

УДК 553.4

МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИЕ ФЛЮИДЫ ЗОЛОТОНОСНОГО ИНТЕРВАЛА КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ

В. Ю. Прокофьев^{1,*}, член-корреспондент РАН К. В. Лобанов¹,
А. А. Пэк¹, М. И. Чичеров¹, А. А. Боровиков²

Поступило 12.09.2018 г.

Изучены физико-химические параметры флюидных включений разных типов в кварце из золотоносного интервала Кольской сверхглубокой скважины и их распространение по вертикали. Предполагается формирование золотой минерализации в процессе взаимодействия потока глубинной углекислоты с рассолами в интервале глубин 10 205–9269 м, вызванного тектоническими причинами. Обсуждается роль таких процессов в формировании орогенных месторождений золота, в том числе для золотой минерализации Южно-Печенгской структурной зоны.

Ключевые слова: флюидные включения, золото, рудообразующий флюид, Кольская сверхглубокая скважина.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856736-740>

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) глубиной 12 262 м стала источником ценной информации о глубинном строении континентальной земной коры Балтийского щита [1, 2]. Скважина вскрыла протерозойские и архейские породы с различной рудной минерализацией [3]. Особенно интересной представляется находка на глубине 9,5–11 км золотой минерализации (рис. 1), локализованной среди амфиболитов и двуслюдяных гнейсов архейского возраста (2,6–2,8 Ga). Эти породы подверглись воздействию регионального метаморфизма при 500–650 °С и 3,5–6 кбар [4]. Золотая минерализация проявлена среди метаморфизованных в амфиболитовой фации пород и представлена выделениями самородного золота (до 10 мкм) в кварце, биотите, роговой обманке и плагиоклазе [3]. Верхняя граница золотоносного интервала совпадает с крупным разломом (9500–9700 м), который проявлен в керне скважины резким переходом от пологозалегающих биотит-амфиболитовых гнейсов к крутопадающим железистым кварцитам, горнблендитам, тальк-тремолит-флогопитовым сланцам и дайкообразному телу порфириовидных гранитов лицо-арагубского комплекса, обнаруженному в интервале 9665–9700 м и имеющему возраст 1762–1766 млн лет. Существует несколько предположений о происхождении глу-

бинной золотой минерализации [2]: 1) перераспределение золота при метаморфизме; 2) избирательное осаждение на периферии зон регрессивных изменений и гидротермальной сульфидной минерализации; 3) отложение из флюидов глубинного происхождения. Чтобы получить дополнительную информацию по проблеме, было предпринято исследование флюидных включений в кварцевых прожилках из керна в интервале глубин от 9052,6 до 10 744,9 м.

Кварц прожилков содержит большое количество флюидных включений, приуроченных как к трещинам, так и равномерно распределённых внутри зёрен кварца. При визуальном исследовании прозрачно-полированных пластин толщиной 0,3–0,5 мм было выделено 4 типа флюидных включений (рис. 2): 1) газовые включения плотной углекислоты; 2) двухфазовые газовой-жидкие включения водно-солевых растворов; 3) трёхфазовые включения хлоридных рассолов, содержащие кубический кристалл NaCl; 4) включения углекислотно-водно-солевых флюидов.

Микротермометрические исследования проводили в лаборатории геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН на установке THMSG-600 фирмы “Linkam”. Результаты исследования более 900 индивидуальных включений приведены в табл. 1.

Углекислота в газовых включениях типа 1 гомогенизируется в жидкую фазу при температурах от –45,0 до 30,8 °С. В некоторых образцах (10205.8) углекислота гомогенизируется в газ при температуре 30,5 °С. Температура плавления углекислоты изме-

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

² Институт минералогии и петрографии Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

