

*А.М. Юминов<sup>1,2</sup>, Д.А. Жеребцов<sup>2</sup>,  
В.В. Зайков<sup>1,2</sup>, Е.В. Зайкова<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> – Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс*

*<sup>2</sup> – Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе  
umin@mineralogy.ru*

## **О взаимодействии микровключений осмия с золотым расплавом в золотом венке из Фанагории (Боспорское царство)**

Начиная с 1972 г. появились работы, посвященные исследованию микровключений зерен платиноидов в древних золотых украшениях из Египта, Ирака, Сирии, Палестины, Кипра, Турции, Греции [Young, 1972; Whitmore, Young, 1973; Ogden, 1977; Craddock, 2000; Yansen et al., 2016]. Микровключения являются «твердыми растворами» Os-Ir-Ru-Pt-Rh и поступали в изделия из россыпей. С 2008 г. в Институте минералогии УрО РАН началось систематическое изучение подобных артефактов в археологическом золоте, извлеченном из курганов и захоронений Южного Урала, а позднее Алтая, Тувы, древних городов Гонур (Туркмения) и Фанагория (Причерноморье) [Зайков и др., 2016].

Целью работы является изучение процесса взаимодействия микровключения осмия с вмещающим золотом в листке погребального венка, взятого в кургане «Сенной 321», обр. 138с (Фанагория) и сравнение результатов, полученных двумя электронными микроскопами. На приборе РЭММА-202М (аналитик В.А. Котляров) предварительные исследования выполнены в 2014 и 2015 гг. Для уточнения полученных результатов проведены работы на электронном микроскопе JEOL JSM-7001F (аналитик Жеребцов Д.А.) в 2016 г. Микрозондовый анализ проводился на полированных препаратах; полировка велась с помощью алмазных паст. Сравнение полученных данных проведено с помощью диаграмм системы Os-Ir-Ru [Harris, Cabri, 1991].

Выполненный ранее анализ типоморфизма микровключений в древнем золотом расплаве позволил выделить две основные группы частиц: первичные и вторичные [Зайков и др., 2014]. Первые характеризуются относительно крупными размерами (10–100 мкм) и не содержат следов воздействия расплава, т.к. платиноиды химически инертны и тугоплавки. Вторые сопровождают крупные индивиды и находятся в золотом расплаве на периферии первичных зерен. Частицы наноразмерны (0.0п–1 мкм) и имеют крайне непостоянный химический состав. Судя по расположению и микротекстурным особенностям, их образование вызвано растрескиванием микровключений под воздействием золотого расплава с последующим изменением химизма.

Вмещающее золото имеет состав (мас. %): Au 97, Ag 0.3, Cu 0.3, Os 1.6, Ru 0.3. Присутствие в золоте металлов платиновой группы обусловлено одиночными микровключениями платиноидов величиной менее 0.5 мкм.

Результаты работ 2014 г. основаны на данных 4 анализов состава, полученных на электронном микроскопе с ЭДС РЭММА-202М и показавшим вынос осмия из микровключений [Зайков и др., 2015]. В 2015 г. по данным 9 анализов (РЭММА-202М) выделено поле, в котором закономерно уменьшается содержание осмия и повышается содержание рутения во вторичных микровключениях [Зайков и др., 2016]. В результате работ 2016 г. было получено 29 анализов микровключений прибором JEOL JSM-7001F.

Исследованное первичное микровключение осмия представляет собой зерно таблитчатой формы размером 30 × 15 мкм, в котором при геохимическом картировании выяв-

лена зональность (рис. 1А). Состав выделенных зон слабо отличается (табл. 1), причем в них выявлено золото, присутствующее в микропросечках. Как показало изучение первичных микровключений в артефактах из Филипповки 1, такие прожилки мощностью 0.0п–1.5 мкм, в основном, сосредоточены на периферии зерен и имеют непосредственный контакт с вмещающим золотом.

