

## САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО ИЗ МУТНОВСКОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ, ЮГО-ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА

Е.А. Борисова

УРАН Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, [elborisminmusfer@mail.ru](mailto:elborisminmusfer@mail.ru)

Описано самородное золото из гидротермального рудопроявления Юго-Восточной Камчатки. По данным микрозондового анализа, содержание серебра в нем варьирует от 14.4 до 32.0%, кроме того, в состав минерала входят Bi, Te и Se. Выявлено неоднородное строение золотин, с которым, очевидно, связана пониженная микротвердость минерала. Сделан вывод о зависимости физических свойств этого минерала от его состава и условий образования.

В статье 3 таблицы, 5 рисунков, список литературы из 14 названий.

Ключевые слова: самородное золото, гидротермальные золоторудные месторождения, Мутновское рудопроявление, Юго-Восточная Камчатка.

### Краткая геологическая характеристика района рудопроявления

Мутновское рудопроявление расположено в эрозионно-тектонической кальдере позднемиоцен-плейстоценового палеовулкана Юго-Восточной Камчатки (Апрелков, Шеймович, 1964; Апрелков, Харченко, 1968). Район рудопроявления имеет двухъярусное геологическое строение (Лоншаков, 1979). Нижний структурный ярус слагают олигоцен-миоценовые вулканогенные и вулканогенно-осадочные отложения и рвущие их интрузивные тела. Породы нижнего яруса являются собственно рудовмещающими. Вулканогенные образования — мелкообломочные туфы среднего и кислого состава, переслаивающиеся с потоками андезитов и андезито-базальтов — развиты в центральной части кальдеры. Там же располагается интрузивный массив сложного строения, состав которого варьирует от кварцевых диоритов до габбро-диабазов. Массив насыщен рвущими его дайками дацитов и кварцевых порфиров. Вулканогенно-осадочные отложения — туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты — распространены в северо-восточной части кальдеры. Породы верхнего структурного яруса — верхнемиоцен-плиоценовые и нижнеплейстоценовые вулканы — перекрывают породы нижнего яруса с резким угловым и азимутальным несогласием и слагают периферийные части кальдеры. Они представлены лавами базальтов, андезито-базальтов, их туфами и туфами липаритов.

Все рудовмещающие породы в той или иной степени гидротермально изменены. Проведенный анализ химического состава гидротермально измененных пород, отобранных вкрест простирания рудного тела,

показал, что для процесса переработки габбро-диоритов интрузивного массива характерно образование пропилитов. Они формируются в результате калиевого метасоматоза с привнесением  $K_2O$  и  $SiO_2$  и выносом  $Na_2O$  и  $CaO$ , что следует из сравнения состава их наиболее измененных и наиболее «свежих», удаленных от рудного тела, разностей (табл. 1, ан. 1–7). Для туфов и андезитов более выражены процессы аргиллизации, когда выносятся и  $K_2O$ , и  $Na_2O$ , и  $CaO$ , а накапливается только  $SiO_2$  (табл. 1, ан. 8–13).

Рудные тела представлены гидротермальными жилами и прожилками, иногда чередующимися с участками практически нацело переработанных и окварцованных вмещающих пород. Рудные тела, как правило, имеют субмеридиональное, северо-западное и северо-восточное простирание. Падение крутое, близкое к вертикальному, мощность меняется от нескольких сантиметров до нескольких метров. Наиболее крупное рудное тело достигает 2–3 м, иногда в местах раздувов и разветвления на серию жил и прожилков мощность его увеличивается (до 10–15 м в верхних частях на северном фланге). На глубине пучки и серии жил обычно сменяются одной или двумя одиночными жилами, что, по мнению некоторых авторов (Некрасов, 1976), типично для золоторудных месторождений малых глубин.