*E-mail: vpr2004@rambler.ru

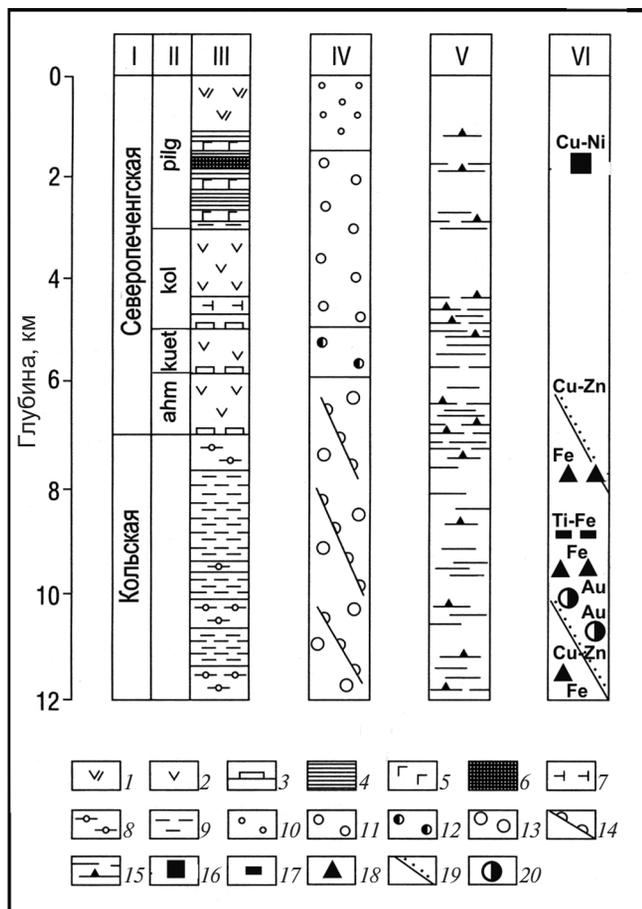


Рис. 1. Положение рудной минерализации в разрезе Кольской сверхглубокой скважины [2]. I — серии пород; II — свиты раннепротерозой северопеченгской серии (pilg — пильгуярви, kol — колосйоки, kuet — куэтьсярви, aht — ахмалаhti); III — геологический разрез; IV — метаморфические фации; V — зоны пластических деформаций; VI — рудная минерализация; 1 — metabazaltsy s prosloiyami pikritov, 2 — metabazaltsy, 3 — metasandstani, 4 — metaosadочные породы продуктивной толщи, 5 — габбро, 6 — перидотиты, 7 — метаандезиты, 8 — высокоглиноземистые гнейсы, 9 — биотит-амфиболовые гнейсы; 10–14 — метаморфические фации: 10 — пренит-пумпеллитовая, 11 — зеленосланцевая, 12 — эпидот-амфиболитовая, 13 — амфиболитовая, 14 — регрессивная зеленосланцевая, 15 — зоны расланцевания; 16–20 — рудная минерализация: 16 — медно-никелевая, 17 — железо-титановая, 18 — железистые кварциты, 19 — полиметаллическая гидротермальная, 20 — золото-серебряная.

няется от $-56,7$ до $-60,3$ °C, что свидетельствует о наличии в ней примеси низкокипящих газов. Изучение состава газовой фазы включений проводилось методом КР-спектроскопии при помощи спектрометра Jobin Yvon LabRAM HR800 (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Судя по полученным данным (табл. 2), в углекислоте газовых включений в кварце по всему изученному разрезу присутствовала не-

