щербакова Т. Е., Колесникова Т. И. Методика исследования минералов-спутников алмаза с применением ИК-Фурье спектроскопии // Отечественная геология. – 2011. – № 4. – С. 76–85.
- Anbalagan G., Sangeetha V. Characterization of Indian natural mineral andalusite using XRD, Optical absorption, Infrared, EPR and NMR spectroscopic techniques // Journal of Physics and Research. 2015. V. 5, Is. 1. P. 1–12.

- Bell D. R., Rossman G. R., Maldener J., Endisch D., Rauch F. Hydroxide in kyanite: A quantitative determination of the absolute amount and calibration of the IR spectrum // American Mineralogist. – 2004. – V. 89, № 7. – P. 998–1003.
- Beran A., Libowitzky E. Water in Natural Mantle Minerals II: Olivine, Garnet and Accessory Minerals // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. – 2006. – V. 62. – P. 169–191.
- Beran A., Rossman G. R., Grew E. S. The hydrous component of sillimanite // American Mineralogist. – 1989. – V. 74. – P. 812–817.
- Donaldson C. H. Coordination of boron in sillimanite // Mineralogical Magazine. – 1985. – V. 49. – P. 132–135.

- Karanth R. V., Mathew G., Gundu Rao T. K. FT-IR Spectroscopic Investigation of Hydrous Components in Sillimanite from Eastern Ghat Granulite Belt, India // Gondwana Research. – 1999. – V. 2, № I. – P. 89–94.
- Šjakova-Ivanova T., Čukovska L. R. Mineralogical characteristics of kyanite from Prilepec, republic of Macedonia // Geologica Macedonica. 2014. V. 28, № 2. – P. 115–120.
- 13. *Taran M. N., Koch-Müller M.* FTIR spectroscopic study of natural andalusite showing electronic Fe-Ti charge-transfer processes: zoning and thermal evolution of OHvibration bands // Physics and Chemistry of Minerals. 2013. V. 40, № 1. P. 63–71.

REFERENCES

- 1. *Godovikov A. A.* Mineralogiya [Mineralogy], Moscow, Nedra publ., 1975, 519 p. (In Russ.)
- Plyusnina I. I. Infrakrasnyye spektry mineralov [Infrared spectra of minerals], Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta publ., 1977, 176 p. (In Russ.)
- Khachatryan G. K., Kolesnikova T. I. Metodika issledovaniya olivina i khromdiopsida s pomoshch'yu IKmikroskopa i vozmozhnosti yeye primeneniya pri shlikho-mineralogicheskikh poiskakh mestorozhde-niy almaza [Methodology for studying olivine and chrome diopside using an IR microscope and the possibility of its use in schlich-mineralogical searches for diamond deposits], Otechestvennaya geologiya [Domestic Geology], 2019, No. 3, pp. 63–73. (In Russ.)
- Khachatryan G. K., Kryazhev S. G. Metodika analiza porodoobrazuyushchikh i aktsessornykh mineralov rudnykh mestorozhdeniy s ispol'zovaniyem IK-Fur'ye mikroskopa [Methodology for the analysis of rockforming and accessory minerals of ore deposits using an IR-Fourier microscope], Rudy i metally [Ores and Metals], 2010, No. 5, pp. 64–73. (In Russ.)
- Khachatryan G. K., Shcherbakova T. Ye., Kolesnikova T. I. Metodika issledovaniya mineralov-sputnikov almaza s primeneniyem IK-Fur'ye spektroskopii [Methods for studying diamond satellite minerals using Fourier transform infrared spectroscopy], Otechestvennaya geologiya [Domestic Geology], 2011, No. 4, pp. 76–85. (In Russ.)

- Anbalagan G., Sangeetha V. Characterization of Indian natural mineral andalusite using XRD, Optical absorption, Infrared, EPR and NMR spectroscopic techniques, Journal of Physics and Research, 2015, V. 5, Is. 1, pp. 1–12.
- Bell D. R., Rossman G. R., Maldener J., Endisch D., Rauch F. Hydroxide in kyanite: A quantitative determination of the absolute amount and calibration of the IR spectrum, American Mineralogist, 2004, V. 89, No. 7, pp. 998–1003.
- Beran A., Libowitzky E. Water in Natural Mantle Minerals II: Olivine, Garnet and Accessory Minerals, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2006, V. 62, pp. 169–191.
- Beran A., Rossman G. R., Grew E. S. The hydrous component of sillimanite, American Mineralogist, 1989, V. 74, pp. 812–817.
- 10. *Donaldson C. H.* Coordination of boron in sillimanite, Mineralogical Magazine, 1985, V. 49, pp. 132–135.
- 11. Karanth R. V., Mathew G., Gundu Rao T. K. FT-IR Spectroscopic Investigation of Hydrous Components in Sillimanite from Eastern Ghat Granulite Belt, India, Gondwana Research, 1999, V. 2, No. I, pp. 89–94.
- Šjakova-Ivanova T., Čukovska L. R. Mineralogical characteristics of kyanite from Prilepec, republic of Macedonia, Geologica Macedonica, 2014, V. 28, No. 2, pp. 115–120.
- Taran M. N., Koch-Müller M. FTIR spectroscopic study of natural andalusite showing electronic Fe-Ti chargetransfer processes: zoning and thermal evolution of OHvibration bands, Physics and Chemistry of Minerals, 2013, V. 40, No. 1, pp. 63–71.

Статья поступила в редакцию 03.04.24; одобрена после рецензирования 16.05.24; принята к публикации 16.05.24. The article was submitted 03.04.24; approved after reviewing 16.05.24; accepted for publication 16.05.24.





МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ГЕОЛОГИЯ, ПРОГНОЗ, ПОИСКИ И ОЦЕНКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ, БЛАГОРОДНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

посвящённая 90-летию ЦНИГРИ (1935-2025)

15–18 апреля 2025 г., ФГБУ «ЦНИГРИ», г. Москва

ПЕРВЫЙ ЦИРКУЛЯР

ФГБУ «ЦНИГРИ»

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

25.10.2024 открытие регистрации

07.03.2025 подтверждение включения докладов в программу конференции

03.02.2025 окончание регистрации и приема тезисов

15–18.04.2025 проведение конференции

КОНТАКТЫ

Ученый Секретарь, к. г.-м. н. Фомина Марина Ивановна +7 (495) 315-4365 (доб. 121);

Цепелева Маргарита Сергеевна +7(495)315-4365 (доб. 173)

Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1 www.tsnigri.ru conference@tsnigri.ru www.conf.tsnigri.ru

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

01.10.2024

открытие регистрации и рассылка информационного письма

13.01.2025

окончание приема тезисов

03.02.2025

окончание регистрации для слушателей

12-14.02.2025

работа конференции



РУДНАЯ ШКОЛА ЦНИГРИ

Молодежная научно-образовательная конференция «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче»





12-14 февраля 2025 года ФГБУ «ЦНИГРИ» Москва

КОНТАКТЫ

Костина Елизавета Дмитриевна 8 (968) 388-87-23

young@tsnigri.ru