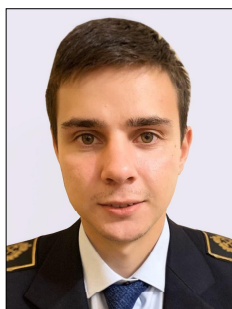


УДК 550.849:550.812.1

DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-4-13-19

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТИПИЗАЦИИ ЗОЛОТОНОСНЫХ РУД НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL CRITERIA OF GOLD-BEARING ORES TECHNOLOGICAL CLASSIFICATION AT THE EARLY STAGES OF GEOLOGICAL SURVEY



В. Е. Гузев,
Санкт-Петербургский
горный университет,
г. Санкт-Петербург
vladislav_guzev@vsegei.ru

V. Guzev,
Saint Petersburg Mining
University, St. Petersburg



А. П. Бороздин,
ООО «Лаборатория изучения
минерального сырья»,
г. Санкт-Петербург
borozdin@lims-lab.com

A. Borozdin,
CEO «Raw Materials Research
Laboratory» LLC, St. Petersburg



С. В. Петров,
Санкт-Петербургский
государственный
университет,
г. Санкт-Петербург
s.petrov@spbu.ru

S. Petrov,
Saint Petersburg State
University, St. Petersburg



А. В. Терехов,
Всероссийский
научно-исследовательский
геологический институт
им. А. П. Карпинского,
г. Санкт-Петербург
artem_terekhov@vsegei.ru

A. Terekhov,
Head of the Metallogeny and
Geology of Mineral Deposits
department, A. P. Karpinsky
Russian Geological Research
Institute, St. Petersburg

Представлены разработанные критерии технологической типизации различных золотоносных руд для экспрессного метода прогнозирования технологических свойств руд месторождений золота на ранних стадиях геологоразведочных работ. Полученные критерии необходимы для опережающей и малозатратной минералого-технологической оценки, которая позволит компаниям сократить финансовые расходы и принять решение о целесообразности продолжения геологоразведочных работ. Рядом научных работ установлены закономерности технологической типизации золотоносных руд для отдельных генетических типов месторождений, однако обобщающие публикации практически отсутствуют.

Проведены комплексные минералого-технологические исследования проб на семи различных золоторудных месторождениях. Полученные результаты позволили выявить зависимость технологических свойств от вещественного состава руд. Установлено, что взаимосвязь между генетическим типом руд и выбором схемы обогащения отсутствует. Для проверки разработанных критериев изучено рудопроявление Сикакангас, расположенное в западной части Финляндии. На основании сопоставления результатов анализов и разработанных на других месторождениях критериев спрогнозирован оптимальный способ обогащения руд месторождения Сикакангас, который в дальнейшем подтвердился технологическими опытами.

Сделан вывод, что разработанные в исследовании критерии технологической типизации золотоносных руд оказались релевантными для их дальнейшего применения в прогнозировании способа обогащения руд с месторождений разных генетических типов. Метод прогнозирования, основанный на выявленных критериях, характеризуется простотой, относительной универсальностью, а также малыми временными затратами на его выполнение. Однако разработанные критерии могут совершенствоваться при их дальнейшем применении

Ключевые слова: золотоносные руды; технологические пробы; способы обогащения руд; рудопроявление Сикакангас; золотое оруденение; гранулометрический анализ; форма нахождения золота; выщелачивание; геологоразведочные работы; окисление

The article presents the developed criteria for the technological typification of gold ores to optimize a method for predicting the ores technological features of ores of gold deposits at the early stages of exploration. These criteria are necessary for mineralogical and technological express-evaluation which allows geological companies to reduce financial cost and decide whether to continue exploration work. So far, previous research of different authors focused on patterns of technological typification of gold ores for specific genetic types of deposits. However, there are no generalizing papers on this subject.

The authors have studied 7 gold deposits. The research included comprehensive mineralogical and technological analysis. The results revealed the dependence of technological properties on the material composition. Furthermore, it was found that there is no correlation between a genetic type of ores and choice of beneficiation scheme. The recently discovered Sikakangas ore occurrence located in western Finland was studied to verify the results. A prediction about the most optimal method of ore beneficiation for Sikakangas deposit based on a comparison of the analysis results and the criteria previously developed for other deposits has been made. The technological experiments confirmed the authors' hypothesis.