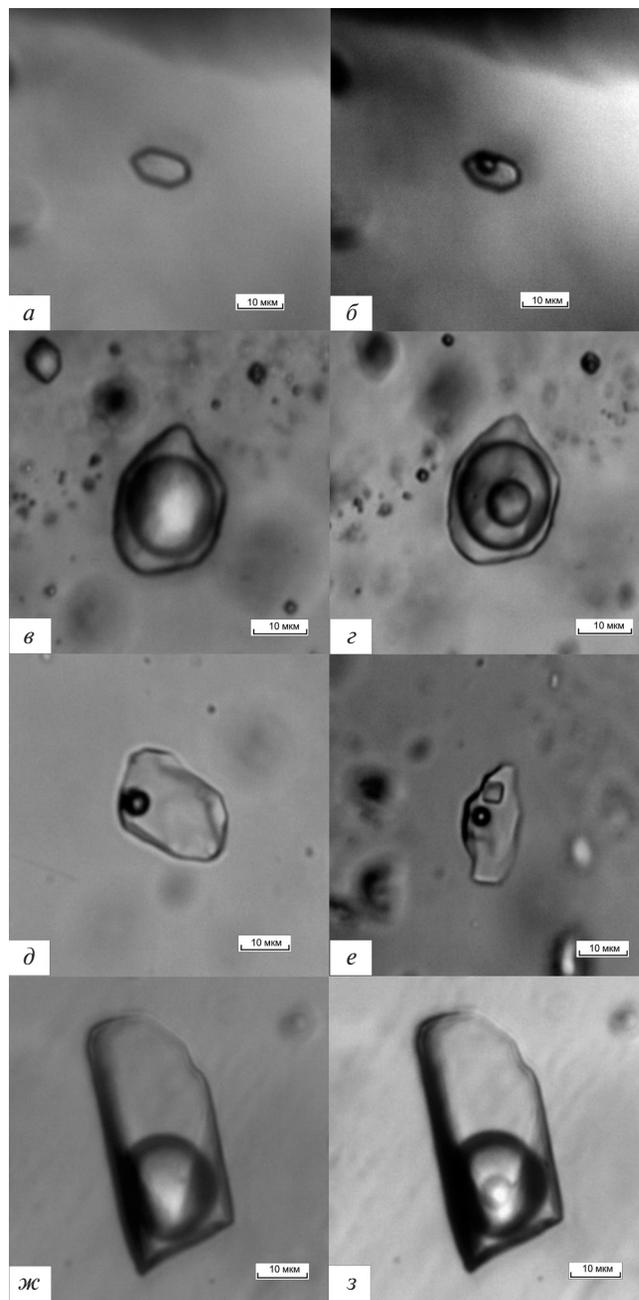


Рис. 2. Типы флюидных включений в кварце золотоносного интервала Кольской сверхглубокой скважины: а, б — газовые (тип 1; а — $+25$ °C, б — -50 °C); в, г — газовые, с каймой водного раствора (тип 1; в — $+25$ °C, г — -20 °C), д — двухфазовые газовой-жидкие (тип 2), е — трёхфазовые с кристаллом галита (тип 3), ж, з — углекислотно-водные (тип 4; ж — $+25$ °C, з — -10 °C). Масштаб 10 мкм.

большая примесь азота (3,3–1,9 мол.%) и отсутствовали метан и сероводород. Плотность углекислоты составляет $0,37-1,14$ г/см³. Некоторые газовые включения имеют кайму водного раствора, содержащего растворённые соли в концентрации 3,4–4,1 мас.%-экв. NaCl.

Таблица 1. Данные микротермометрических исследований флюидных включений в кварце из керна Кольской сверхглубокой скважины