По составу среди рудных тел выделяются кварцевые, кварц-сульфидные и кварц-карбонатные жилы, причем на южном фланге описываемого рудопроявления преобладают кварц-сульфидные жилы, а на северном — кварцевые и кварц-карбонатные. Из сульфидов наиболее распространены пирит, сфалерит и галенит (Борисова и др., 1983). Встречаются также халькопирит, блеклые руды, иногда наблюдались люционит, гессит, алтаит,

Таблица 1. Химический состав гидротермально измененных рудовмещающих пород Мутновского рудопоявления (мас.%)

№ ан.	d, м	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	S <sub>общ.</sub>	п.п.	Сумма
Профиль 1																
1	550	51.00	0.68	23.10	3.79	3.52	0.14	2.23	10.21	3.18	0.77	0.14	1.17	0.07	—	100.00
2	5.5	51.96	1.03	17.10	4.27	4.69	0.33	5.17	8.94	3.17	1.38	0.22	—	н.о.	1.64	99.90
3	4.5	49.16	1.13	16.36	3.93	4.90	0.62	0.88	16.30	2.30	1.38	0.26	—	н.о.	2.80	100.03
4	2.5	53.36	1.55	12.70	7.69	2.43	1.95	6.51	1.41	0.61	2.58	0.26	—	н.о.	8.26	99.31
5	1.5	51.25	1.74	17.19	1.78	8.15	0.68	1.76	7.36	2.30	2.40	0.21	—	н.о.	4.60	99.42
6	0.5	63.51	0.83	12.02	7.87	0.07	0.86	2.29	1.78	0.74	2.28	0.26	—	н.о.	6.85	99.36
7	0.05	57.94	0.94	15.93	4.93	0.74	1.49	4.81	1.34	1.08	4.74	0.30	—	н.о.	6.53	100.77
Профиль 2																
8	5.3	74.80	0.65	13.60	0.54	0.23	0.042	0.40	0.05	0.12	6.69	0.036	1.98	0.08	—	99.22
9	4.3	72.60	0.41	14.90	0.44	0.26	0.078	0.43	0.05	0.10	7.78	0.052	1.92	0.05	—	99.07
10	3.3	75.80	0.78	10.40	3.80	0.18	0.080	0.65	0.09	0.05	3.70	0.140	3.12	0.34	—	99.13
11	2.3	84.20	0.80	8.60	0.31	0.15	0.091	0.53	0.05	0.025	2.11	0.060	2.24	0.03	—	99.20
12	1.3	89.60	1.04	5.70	0.02	0.17	0.068	0.31	0.05	0.016	1.35	0.026	1.52	0.02	—	99.89
13	0.4	94.60	1.15	1.30	0.13	0.06	0.017	0.06	0.05	0.029	0.22	0.028	1.49	0.02	—	99.15

Примечание: d — расстояние от рудного тела в метрах. н.о. — не определялось. Ан. № 1–7 — слабо измененные габбро-диориты и прожилы по габбро-диоритам; анализы выполнены в спектрохимической лаборатории МГУ им. М.В. Ломоносова, аналитик В.Н. Жихарева. Ан. № 8–13 — аргиллизированные туфы и андезиты; анализы выполнены в центральной аналитической лаборатории ГЕОХИ РАН, аналитики Е.В. Безрогова и Н.В. Бугарина.

сульфидит, прустит, пираргирит, селенитые разновидности берриита и купропавонита (Борисова и др., 1986, Борисова, Мешалкин, 1991).

## Результаты изучения самородного золота

Самородное золото обнаружено нами в протолочках руд из наиболее крупного рудного тела. Золото представлено очень мелкими (0.01 мм и менее) пленочными, комковидными и интерстициальными выделениями в кварце. Реже оно встречается в виде индивидуальных обособлений, размером 0.01–0.1 мм. Такие зерна обычно имеют уплощенную, дендритовидную, проволочкообразную или изометричную форму. Цвет золотин преимущественно желтый, иногда с красноватым или беловатым оттенком.