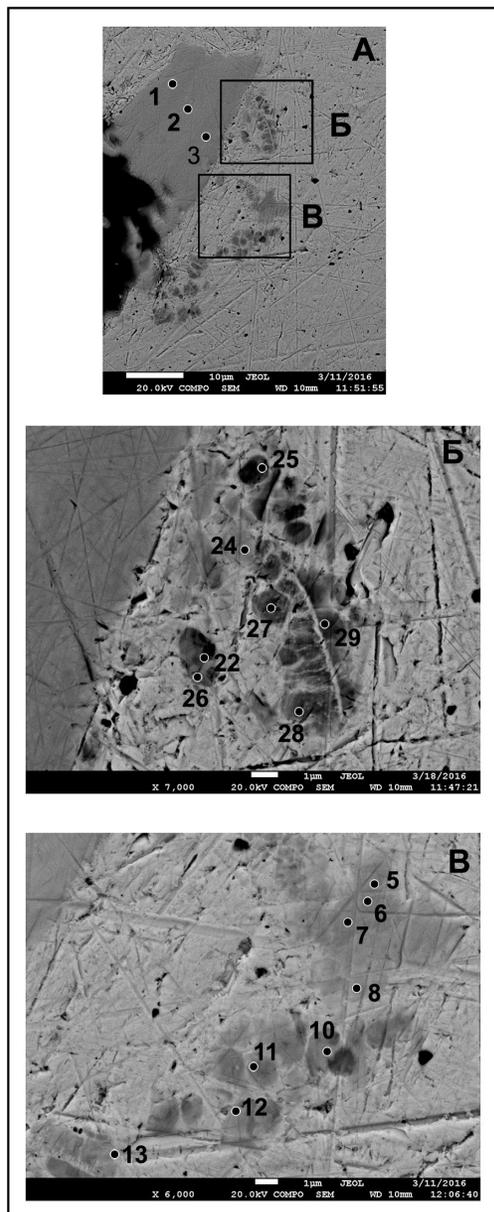


Рис. 1. Микровключения платиноидов в золотом листке погребального венка. Фанагория, курган Лесной 321, обр. 138с.

А – общий вид первичного микровключения, сопровождающегося микровключениями вторичными; Б–В – вторичные микровключения.

Химический состав микровключений платиноидов в листке погребального венка из Фанагории (курган Сенной 321, обр. 138с)

Характеристика участка	№ анализа	Os	Ir	Ru	Fe	Cu	Au	Сумма, %	Формула	Наименование
Обломок зонального первичного зерна с просечками золота	1	40.19	37.39	20.46	0.57	—	1.39	100	$Os_{0.34}Ru_{0.33}Ir_{0.31}Fe_{0.02}$	Осмий иридиево-рутениевый
	2	40.88	38.22	18.05	0.27	—	2.59	100	$Os_{0.36}Ir_{0.33}Ru_{0.30}Fe_{0.01}$	Осмий рутениево-иридиевый
	3	41.82	36.37	20.63	0.54	—	0.64	100	$Os_{0.35}Ru_{0.33}Ir_{0.30}Fe_{0.02}$	Осмий иридиево-рутениевый
Вторичные зерна слабо преобразованные	5	33.92	25.71	40.14	0.23	—	—	100	$Ru_{0.56}Os_{0.25}Ir_{0.19}$	Рутений иридиево-осмиевый
	6	37.39	25.69	36.67	0.25	—	—	100	$Ru_{0.52}Os_{0.28}Ir_{0.19}Fe_{0.01}$	Рутений иридиево-осмиевый
	7	28.66	39.87	30.70	0.77	—	—	100	$Ru_{0.45}Ir_{0.31}Os_{0.22}Fe_{0.02}$	Рутений осмиево-иридиевый
	8	5.0	66.23	28.36	0.41	—	—	100	$Ir_{0.52}Ru_{0.43}Os_{0.04}Fe_{0.01}$	Иридий рутениевый
Вторичные зерна интенсивно преобразованные	10	0.63	30.37	65.86	3.14	—	—	100	$Ru_{0.75}Ir_{0.18}Fe_{0.07}$	Рутений иридиевый
	11	6.20	46.49	45.22	2.09	—	—	100	$Ru_{0.59}Ir_{0.32}Fe_{0.05}Os_{0.04}$	Рутений иридиевый
	12	1.40	46.28	48.72	3.60	—	—	100	$Ru_{0.61}Ir_{0.30}Fe_{0.08}Os_{0.01}$	Рутений иридиевый
	13	13.09	46.98	37.87	2.06	—	—	100	$Ru_{0.52}Ir_{0.34}Os_{0.09}Fe_{0.05}$	Рутений иридиевый
	21	—	37.56	56.33	6.11	0.40	—	100	$Ru_{0.64}Ir_{0.22}Fe_{0.13}Cu_{0.01}$	Рутений иридиевый
	22	0.53	41.47	53.44	4.56	—	—	100	$Ru_{0.64}Ir_{0.26}Fe_{0.10}$	Рутений иридиевый
	24	5.17	72.92	21.91	—	0.28	—	100	$Ir_{0.60}Ru_{0.35}Os_{0.04}Fe_{0.01}$	Иридий рутениевый
	26	—	56.07	40.49	3.44	0.80	—	100	$Ru_{0.52}Ir_{0.38}Fe_{0.08}Cu_{0.02}$	Рутений иридиевый
	27	10.42	43.46	40.16	5.96	0.40	—	100	$Ru_{0.50}Ir_{0.29}Fe_{0.14}Os_{0.07}$	Рутений иридиевый
	28	12.69	42.94	39.95	4.42	0.50	—	100	$Ru_{0.51}Ir_{0.29}Fe_{0.10}Os_{0.09}Cu_{0.01}$	Рутений иридиевый
	29	6.06	46.71	44.43	2.80	0.50	—	100	$Ru_{0.57}Ir_{0.31}Fe_{0.07}Os_{0.04}Cu_{0.01}$	Рутений иридиевый