№ пробы	Тип включений	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл.льда (NaCl)}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл CO}_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{гом CO}_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл.газ}}, ^\circ\text{C}$	<i>C</i> , мас. %-экв. NaCl (CaCl ₂)	<i>C</i> CO ₂ , моль/кг р-ра	<i>d</i> , г/см ³
К 9052.6	4	11	356–347	–42...–41	–11,9...–11,1	–58,5...–58,2	7,0...9,6 Ж	–2,2...–1,8	17,9–17,5	6,9–6,5	1,05
	1	55	–	–	–	–60,3...–56,8	–12,0...+22,4 Ж	–	–	–	0,75–0,99
	4	2	203	–34	–3,0	Нет данных	25,0 Ж	3,8	10,8	2,6	1,04
К 9269.4	4	6	354	–36	–4,1	–57,7	30,2 Ж	8,2	3,6	6,1	0,92
	1	12	–	–	–	–57,6...–57,0	–2,8...+18,5 Ж	–	–	–	0,94–0,79
	3	14	175–146	Нет данных	(284–200)	–	–	–	37,0–31,9	–	1,09–1,12
	2	43	144–226	–64...–67	–22,4...–34,8	–	–	–	(22,3–26,2)	–	1,02–1,12
К 9907.5	3	30	185–59	–64	(231–123)	–	–	–	33,5–28,7	–	1,11–1,16
	2	56	185–137	–74...–64	–63,0...–33,0	–	–	–	(30,2–25,9)	–	1,09–1,15
	4	3	329	–30	–5,4	–57,0	27,5 Ж	7,7	4,5	6,3	0,92
	1	185	Нет данных	–	–4,3...–3,1	–58,9...–57,1	–6,1...+22,7 Ж	8,3–7,9	4,1–3,4	–	0,96–0,74
К 10179.1	3	12	228–200	Нет данных	(381–314)	–	–	–	45,4–39,3	–	1,24–1,09
	2	28	217–172	–68...–64	–33,2...–20,7	–	–	–	(26,0–21,6)	–	1,02–1,08
К 10205.8	1	234	–	–	–	–59,3...–57,3	30,5 Г...–30,3 Ж	–	–	–	0,37–1,08
	4	17	314–277	–60...–30	–12,8...–4,6	–59,3...–57,5	3,4...–17,5 Ж	4,5–5,2	16,3–14,8	5,3–3,1	1,09
К 10331.2	4	49	345–269	–46...–36	–6,7...–3,7	–57,0...–56,7	+2,5...+25,0 Ж	2,6–5,4	12,5–8,4	7,1–4,9	0,98–1,04
	1	20	–	–	–	–57,1...–56,7	–1,9...+27,7 Ж	–	–	–	0,66–0,94
	4	4	223	–42	–16,6	Нет данных	30,8 Ж	Нет данных	18,8	1,3	1,12
10583.5	1	72	–	–	–	–57,8...–57,2	–45,0...+4,2 Ж	–	–	–	1,14–0,90
10690.0	1	40	–	–	–	–57,8...–57,1	–15,0...+12,9 Ж	–	–	–	1,01–0,84
	3	6	264–180	Нет данных	(299–238)	–	–	–	38,1–33,9	–	1,12–1,16
10744.9	1	98	–	–	–	–58,2...–57,4	–21,4...–8,9 Ж	–	–	–	1,04–0,98

Примечание. Типы флюидных включений: 1 — однофазовые газовые, 2 — двухфазовые газовой-жидкие, 3 — трёхфазовые с кристаллом NaCl, 4 — углекислотно-водные (двух- и трёхфазовые); *n* — количество изученных включений; Ж — гомогенизация углекислоты в жидкость; Г — в газ; *d* — плотность флюида.

Таблица 2. Результаты КР-микроанализа газовых включений, мол. %

Образец К	<i>n</i>	CO ₂	N ₂
9052.6	3	98,7–99,6	0,4–1,3
9907.5	2	99,7	0,3
10205.8	3	98,1–99,5	0,5–1,9
10331.2	3	99,5–99,6	0,4–0,5
10583.5	3	98,9–99,2	0,8–1,1
10744.9 1	2	99,4–99,5	0,5–0,6

Примечание. H₂SO₄ — 0,0, CH₄ — 0,0; *n* — количество изученных включений.

Двухфазовые флюидные включения типа 2, судя по данным криометрических исследований, являются хлоридными рассолами, содержащими кроме NaCl хлориды и бромиды кальция и натрия (температуры эвтектики от –68 до –74 °С) с концентрацией солей 21,6–30,2 мас. %-экв. CaCl₂ (температура плавления льда от –20,7 до –63,0 °С), температурой гомогенизации 137–228 °С и плотностью 1,02–1,15 г/см³.

Трёхфазовые включения типа 3 гомогенизируются в жидкость при температурах 123–381 °С, содержат хлориды натрия и кальция (температура эвтектики около –64 °С) с концентрацией солей 25,9–45,4 мас. %-экв. NaCl. Плотность хлоридного рассола 1,09–1,24 г/см³.

Включения углекислотно-водных флюидов гомогенизируются при температурах 203–356 °С и содержат водно-солевой раствор хлоридов натрия, кальция и железа (температура эвтектики от –30 до –60 °С) с концентрацией солей 3,6–18,8 мас. %-экв. NaCl и углекислоты 1,3–7,1 моль/кг раствора. Плотность флюида 0,92–1,12 г/см³.

Достоверно определить наличие ассоциаций флюидных включений пока не удалось. Учитывая глубину их захвата с учётом эрозийного среза (порядка 17 км), можно ожидать, что температура захвата включений превышала максимальные температуры гомогенизации вследствие высокого давления.