Изучение морфологии золотин с помощью сканирующего электронного микроскопа показало, что на поверхности уплощенных и дендритовидных зерен часто находятся обособленные ровные площадки или ступенчатые участки (рис. 1). При больших увеличениях хорошо различимо субблоковое или зернистое строение некоторых золотин. Кроме того, в золотинах встречались недиагностируемые включения губчатых или ячеистых фаз (рис. 2). В отдельных случаях на контактах блоков находились более светлые

«прожилки», возможно, представленные золотом более высокой пробы (рис. 3). В интерстициях кварца золотины имеют извилистые границы, повторяющие контуры его зерен, либо напоминают амебовидные нащепки на его поверхности (рис. 4).

Указанные особенности строения — зернистые и субблоковые структуры, ступенчатый рельеф, фазовая неоднородность — характерны для самородного золота вообще, тогда как тонкодисперсность его выделений и ультрамикроскопические размеры отдельных элементов структуры свойственны этому минералу из руд малоглубинных месторождений (Петровская, 1973, Новгородова, 1983). Взаимоотношения золота с кварцем свидетельствуют о том, что оно отлагалось чуть позже, чем ассоциирующий с ним кварц, и одновременно с ним.

В состав изученного золота входит до 32% Ag и незначительное количество Bi, в единичных случаях установлены Te и Se (табл. 2). Вхождение висмута, по данным Н.В. Петровской (Петровская, 1980), более типично для золота среднеглубинных месторождений, а примеси в нем Te и Se — типоморфный признак малоглубинных руд. По своей пробе золото Мутновского рудопоявления отвечает наиболее распространенному в природе (Петровская, 1973), при этом самой высокопробной оказалась одна из наиболее мелких золотин (табл. 2, ан. 3). Зональности в распределении Au и Ag в пределах

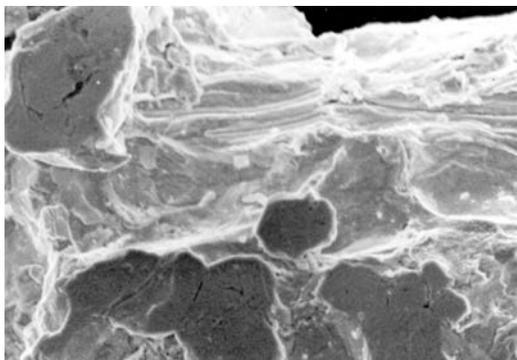
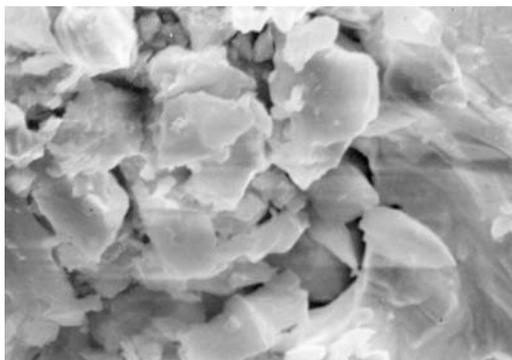
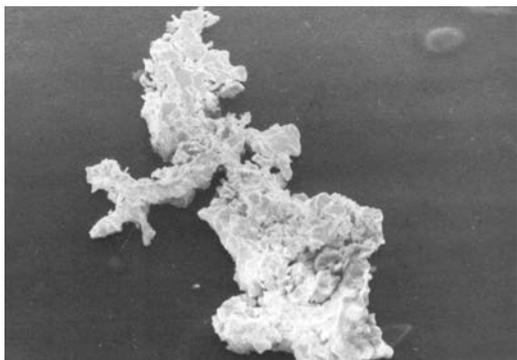


Рис. 1. Форма выделений и детали строения самородного золота Мутновского рудопроявления, выявленные с помощью сканирующего электронного микроскопа: а – общий вид золотины № 1 (табл. 2, ан. 1),  $\times 350$ ; б – зернистая структура золотины № 1,  $\times 3500$ ; с – ступенчатый рельеф золотины № 2 (табл. 2, ан. 2),  $\times 1500$ .

