

## Литература

- Анкушев М.Н., Артемьев Д.А., Блинов И.А. Элементы-примеси в зональных оливинах металлургических шлаков бронзового века на Южном Урале // *Минералогия*. 2018. Т. 4(1). С. 55–67.
- Зайков В.В., Юминов А.М., Анкушев М.Н., Ткачев В.В., Носкевич В.В., Епимахов А.В. Горно-металлургические центры бронзового века в Зауралье и Мугоджарах // *Известия Иркутского государственного университета*. Сер. «Геоархеология, этнология, антропология». 2013. № 1 (2). С. 174–195.
- Макурова М.Р., Петров Ф.Н. Аркаим – «Страна городов». Путеводитель по «бронзовому кольцу России». Заповедник «Аркаим». Челябинск: АБРИС, 2017. 55 с.
- Петров Ф.Н., Анкушев М.Н., Медведева П.С. Материальные свидетельства технологических процессов в культурном слое поселения Левобережное (Синташта II): опыт функционального подхода // *Magistra Vitae: электронный журнал по историческим наукам и археологии*. 2018. № 1. С. 112–147.
- Grigoriev S.A., Dunaev A.Yu., Zaykov V.V. Chromites: an indicator of copper ore source for ancient metallurgy // *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 400(1). P. 95–98.

Д.А. Артемьев, В.В. Зайков

ИМин УрО РАН, г. Миасс, [artemyev@mineralogy.ru](mailto:artemyev@mineralogy.ru)

### Элементы-примеси в самородной платине из россыпей Южного Урала: результаты ЛА-ИСП-МС анализа

Самородная платина и минералы платиновой группы (МПП) широко распространены в россыпных зонах Урала, связанных с ультрабазитовыми массивами. При этом МПП как попутный компонент концентрируются в золотопродуктивных россыпях, что характерно для зоны Главного Уральского разлома. Также МПП часто встречаются в виде включений в древних золотых изделиях, имеющих возраст от бронзового века до средневековья. Этот факт является индикатором использования в древности золота из россыпей с ультрабазитовым субстратом [Зайков, Баранников, 2015; Зайков, Таиров, 2017; Jansen et al., 2016].

Установление источников золота, используемого в древности, и его миграции является одним из важных направлений в геоархеологии и археометрии. Однако, в большинстве случаев, данных по составу золота недостаточно для этого. Хорошим источником информации является выявление микровключений, содержащихся в золотых изделиях [Зайков и др., 2017]. Среди микровключений отдельной группой выделяются МПП, которые могут стать хорошим критерием для определения источников золота для изготовления древних артефактов [Zaykov et al., 2017]. Но в связи с широким изоморфизмом основных компонентов в МПП, часто и эта информация бывает недостаточна.

Важным маркером в установлении источников МПП могут стать элементы-примеси, содержащиеся в них. Ранее при изучении элементов-примесей в МПП применялись методы атомно-силовой микроскопии [Tamana et al., 1994], затем на смену им пришли единичные попытки измерений с помощью метода ЛА-ИСП-МС [Becker et al., 2001], калибровка масс-спектрометра при этом осуществлялась на растворах. Ограниченность исследований по измерению элементов-примесей в самородных металлах, отсутствие международных стандартов с матрицей, близкой исследуемым минералам, в настоящее время являются препятствием для широкого внедрения метода ЛА-ИСП-МС в практику изучения металлов и самородных элементов. В этом исследовании авторами была проведена работа по постановке методики ЛА-ИСП-МС анализа платиноидов с помощью твердых стандартных образцов, и сделана попытка выявления маркирующих элементов-примесей в самородной платине.

Объектами исследования и сравнения стали зерна самородной платины из двух россыпных зон Южного Урала – Малоиремельской и Казанской. Малоиремельская россыпь приурочена к северному замыканию Нуралинского ультрабазитового массива зоны Главного Уральского разлома и локализована в пределах русла р. В. Иремель (Миасский район). Содержания платиноидов здесь достигали 11.7 г/т, там же были найдены самородки осмистого иридия весом до 500 г [Салихов и др., 2001]. Среди платиноидов преобладает осмий иридиево-рутениевый и рутений осмиево-иридиевый, ограниченно развита платина, сульфиды и сульфоарсениды Ru и Os [Zaykov et al., 2017]. Казанская золоторудная россыпь наиболее богата платиной и приурочена к Гогинской россыпной зоне (Брединский район) Варшавского ультрабазитового массива. Содержания золота – 0.17 г/т, содержания платиноидов не подсчитаны [Баранников, Осовецкий, 2013; Зайков, Баранников, 2015].