Finally, it should be noted that the developed criteria have turned out relevant for their further application in predicting the method of ore beneficiation for gold deposits with different genetic types

Key words: gold-bearing ores; technological samples; the methods of ore beneficiation; ore occurrence Sikakangas; gold mineralization; granulometric analysis; gold deportment; leaching; geological exploration; oxidation

Введение. На ранних стадиях геологоразведочных работ одним из важнейших факторов прогнозирования способа обогащения является определение вещественного состава золотоносных руд [7]. Золотосодержащие руды обладают как общими признаками, так и индивидуальными особенностями, оказывающими существенное влияние на выбор технологии их переработки. Ряд исследователей и организаций на протяжении более 70 лет предпринимают попытки создать универсальную технологическую классификацию золотосодержащих руд и выявить зависимости технологических свойств руды от вещественного состава [2; 8]. Ранее установлены важнейшие факторы вещественного состава золотоносных руд, влияющие на способ обогащения: гранулометрическая характеристика золота, формы нахождения золота и степень окисленности руд [1; 4; 7]. Данные факторы позволяют оценить технологические свойства золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ. При этом закономерности технологической типизации золотоносных руд для отдельных генетических типов месторождений установлены [7], однако обобщающих работ по данной теме несущественное количество.

Цель исследования – выявление критериев технологической типизации различных золотоносных руд для разработки экспресс-

ного метода прогнозирования технологических свойств руд на ранних стадиях геологоразведочных работ. Полученные критерии необходимы для опережающей и малозатратной минералого-технологической оценки, которая позволит компаниям сократить финансовые расходы и принять решение о целесообразности продолжения геологоразведочных работ.

Для выполнения поставленной цели авторами в лаборатории ООО «ЛИМС» комплексно исследовано 7 различных золоторудных месторождений (Албазино, Елочка, Капан, Невенрекан, Нежданинское, Тамуньер, Пещерный), на которых отобрано 19 технологических проб (рисунок). Данные месторождения выбраны для достижения максимального разнообразия генетических типов руд (от золото-сульфидной до золото-полиметаллической минерализации).

Методология и методы исследования. Технологические исследования на стадии предварительной разведки заключаются в проведении анализов и экспериментов, необходимых для определения вещественного состава руд и технологии извлечения из них благородных металлов и других ценных компонентов. Авторы опирались на ряд стандартных методологических подходов и методов изучения золотосодержащих руд [6; 8], которые предназначены для технологической

оценки сырья. Комплексное изучение проб включало химические, петрографические, минералогические и электронно-микроскопические исследования, а также технологические (гравитационные, флотационные и гидрометаллургические) опыты для выбора оптимальной схемы переработки руд.

Анализ содержаний петрогенных оксидов исследовался рентгеноспектральным флуоресцентным методом (XRF) на волново-

дисперсионном спектрометре «ARL Advant'X» фирмы «ThermoFisher Scientific» в ресурсном центре СПбГУ. Определения микроэлементов проводилось масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в лаборатории ЗАО «Центр исследования и контроля воды» на масс-спектрометре Agilent 7500с фирмы Agilent. Анализ на благородные металлы выполнен пробирным методом в лаборатории ЗАО «Механобр инжиниринг аналит».



Местоположение изучаемых месторождений: Албазино, Елочка, Капан, Невенрекан, Нежданинское, Тамуньер, Пещерный / Location of the studied deposits: Albazino, Elochka, Kapan, Nevenrekan, Nezhdaninskoye, Tamunier, Peshherny

Петрографические исследования и микрофотодокументация проводились с применением поляризационного микроскопа Альтами ПОЛАР-3, оснащенного видеокамерой и системой захвата и обработки изображений Altami Studio 3.4. Минераграфические исследования выполнены с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX53, оснащенного системой захвата изображения. Электронно-микроскопическое изучение аншлифов проведено на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный энерго-дисперсионным спектрометром Oxford X-Max в ресурсном центре СПбГУ.

Гравитационная обогатимость руды исследовалась в лаборатории ООО «ЛИМС» на концентрационном столе СКЛ-2 с последовательным доизмельчением хвостов (-1+0; -0,5+0; -0,25+0; -0,125+0 мм) в шаровой мельнице МШЛ-7. На заключительном этапе хвосты гравитационного опыта (-0,125+0 мм) обогащались на центробежно-вибрационном концентраторе ЦВКП.

При изучении флотационной обогатимости руды применялись различные реагентные режимы исходя из результатов минералогических исследований [9]. Исследование гидрометаллургической обогатимости руды

проводилось путем цианидного выщелачивания по методике ROL-21 («объемный бутылочный тест» Au-AA15 и Au-AA15 mod) в лаборатории ALS.