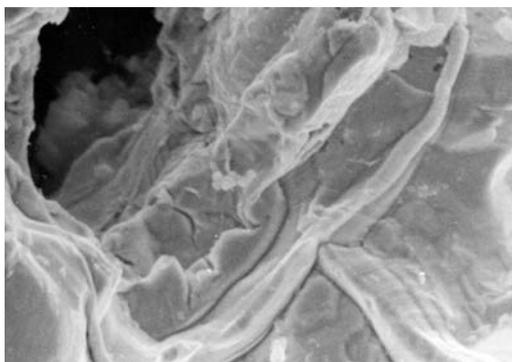
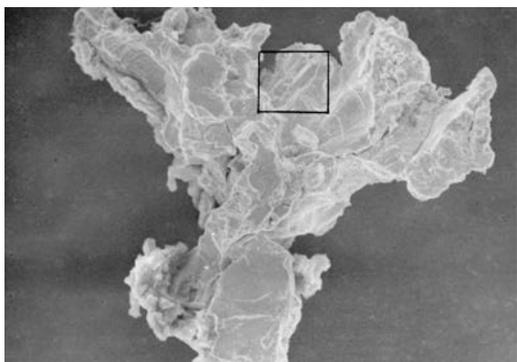
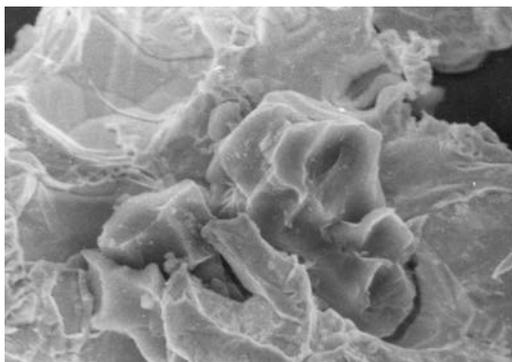
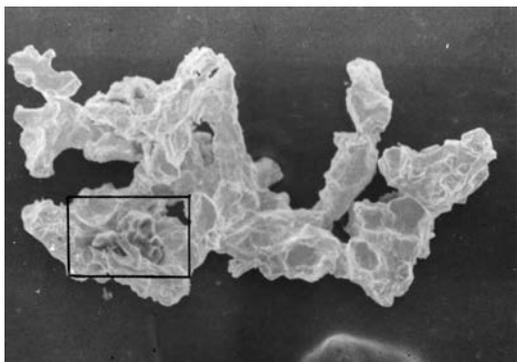


Рис. 2. Включение ячеистой фазы в самородном золоте: а – общий вид золотины № 3 (табл. 2, ан. 3),  $\times 500$ ; б – участок с ячеистой фазой,  $\times 2000$ .

Рис. 3. Субблоковое строение самородного золота: а – общий вид золотины № 4 (табл. 2, ан. 4),  $\times 500$ ; б – участок со светлыми «прожилками» (возможно, более высокопробного золота) на границе блоков,  $\times 3500$ .

Таблица 2. Состав самородного золота, мас.%

№ ан.	Размер золотин, мкм	Au	Ag	Bi	Сумма	Проба
1	5	78.8	19.5	н.о.	98.3	802
2	100	79.7	19.3	н.о.	99.0	805
3	5	82.4	14.4	н.о.	96.8	851
4	10	74.4	22.8	н.о.	97.2	765
5	10	75.0	22.9	н.о.	97.9	766
6	20–30	68.3	28.7	0.4	97.4	701
7	20–30	64.1	32.0	0.6	96.7	663
8	20–30	66.4	29.2	0.7	96.3	690
9	20–30	67.9	27.7	0.5	96.3	705
10	20–30	69.0	27.1	0.6	96.7	714
11	20–30	66.1	29.3	0.5	96.0	689

Примечание: ускоряющее напряжение 25 кВ, эталоны – чистые металлы (Au, Ag, Cu,), PbTe (Te), ZnSe (Se).