Для изучения были отобраны мономинеральные зерна самородной платины из тяжелых шлиховых концентратов. В Малоиремельской россыпи они представлены изометричными окатанными, реже амбовидными формами, с редкими пустотами и немногочисленными минеральными включениями (рис. а, б, в). Размеры зерен варьируют в пределах 0.2–0.9 мм. В Казанской россыпи зерна преимущественно угловатые, неокатанные, со структурами роста, трещинами и большим количеством минеральных включений и отпечатков (рис. г, д, е). Размеры зерен варьируют в пределах 0.1–0.8 мм.

При анализе использовался масс-спектрометр Agilent 7700x с параметрами: RF Power – 1550 Вт, рабочий газ – Ar, скорость несущего потока 1.05 л/мин, плазмообразующий поток Ar – 15 л/мин, охлаждающий поток Ar – 0.9 л/мин. Лазерная приставка New Wave Research UP-213 с параметрами: лазер Nd:YAG, длина волны излучения 213 нм, энергия пучка 5–7 Дж/см<sup>2</sup>, частота повторения импульсов 10 Hz, диаметр пятна абляции – 110 мкм, несущий газ – He, скорость потока 0.7 л/мин. В каждом зерне прожигались по 3 точки диаметром 110 мкм с предабляцией поверхности. Для внешнего стандарта и настройки использовались международные стандарты стекол (USGS BCR-2g, NIST SRM-612) и сульфидов (USGS

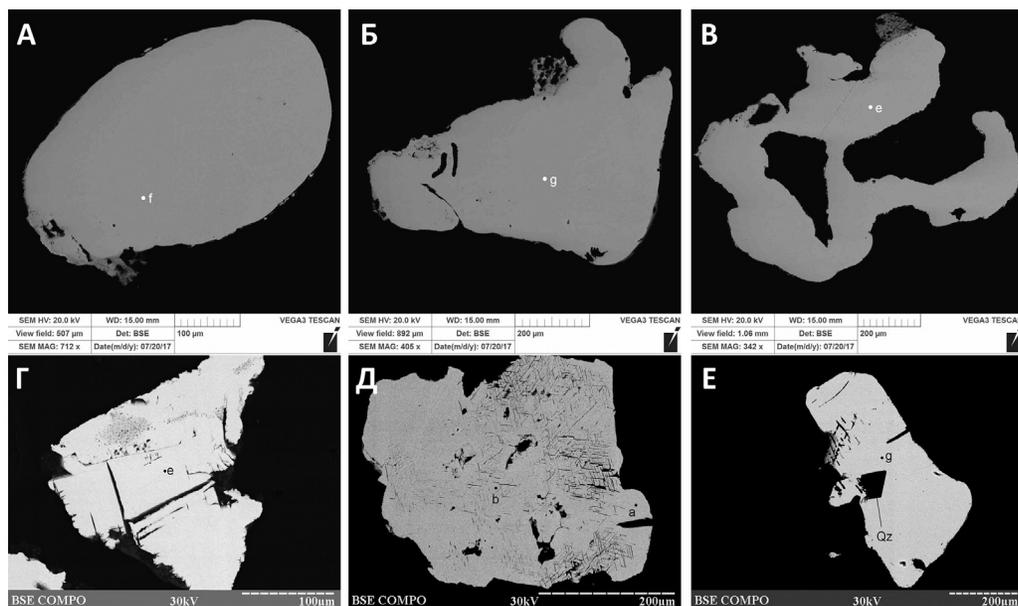


Рис. Морфология зерен платины из Малоиремельской и Казанской россыпей.

А – Ир49-ср-3-23; Б – Ир49-ср-3-27; В – Ир49-ср-3-8; Г – Ка2рС-Рт 5; Д – Ка2рС-Рт 11; Е – Ка2рС-Рт 12.