Результаты исследования и их обсуждение. Выполненное авторами комплексное исследование технологических проб позволило сравнить важнейшие факторы вещественного состава руд, которые влияют на выбор схемы обогащения. На основе детального анализа полученных данных разработаны критерии типизации различных генетических типов золотоносных руд для экспрессного метода прогнозирования их технологических свойств на стадии предварительной разведки (таб. 1). Кроме того, результаты показали, что взаимосвязь между генетическим типом руд и выбором схемы их обогащения отсутствует.

Гравитационный метод. Применение исключительно гравитационной схемы обогащения золотоносных руд может быть эффективно, если более 80 % золота будет находиться в свободной форме, а более 75 % частиц золота – иметь размерность >50 мкм. В связи с тем, что породы коренных место-

рождений золота крайне редко удовлетворяют данные условия, применяют комбинированные схемы обогащения.

Гравитационно-флотационный метод. Применение гравитационно-флотационного метода обогащения будет эффективно при следующих условиях: количество золота в свободной форме составит более 50 % от общего объема золота, гранулометрические характеристики будут соответствовать определенным параметрам: количество частиц размером >50 мкм составляет более 20 % общего объема золота. Целью данного метода является выведение из руды крупного и среднего (частиц размером более 40 мкм) свободного золота в концентраты. Обогащение золотоносных руд, не соответствующих данным критериям, также возможно, однако в результате их гравитационного обогащения в концентрате будут накапливаться минералы-носители (сульфиды). В таком случае получать гравитационный концентрат с высокими содержаниями золота и приемлемым показателем извлечения будет затруднительно.

Таблица 1 / Table 1

Критерии типизации золотоносных руд, % / Typification criteria for gold-bearing ores, %

Схема обогащения руд / Ore beneficiation scheme	Форма нахождения золота / Gold department			Гранулометрическая характеристика золота мкм / Granulometric characteristic of gold, μm			Степень окисленности руд / Oxidation level of ore	
	Свободное золото / free gold	Оксиды и гидроксиды / Oxides and hydroxides	Сульфиды / Sulfide	<10	10...50	>50	Первичная / Primary	Окисленная / Oxidat
Гравитационная / Gravity	>80	-	-	-	-	>75	✓	-
Гравитационно-флотационная / Gravity-flotation	>50	-	-	-	-	>20	✓	-
Флотационная / Flotation	>30	-	-	-	>60	-	✓	-
Флотационно-гидрометаллургическая / Flotation-hydrometallurgical	-	-	>70	>85		-	✓	-
Гидрометаллургическая / Hydrometallurgical	>60	>70*	-	>80		-	✓	✓

*Применяется для окисленной руды / Suitable for oxidized ore

Флотационный метод. Для благоприятного исхода флотационного метода его необходимо применять для обогащения первичных руд, в которых более 60 % частиц золота имеет размерность 10...50 мкм, при этом бо-

лее 30 % от общего объема золота находится в свободной форме. Присутствие золота в окисленных рудах в более мелкой размерности, а также имеющего более тесную связь с сульфидными (как носитель дисперсного

невидимого золота) мешает максимально эффективному извлечению благородного металла методом флотации. Качество таких концентратов будет невысоким, однако допустимым для дальнейшего обогащения сульфидных концентратов.

Флотационно-гидрометаллургический метод. Данный метод является оптимальным для руд, в которых более 70 % золота от общего объема содержится в сульфидах, при этом не менее 85 % его частиц имеет размерность 10...50 мкм. Такие руды обычно являются упорными, поэтому их предварительно обогащают методом флотации для дальнейшей переработки концентратов и выщелачивания хвостов.

Гидрометаллургический метод. Данный метод показывает высокую эффективность при обогащении первичных руд с золотом в свободной форме (более 60 % от общего объема) или окисленных руд с золотом, находящимся (более 70 % от общего объема) в оксидах и гидрооксидах. При этом в обоих случаях важно, чтобы более 80 % частиц золота имело размерность менее 50 мкм. Еще одним положительным фактором обогащения является присутствие золота в трещинах сульфидов.

Для проверки релевантности разработанных критериев изучен вещественный состав руд недавно открытого рудопроявления Сикакангас (западная часть Финлянии) [10] и дать прогноз способа обогащения, основываясь на разработанных критериях. Исследование технологической пробы проводилось аналогично способу изучения руд предыдущих месторождений [5].