Ан. № 1–5 – микрозонд JXA-50А, Cu, Bi, Te, Se – не определялись (н.о.), аналитик Л.Т. Сошкина; ан. № 6–11 – микрозонд Camebax-244, Cu, Se, Te, Zn, Pb, Fe, Sn, Sb – не обнаружены, за исключением ан. № 9 (0.1 мас. % Se, 0.1 мас. % Te) и ан. № 11 (0.1 мас. % Te), аналитик В.М. Чубаров. Низкие суммы в анализах, очевидно, связаны с мелкими размерами золотин.

Таблица 3. Результаты расчета рентгенограммы самородного золота

Данные автора		A.S.T.M., № 4-0786		
$a_0 = 4.076 \text{ \AA}$		$a_0 = 4.0786 \text{ \AA}$		
$I$	$d$	$I$	$d$	$hkl$
100	2.349	100	2.355	111
50	2.035	52	2.039	200
40	1.438	32	1.442	220
60	1.227	26	1.230	311
45	1.178	12	1.1774	222
10	1.0185	6	1.0196	400
30	0.9338	23	0.9358	331
40	0.9116	22	0.9120	420
		23	0.8325	422

Примечание: условия съемки – дифрактометр ДРОН-1, Со-излучение, внутренний эталон – кварц. Параметр элементарной ячейки определен прецизионным методом. Аналитик Е.А. Борисова.

золотин при исследовании их на микрозонде выявлено не было, хотя не исключено, что фазовая неоднородность, обнаруженная под электронным микроскопом, может быть обусловлена различной концентрацией Ag в этих участках. Например, включения губчатой или ячеистой фазы, возможно, представлены более серебристым золотом, поскольку выглядят более темными (рис. 2), и, значит, соответствуют более «легкой» фазе, а светлые «прожилки» на контакте блоков (рис. 3) – золотом более высокой пробы по сравне-

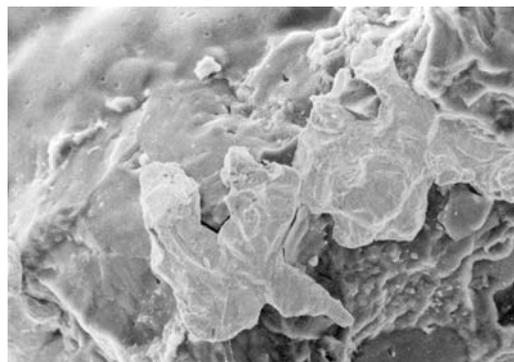
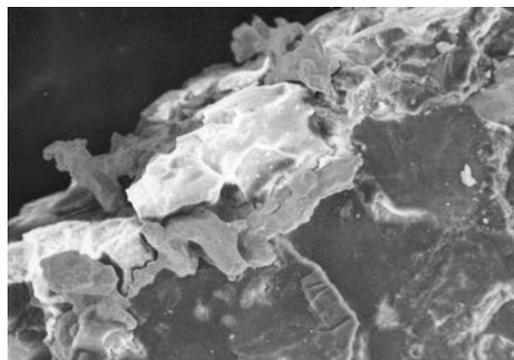
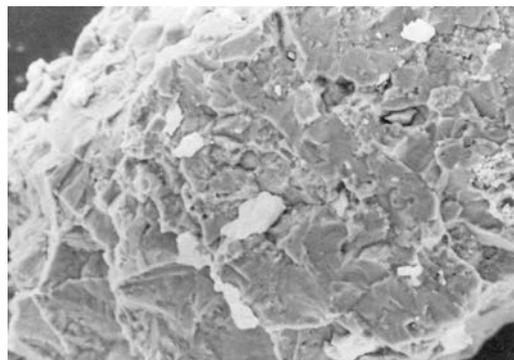


Рис. 4. Взаимоотношения самородного золота и кварца (сканирующий электронный микроскоп; белое и светло-серое – самородное золото, темно-серое – кварц). а, b –  $\times 350$ ; с –  $\times 750$ .