Флюидные включения разных типов имеют разное распределение в пространстве. Углекислотные включения типа 1 встречены практически во всех изученных образцах, кроме 10179.1. Включения рассолов типов 2 и 3 широко представлены в кварце из образцов 9269.4, 9907.5 и 10179.1, небольшое количество обнаружено в кварце образцов 10330.1 и 10690.1 и совсем не встречены в кварце образцов 10205.8, 10583.5 и 10744.9. Углекислотно-водные включения типа 4 обильны в кварце образцов 9052.6, 10179.1, 10330.1, редко встречаются в образцах 9269.4, 9907.5 и 10205.8 и отсутствуют в кварце образцов 10583.5 и 10744.9. Все они похожи по составу и могут быть частями единого потока углекислоты из глубины. Интересно, что в середине золотоносного интервала плотность углекислоты резко уменьшается, что может быть вызвано тектоническими причинами и связано с падением давления (рис. 3).

Валовый состав флюидов из пяти проб кварца был проанализирован по методике [5] и в целом согласуется с данными микротермометрических исследований. Высокие концентрации хлора (75–290 г/кг р-ра) обнаружены в пробах из средней части изученного интервала (образцы 9269.4, 9907.5 и 10179.1). В них же обнаружены высокие концентрации брома — 4–6 г/кг р-ра. В пробах 9052.6 и 10330.1 концентрации хлора меньше предела обнаружения. В большинстве анализов фиксируются высокие концентрации золота — 500–1000 ppm.

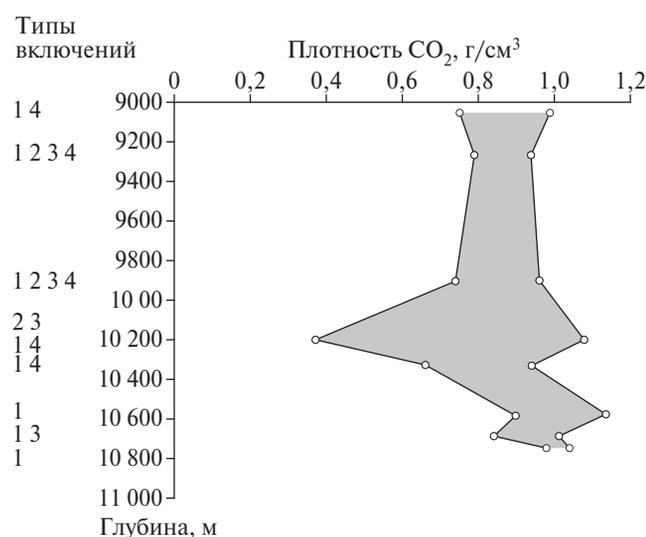


Рис. 3. Распределение разных типов флюидных включений и плотностей углекислоты в газовых включениях типа 1 по глубине. Типы флюидных включений: 1 — газопые, 2 — двухфазовые газопо-жидкие, 3 — трёхфазовые с кристаллом галита, 4 — двух- и трёхфазовые углекислотно-водные.

Первые данные оценки концентраций золота в индивидуальных включениях [6] подтвердили высокие концентрации золота.

Поскольку газопые включения плотной углекислоты встречаются по всему изученному интервалу, в том числе гипсометрически ниже, чем включения углекислотно-водных флюидов, то они не могли образоваться при фазовой сепарации последних. Можно предполагать взаимодействие потока глубинной углекислоты с рассолами в интервале глубин 10 205–9269 м, вызванного тектоническими причинами. Углекислотно-водный флюид мог образоваться в результате такого взаимодействия вследствие растворения воды в углекислоте, как показано в работе [7], что сопровождалось увеличением солёности рассолов. Изученная область, соответствующая глубинам средней коры, отвечает уровню мобилизации флюидов орогенных месторождений золота [8]. Однако представительная оценка содержания золота во флюидных включениях орогенных месторождений золота 0,5–5 ppm [9] более чем на 2 порядка ниже содержания золота в изученных включениях СГ-3. По результатам экспериментального изучения содержания золота в синтетических флюидных включениях его концентрация в растворах NaCl при температуре 600 °C и давлении 1,5 кбар может превышать 1000 ppm [10]. При этом отмечается положительная температурная зависимость растворимости золота с увеличением его содержания на порядок на 100 °C увеличения температуры. В приведённой выше оценке представительного содержания золота во флюидах орогенных месторождений значение 0,5–5 ppm отвечает 350 °C [8]. Захват флюидных включений в кварце СГ-3 происходил при температуре на несколько сотен градусов выше, чем температура их гомогенизации, согласно оценкам палеоглубины (17 км) и связанным с этим высоким давлениям, а также учитывая температуры регионального метаморфизма (500–650 °C). Такой высокотемпературный флюид являлся потенциально золотоносным. Это подтверждается выявлением “аномальных” содержаний Au (500–1000 ppm) в составе флюидных включений СГ-3 и не противоречит экспериментальным данным. Присутствие высоких содержаний Au в составе флюидных включений в кварце, который кристаллизовался на глубине 17 км при температуре 500–600 °C, авторы интерпретируют как пример мобилизации золота в корнях рудообразующих гидротермальных систем орогенных месторождений. Образующийся при этом обогащённый золотом углекислотно-водный флюид при восходящем движении переносил рудную нагрузку выше по разрезу. При снижении температуры