Полученные результаты показали, что руда является первичной. Самородное золото обладает следующими характеристиками:

неправильная форма, очертания границ извилистые, встречается в трещинах арсенопирита совместно с другими минералами парагенезиса (леллингит, галенит, самородный висмут), размер частиц варьирует от первых микрон до 45 мкм, по химическому составу представляет собой золото-серебряный сплав, пробность которого в среднем составляет 826,2 ‰. На основе сказанного построена таблица важнейших факторов, влияющих на выбор способа обогащения (табл. 2).

Сопоставляя результаты исследований пород рудопроявления Сикакангас и ранее разработанных на других месторождениях критериев, можно предположить, что флотационно-гидрометаллургический метод обогащения стоит рассматривать как наиболее оптимальный для изучаемых руд. Так как крупность самородного золота (более 90 % частиц имеет размерность менее 10 мкм) и его преимущественное расположение в трещинах более ранних минералов (арсенопирит) обеспечивают достаточную проницаемость руд для выщелачивающих растворов, а отсутствие крупного самородного золота (более 50 мкм) способствует полному его растворению. Однако, учитывая, что все золото сосредоточено в сульфидах для снижения влияния высокой доли «невидимого» золота на процесс выщелачивания, необходимо рекомендовать к исследованиям комбинированную флотационную с цианированием хвостов схему. Для подтверждения прогноза технологических свойств руд рудопроявления Сикакангас проведены технологические опыты, аналогично предыдущим месторождениям, которые подтвердили рекомендацию по применению комбинированного флотационно-гидрометаллургического метода.

Таблица 2 / Table 2

Критерии типизации золотоносных руд рудопроявления Сикакангас, % /
Typification criteria for gold-bearing ores of Sikakangas ore occurrence, %

Форма нахождения золота / Gold department			Гранулометрическая характеристика золота мкм / Granulometric characteristic of gold, μm			Степень окисленности руд / Oxidation level of ore	
Свободное золото / Free gold	Оксиды и гидрооксиды / Oxides and hydroxides	Сульфиды / Sulfide	<10	10...50	>50	Первичная / Primary	Окисленная / Oxidat
-	-	>95	91	9	-	✓	-

По мнению авторов, разработанные критерии технологической типизации золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ оказались релевантными для их дальнейшего применения в прогнозировании способа обогащения.

Заключение. Разработанные критерии основываются на личном опыте авторов, заключающемся в глубоком осмыслении существующих теорий, формулировке собствен-

ных гипотез и дальнейшем их подтверждении эмпирическими данными. Метод прогнозирования, основанный на разработанных критериях, характеризуется простотой и относительной универсальностью. Однако необходимо учитывать, что созданные критерии имеют рекомендательный характер и могут совершенствоваться при их дальнейшем применении.

Список литературы

1. Архипов Г. И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Обзор состояния и возможности развития. М.: Горная книга, 2011. 830 с.
2. Баликов С. В., Дементьев В. Е. Золото: свойства. Геологические аспекты. Иркутск: Иргиредмет, 2015. 327 с.
3. Богатиков О. А., Морозов А. Ф., Петров О. В. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 160 с.
4. Волков В. А., Генкин А. Д., Гончаров В. И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25, № 6. С. 18–29.
5. Гузев В. Е., Бороздин А. П. Минералогические и геохимические критерии технологической типизации золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ // Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых: сб. ст. М., 2019. С. 36–37.
6. Зеленев В. И. Методика исследования золото- и серебросодержащих руд. М.: Недра, 1989. 302 с.
7. ИЗОИТКО В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
8. Куликов А. А., Куликова А. Б. Техничко-методические основы опробования горных пород на золото. М.: Наука, 1988. 112 с.
9. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. М.: Руда и Металлы, 2008. 272 с.
10. Isomaa J., Koistinen E., Karkkainen N. Sikakangas gold prospect at Seinäjoki, Western Finland // Geological Survey of Finland. Helsinki, 2010. 62 p.
11. Petruk W. Applied mineralogy in the mining industry. Ottawa: Elsevier, 2000. 287 p.