нию с матрицей, которое образовалось за счет пострудной или внутрирудной перегруппировки вещества. Но не исключено, что это могут быть и другие минералы, в частности, содержащие висмут или теллур.

Межплоскостные расстояния самородного золота приведены в таблице 3. Параметр элементарной ячейки составляет  $4.076 \text{ \AA}$ . Это значение соответствует золотосеребряным сплавам, содержащим около 70 ат. % Au (Моисеенко, 1977), и, следовательно, согласуется с составом описываемого золота.

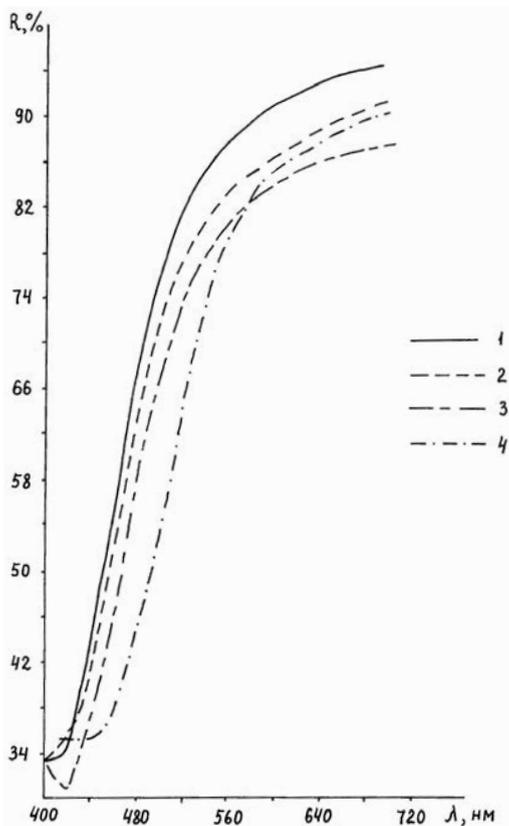


Рис. 5. Спектральные кривые отражения самородного золота Мутновского рудопоявления: 1 и 2 — золотина № 2 (табл. 2, ан. 2); 3 — золотина № 3 (там же, ан. 3); 4 — литературные данные для самородного золота (Определение..., 1973).

Микротвердость, измеренная для самой крупной золотины (табл. 2, ан. 2), находится в пределах  $15 - 20 \text{ кгс/мм}^2$  (ПМТ-3, нагрузка 5 г, 3 измерения), что значительно ниже, чем указывается в литературе (Петровская, 1980, Моисеенко, 1977). Вероятно, это связано с неоднородным строением золотинок, которое было выявлено при исследовании их под электронным микроскопом. Кроме того, нельзя не учитывать то, что Мутновское рудопоявление находится в молодом, тектонически активном до настоящего времени регионе (Округин и др., 2010). Поэтому представляется возможным, что руды, и в том числе золото, неоднократно подвергались пострудному воздействию колебаний температуры, обусловленных термоаномалиями, широко проявленными как в регионе в целом, так и в пределах рудопоявления. Воздействие повышенных температур могло приводить к перекристаллизации золотинок и разупорядочению их структуры. Подобные предположе-

ния о связи снижения твердости золотинок, находившихся в областях прогрева около даек и интрузивов, с явлением разупорядочения их структуры в процессе перекристаллизации высказаны Н.В. Петровской (Петровская, 1973). По данным В.Г. Моисеенко (Моисеенко, 1977), сплавы золота с серебром, нагретые до высокой температуры и быстро охлажденные, являются более мягкими и пластичными, чем сплавы, длительно нагревавшиеся при низких температурах и медленно охлажденные.