**Результаты СЭМ по составу зерен платины  
из Малоиремельской и Казанской россыпей, масс. %**

| № образца     | Pt   | Rh   | Pd   | Fe   | Cu   | Ni   | Сумма |
|---------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Ir1-1         | 90.8 | 3.01 | –    | 5.58 | –    | 0.04 | 99.40 |
| Ir1-2         | 92.3 | 2.83 | –    | 4.91 | –    | –    | 99.98 |
| Ir1-6         | 92.2 | –    | –    | 7.48 | 0.15 | 0.05 | 99.83 |
| Ir49-ср-3-23  | 86.9 | 0.63 | –    | 11.1 | 0.60 | 1.36 | 100.5 |
| Ir49-ср-3-27  | 87.3 | 0.45 | –    | 10.9 | 0.70 | 1.40 | 100.8 |
| Ir49-ср-3-8   | 91.4 | 1.97 | 0.60 | 5.84 | –    | –    | 99.79 |
| Среднее       | 90.2 | 1.8  |      | 7.6  |      | 0.7  |       |
| Ка2пС-Pt 5    | 93.0 | 2.84 | –    | 4.02 | –    | –    | 99.87 |
| Ка2пС-Pt11    | 92.2 | –    | –    | 6.15 | 1.39 | –    | 99.70 |
| Ка2пС-Pt12    | 91.0 | 1.14 | –    | 7.63 | –    | –    | 99.80 |
| Ка-п2-G5      | 96.2 | –    | –    | 3.83 | –    | –    | 100.0 |
| Ка-2пс-Pt-с-1 | 90.0 | 0.27 | 0.29 | 8.71 | –    | –    | 99.29 |
| Ка-2пс-Pt-с-2 | 92.8 | 0.98 | –    | 3.13 | –    | –    | 99.27 |
| Среднее       | 92.5 | 1.3  |      | 5.6  |      |      |       |

*Примечание.* Анализы выполнены на электронном микроскопе VEGA3 TESCAN SEM (аналитик И.А. Блинов) и REMMA 202M (аналитик В.А. Котляров). Россыпи: Ir – Малоиремельская. Ка – Казанская.

MASS-1). Для внутреннего стандарта брались содержания Pt в зернах, полученные методом сканирующей электронной микроскопии. Измерялись элементы: V<sup>51</sup>, Cr<sup>53</sup>, Mn<sup>55</sup>, Fe<sup>57</sup>, Co<sup>59</sup>, Ni<sup>60</sup>, Cu<sup>65</sup>, Zn<sup>66</sup>, Ga<sup>69</sup>, Ge<sup>72</sup>, As<sup>75</sup>, Se<sup>77</sup>, Mo<sup>95</sup>, Ru<sup>101</sup>, Rh<sup>103</sup>, Pd<sup>105</sup>, Ag<sup>107</sup>, Cd<sup>111</sup>, In<sup>115</sup>, Sn<sup>118</sup>, Sb<sup>121</sup>, Te<sup>125</sup>, Os<sup>188</sup>, Ir<sup>191</sup>, Pt<sup>195</sup>, Au<sup>197</sup>, Hg<sup>202</sup>, Tl<sup>205</sup>, Pb<sup>208</sup>, Bi<sup>209</sup>. В дальнейшем каждая точка рассчитывалась в программе Iolite и усреднялась по зерну. Для расчета большинства элементов использовался стандарт MASS-1, за исключением Rh и Pd, рассчитываемых по NIST-612, а также Ru, содержания которого приведены оценочно, на основании его соотношения с Rh и Pd BCR-2g использовался для повторной проверки содержаний некоторых халько- и сидерофильных элементов.

По результатам анализа отмечают, в целом, несколько заниженные результаты ЛА-ИСП-МС по сравнению с СЭМ по Fe и Rh (табл. 1). Большинство других элементов платиновой группы находится на пределе обнаружения СЭМ или ниже его. Содержания V и Cr, в целом, ниже в платине Малоиремельской россыпи, чем в Казанской, а Mn и Fe имеют обратную тенденцию (табл. 2). Содержания Cu, Zn и As в платине из двух россыпей различается незначительно и имеет перекрывающиеся значения.

Важным маркирующим признаком являются повышенные концентрации Ni и Co в платине Малоиремельской россыпи, которые для первого выше на два порядка, для второго – на порядок, что также отмечается по результатам СЭМ. Платина Казанской россыпи в значительной степени обогащена по сравнению с Малоиремельской: Au – в 50 раз, Ag – в 5 раз, Hg – в 10 раз, Mo – в 50 раз.