Примечание: 1) Анализы выполнены на приборе JEOL JSM-7001F (аналитик Жеребцов Д.А.); 2) прочерком обозначены значения элементов ниже предела обнаружения прибора.

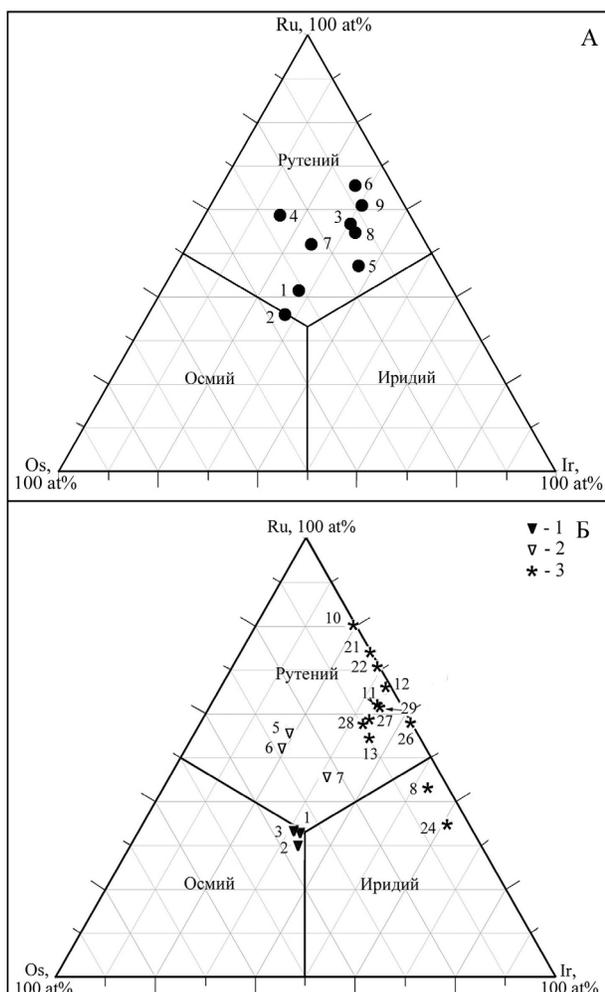


Рис. 2. Составы микровключений платиноидов на диаграмме Os-Ru-Ir [Harris, Cabri, 1991].