Спектральные кривые отражения, полученные для двух золотинок (табл. 2, ан. 2 и ан. 3), показаны на рисунке 5. Исходя из частной дисперсии  $a = R_{640}/R_{480}$  и графика зависимости  $a$  от пробности золота (Определение..., 1973), проба второй золотины (ан. 3) выше, чем первой (ан. 2), что соответствует данным микрозондового анализа. Однако, абсолютные значения пробности, определенные по графику (760 — 770 для первой золотины и 800 — для второй), несколько ниже, чем полученные на микрозонде (табл. 2). Формы спектральных кривых отражения этих двух золотинок также имеют некоторые отличия, согласующиеся с их пробностью: у второй золотины (ан. 3) кривая имеет минимум при 420 нм и более плавный подъем в области красных длин волн, что характерно для более высокопробного золота.

## Выводы

Таким образом, золото Мутновского рудопоявления характеризуется очень мелкими размерами выделений, их сложной морфологией, неоднородным строением, наличием включений недиагностированных фаз. Проба изученных золотинок лежит в пределах 660 — 850, что отвечает наиболее распространенным в природе золотосеребряным сплавам. Помимо серебра, содержание которого варьирует от 14.4 до 32.0%, в состав минерала входят Вi, Те и Se. Физические свойства самородного золота тесно взаимосвязаны с его составом и сложным строением зерен. По своим особенностям (состав, строение и физические свойства) золото описываемого рудопоявления соответствует золоту малоглубинных гидротермальных месторождений (Петровская, Сафонов, 1976), образовавшееся в условиях быстрой смены температурного режима.

## Литература

Апрелков С.Е., Шеймович В.С. Древний вулкан Юго-восточной Камчатки с современ-

- ными гидротермальными проявлениями // Бюлл. вулканолог. станций. **1964**. № 36. С. 60–66.
- Апрелков С.Е., Харченко Ю.И.* Золото-полиметаллические и золото-серебряные рудопоявления Южной Камчатки // Геол. рудн. месторожд. 1968. № 5. С. 109–112.
- Борисова Е.А., Мешалкин С.С.* Новые селенитые разновидности купропавонита и берриита // Докл. АН СССР. **1991**. Т. 316. № 2. С. 455–459.
- Борисова Е.А., Борогаев Ю.С., Бочарова Г.И.* Редкие разновидности блеклых руд одного из золоторудных месторождений // Зап. ВМО. **1986**. Ч. 65. Вып. 1. С. 63–72.
- Борисова Е.А., Бочарова Г.И., Кривицкая Н.Н., Чернышева Е.В.* Пирит и его минеральные ассоциации в рудах кварц-сульфидного месторождения // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. **1983**. № 5. С. 43–50.
- Лоншаков Е.А.* Ряды вулканно-тектонических структур и структурно-вещественные парагенезисы Южно-Камчатского района // Бюлл. вулканолог. станций. **1979**. № 57. С. 79–91.
- Моисеенко В.Г.* Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, **1977**. 304 с.
- Некрасов Е.М.* Вертикальная структурная зональность на месторождениях золота с рудными телами жильного и прожилково-го типа // Известия АН СССР. Сер. геолог. **1976**. № 3. С. 111–125.
- Новгородова М.И.* Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, **1983**. 288 с.
- Округин В.М., Андреева Е.Д., Ким А.У., Пузанков И.М., Шишканова К.О., Матсуега Х., Оно Ш., Такахаши Р., Ватанабе К.* Вулканогенные гидротермальные месторождения зоны перехода континент-океан (Камчатка, Япония) // Фундаментальные проблемы геологии месторождений полезных ископаемых и металлогении. Материалы XXI Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика В.И. Смирнова, 26–28 января 2010 г. М.: МГУ, **2010**. С. 47–48.
- Определение рудных минералов в полированных шлифах по спектрам отражения и твердости. М.: Недра, **1973**. 224 с.
- Петровская Н.В.* Самородное золото. М.: Наука, **1973**. 348 с.
- Петровская Н.В.* Современные исследования типоморфизма самородного золота // Новые данные о типоморфизме минералов. М.: Наука, **1980**. С. 25–43.
- Петровская Н.В., Сафонов Ю.Г., Шер С.Д.* Формации золоторудных месторождений // Рудные формации эндогенных месторождений. М.: Наука, **1976**. Т. 2. С. 3–111.