и давления флюида в ходе подъема выше по разрезу происходила его конденсация с образованием двух фаз (газовой и углекислотно-водной), которые по своему фазовому составу соответствуют гетерогенным слабосоленым углекислотно-водным флюидам, формирующим типичные орогенные месторождения золота [8–11]. Растворимость золота при этом резко уменьшалась, и происходило его осаждение. Такой процесс мог обусловить формирование золоторудной минерализации Южно-Печенгской структурной зоны, которая относится к орогенному типу.

Полученные данные свидетельствуют о формировании золотой минерализации нижней части Кольской сверхглубокой скважины потоком глубинных флюидов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18–05–70001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. М.: Недра, 1984. 490 с.
2. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. М.: Технонефтегаз, 1998. 260 с.
3. Казанский В.И., Новгородова М.И., Смирнов Ю.П. и др. // Геология руд. месторождений. 1989. Т. 31. № 6. С. 75–82.
4. Козловский Е.А., Губерман Д.М., Казанский В.И. и др. // Сов. геология. 1988. № 9. С. 3–11.
5. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2006. № 4. С. 30–36.
6. Prokofiev V.Yu., Banks D.A., Lobanov K.V., et al. // Bull. Geol. Soc. Finland. Spec. Vol. Abstrs 32nd Nordic Geol. Winter Meeting 13th–15th January 2016, Helsinki. Helsinki: Geol. Soc. of Finland, 2016. P. 117–118.
7. Прокофьев В.Ю., Акинфиев Н.Н., Селектор С.Л. // Геохимия. 2016. № 5. С. 427–438.
8. Goldfarb R.J., Groves D.I. // Lithos. 2015. V. 233. P. 2–26.
9. Garofalo P.S., Fricker M.B., Gunther D., et al. // Gold-Transporting Hydrothermal Fluids in the Earth's Crust // Geol. Surv. London. Spec. Publ. 402. <http://dx.doi.org/10.114/SP402.8>
10. Hanley J.J., Pettke T., Mungall J.E., et al. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. № 10. P. 2593–2611.
11. Ridley J.R., Diamond L.W. // Gold in 2000 // SEG Revs. 2000. V. 13. P. 141–162.

ORE-FORMING FLUIDS OF THE GOLD-BEARING INTERVAL OF THE KOLA SUPERDEEP BOREHOLE

V. Yu. Prokofiev¹, Corresponding Member of the RAS K. V. Lobanov¹,
A. A. Pek¹, M. V. Chicherov¹, A. A. Borovikov²

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

Received September 12, 2018

This paper reports on the physical–chemical parameters and vertical distribution of different types of fluid inclusions in quartz from the Au-bearing interval of the Kola Superdeep Borehole. We assume that gold ore mineralization was formed when a deep flux of CO₂ interacted with brines at depths of 10 205–9269 m due to tectonic factors. In this paper, we discussed the role of these processes in the formation of the orogenic gold deposits including the gold mineralization of the Southern Pechenga structural zone.

Keywords: fluid inclusions, gold, ore-forming fluid, Kola superdeep borehole.