References

1. Arkhipov G. I. *Mineralnye resursy gornorudnoy promyshlennosti dalnego vostoka. Obzor sostoyaniya i vozmozhnosti razvitiya* (Mineral resources of the mining industry of the Far East. Overview of status and development opportunities). Moscow: Mining Book, 2011. 830 p.
2. Balikov S. V., Dementiev V. E. *Zoloto: svoystva. Geologicheskie aspekty* (Gold: properties. Geological aspects). Irkutsk, Irgiredmet, 2015. 327 p.
3. Bogatnikov O. A., Morozov A. F., Petrov O. V. *Petrograficheskiy kodeks Rossii: Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya* (Petrographic Code of Russia: Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations). St. Petersburg: VSECEI, 2009. 160 p.
4. Volkov V. A., Genkin A. D., Goncharov V. I. *Tihookeanskaya geologiya* (Pacific Geology), 2006, vol. 25, no. 6, pp. 18–29.
5. Guzev V. E., Borozdin A. P. *Geologiya, poiski i kompleksnaya otsenka mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopayemykh: sb. st.* (Geology, Searches and a Comprehensive Assessment of Solid Mineral Deposits: collected articles). Moscow, 2019, pp. 36–37.
6. Zelenov V. I. *Metodika issledovaniia zoloto- i serebrosoderzhashchih rud* (Methods for studying gold and silver-containing ores). Moscow: Nedra, 1989. 302 p.
7. Izoitko V. M. *Tehnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud* (Technological mineralogy and ore evaluation). St. Petersburg: Nauka, 1997. 582 p.
8. Kulikov A. A., Kulikova A. B. *Tehniko-metodicheskie osnovy oprobovaniia gornyh porod i rud nazoloto* (Technical and methodological fundamentals of testing rocks and ores for gold). Moscow: Nauka, 1988. 112 p.
9. Chanturiya V. A., Wigderhaus V. E. *Elektrokhimiya sulfidov. Teoriya i praktika flotatsii* (Electrochemistry of sulfides. Theory and practice of flotation) Moscow: Ore and Metals, 2008. 272 p.

10. Isomaa J., Koistinen E., Karkkainen N. *Geological Survey of Finland* (Geological Survey of Finland). Helsinki, 2010. 62 p.
11. Petruk W. *Applied mineralogy in the mining industry* (Applied mineralogy in the mining industry). Ottawa: Elsevier, 2000. 287 p.

Коротко об авторах

Гузев Владислав Евгеньевич, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: поиск и разведка твердых полезных ископаемых, металлогения, рудообразование в магматогенных системах, обогащение полезных ископаемых
vladislav_guzev@vsegei.ru

Бороздин Алексей Павлович, генеральный директор ООО «Лаборатория изучения минерального сырья», г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: технологическая минералогия, обогащение полезных ископаемых
borozdin@lims-lab.com

Петров Сергей Викторович, канд. геол.-минер. наук, доцент кафедры геологии месторождений полезных ископаемых, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: прикладная минералогия; экономическая и промышленная геология; переработка минерального сырья
s.petrov@spbu.ru

Терехов Артем Валерьевич, канд. геол.-минер. наук, заведующий отделом металлогении и геологии месторождений полезных ископаемых, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: поиск и разведка твердых полезных ископаемых, металлогения, рудообразование в магматогенных системах
artem_terekhov@vsegei.ru

Briefly about the authors

Guzev Vladislav, postgraduate, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia. Sphere of scientific interests: search and exploration for minerals, metallogeny, ore formation in magmatogenic systems, mineral resources processing

Borozdin Aleksey, general director, CEO «Raw Materials Research Laboratory» LLC, St. Petersburg, Russia. Sphere of scientific interests: process mineralogy, mineral resources processing

Petrov Sergey, candidate of geol.-mineralogical sciences, assistant professor, Geology and Mineral Deposits department, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia. Sphere of scientific interests: applied mineralogy, economic and industrial geology, mineral processing

Terekhov Artyom, candidate of geol.-mineralogical sciences, head of Metallogeny and Geology of Mineral Deposits department, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia. Sphere of scientific interests: search and exploration for minerals, metallogeny, ore formation in magmatogenic systems

Образец цитирования

Гузев В. Е., Бороздин А. П., Петров С. В., Терехов А. В. Минералогические и геохимические критерии технологической типизации золотоносных руд на ранних стадиях геологоразведочных работ // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 4. С. 13–19. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-4-13-19.

Guzev V., Borozdin A., Petrov S., Terekhov A. Mineralogical and geochemical criteria of gold-bearing ores technological classification at the early stages of geological survey // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 13–19. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-4-13-19.

Статья поступила в редакцию: 14.04.2020 г.
Статья принята к публикации: 22.04.2020 г.