А – по данным РСМА (ИМин УрО РАН УрО РАН, РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров, 2015 г.); Б – по данным РСМА (ЮУрГУ, Jeol JSM-7001F, аналитик Д.А. Жеребцов, 2016 г.): 1 – первичные микровключения осмия, 2 – вторичные микровключения слабо преобразованные, 3 – вторичные микровключения интенсивно преобразованные

Вторичные микровключения платиноидов имеют сложную форму (рис. 1Б, В) и образуют скопления на периферии первичных зерен. Размеры отдельных индивидов могут варьировать от сотых долей до 1–2 мкм. Позиция микровключений показана на треугольных диаграммах Os-Ru-Ir [Harris, Cabri, 1991]. На рис. 2А, Б показаны фигуративные точки состава микровключений из образца 138с, полученных в 2016 г. [Зайков и др., 2016]. Первичные включения по составу соответствует осмию и попадают на тройное сочленение Os-Ru-Ir. Среди вторичных микровключений на рис. 2Б выделены две группы: слабо преобразованные, по составу соответствующие рутению (точки 5, 6, 7), и интенсивно преобразованные, соответствующие рутению и иридию. Они отчетливо группируются вдоль тренда Ir-Ru.

Таким образом, использование микроанализатора Jeol JSM-7001F позволило установить скрытую зональность первичного микровключения, присутствие в нем тончайших жилок золота и выделить две группы вторичных микровключений: интенсивно- и слабо преобразованных.

*Исследования выполнены при поддержке Правительства РФ (постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011, и в рамках гранта РФФИ № 15-05-00311.*

## Литература

*Зайков В.В., Котляров В.В., Зайкова В.В.* Состав и преобразования микровключений минералов системы Os – Ir – Ru в древних золотых изделиях // Записки РМО, 2015, № 3. С. 106–112.

*Зайков В.В., Тауров А.Д., Зайкова Е.В., Юминов А.М., Котляров В.А.* Благородные металлы в рудах и древних золотых изделиях Центральной Евразии. Челябинск: Каменный пояс, 2016. 320 с.

*Craddock P.T.* The Platinum Group Element Inclusion // A. Ramage, P. Craddock, King Groesus Gold: Excavations at Sardis, 11) London: Cambridge, 2000. MA. P. 234–244.

*Harris D., and Cabri L.* Nomenclature of platinum-group-element alloys: Review and revision, Canadian Mineralogist 29, 1991. P. 231–237.

*Ogden J.M.* Platinum Group Inclusion in Ancient Gold Artifacts, Journal of the Historical Metallurgical Society. 1977. 11.2. P. 53–73.

*Whitmore F.E., Young W.J.* Application of the Laser Microprobe and Electron Microprobe in the Analysis of Platinum Group Inclusion in Gold // W.Y. Young (ed.). Application of Science in Examination of Art. Boston, 1973. P. 88–95.

*Young W.J.* The Fabulous Gold of the Pactolus Valley // Bulletin of Boston museum of Fine Arts, 1972. P. 5–13.

***В.В. Зайков<sup>1,2</sup>, А.М. Юминов<sup>2,1</sup>, Д.М. Галимов<sup>2</sup>, Е.В. Зайкова<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup>Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс*

*<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе  
zaykov@mineralogy.ru*

## **Воздействие расплава золота на микровключения рутения в древних изделиях могильника Филипповка I (Южный Урал)**

При изучении древних золотых изделий из могильника Филипповка I был установлен россыпной источник металла и влияние золотого расплава на микровключения платиноидов, содержащихся в золоте [Зайков и др., 2015; 2016]. Оно выражается в появлении по периферии крупных зерен наноразмерных микровключений и выносе из них осмия. Для уточнения этого процесса был использован электронный микроскоп JEOL JSM-7001F (аналитик Галимов Д.М.), позволяющий определять состав частиц размером около 1 мкм и проводить микрогеохимическое картирование. В статье изложены результаты работы, выполненной в Южно-Уральском госуниверситете и Институте минералогии УрО РАН в 2017 г.

Объектами исследования явились предметы из курганов 1 и 4 могильника Филипповка I (рис. 1), информация о которых содержится в работах [Пшеничнюк, 2000; Яблонский, 2008; Блинов и др., 2015].

Золотая нашивка в виде розетки диаметром 2.5 см (курган 1, обр. F13-3) имеет состав (мас. %): Au 95.1; Ag 3.1, Cu 1.8. В ней выявлены микровключения рутения размером 20–