Вероятно, большая степень обогащения зерен платины Казанской россыпи многими халькофильными и благороднометалльными элементами связана с наличием в ней как изоморфных примесей, так и минеральных микровключений вследствие недалекого переноса от коренного источника эрозии. Важными структурными примесями для определения источника платины, не зависящими от окатанности и степени преобразования, могут служить содержания Fe, Co, Ni, V и Cr.

Таблица 2  
**Результаты ЛА-ИСП-МС по элементам-примесям в зернах платины из Малоиремельской и Казанской россыпей, ppm**

| № образца     | V    | Cr   | Mn  | Fe    | Co   | Ni    | Cu    | Zn   | As   | Mo   | Ag   | Sb   | Te  | Au   | Hg   | Rh    | Pd    | Os    | Ir    |
|---------------|------|------|-----|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Ir1-1         | 0.05 | —    | 4.4 | 56900 | 56.3 | 575   | 3560  | 11.7 | 7.4  | 0.01 | 0.16 | 2.8  | 2.6 | 72.2 | 7.2  | 15860 | 11480 | 7300  | 4640  |
| Ir1-2         | 0.05 | 2.8  | 5.1 | 49600 | 65.7 | 1290  | 1790  | 9.4  | 5.7  | 0.01 | 0.07 | 2.2  | 2.0 | 39.3 | 5.8  | 15500 | 4460  | 3500  | 5400  |
| Ir1-6         | 0.03 | —    | 4.6 | 79950 | 25.6 | 84    | 8640  | 19.4 | 1.6  | —    | 0.12 | 1.7  | 2.1 | 140  | 9.8  | 4550  | 7740  | 9.3   | 1900  |
| Ir49-ср-3-23  | 0.02 | 0.28 | 1.2 | 87200 | 91.3 | 11290 | 4800  | 6.9  | 4.6  | 0.01 | 1.1  | 1.4  | 0.3 | 11.9 | 2.0  | 4460  | 390   | 69    | 5040  |
| Ir49-ср-3-27  | 0.01 | 0.26 | 1.2 | 88000 | 93.2 | 11570 | 4960  | 7.0  | 4.5  | 0.02 | 1.2  | 1.5  | 0.4 | 12.3 | 2.0  | 4720  | 430   | 67    | 5000  |
| Ir49-ср-3-8   | 0.02 | 1.3  | 4.1 | 43450 | 46.7 | 1000  | 2050  | 6.2  | 5.1  | 0.01 | 0.16 | 1.8  | 2.6 | 21.4 | 3.6  | 17180 | 7660  | 460   | 1500  |
| Среднее       | 0.03 | 1.2  | 3.4 | 67500 | 63.1 | 4300  | 4300  | 10.1 | 4.8  | 0.01 | 0.47 | 1.9  | 1.7 | 49.5 | 5.1  | 10400 | 5360  | 1900  | 3900  |
| Ka2pC-Pt5     | 4.2  | 11.7 | 1.6 | 58850 | 12.4 | 97    | 5710  | 13.1 | 33.7 | 23.6 | 3.0  | 285  | 2.0 | 2155 | 113  | 6200  | 7580  | 3600  | 6400  |
| Ka2pC-Pt11    | 2.0  | 4.7  | 2.8 | 61100 | 7.6  | 74    | 24100 | 4.7  | 644  | 0.40 | 7.0  | 3530 | 2.4 | 2252 | 628  | 12    | 1820  | 280   | 65    |
| Ka2pC-Pt12    | 0.08 | 0.7  | 2.3 | 66900 | 16.4 | 121   | 1320  | 8.9  | 0.8  | 0.40 | 0.27 | 33   | 4.7 | 4.2  | 8.5  | 6170  | 3820  | 4160  | 13500 |
| Ka-p2-G5      | 0.15 | 0.8  | 1.5 | 44200 | 10.8 | 132   | 4010  | 2.9  | 1.1  | 0.02 | 0.28 | 243  | 0.4 | 1069 | 61   | 4710  | 5460  | 28500 | 4900  |
| Ka-2pс-Pt-с-1 | 1.1  | 4.7  | 5.7 | 57200 | 11.5 | 110   | 1680  | 7.1  | 1.1  | 0.78 | 2.2  | 25.7 | 0.9 | 380  | 87   | 2570  | 1780  | 210   | 10100 |
| Ka-2pс-Pt-с-2 | 0.01 | 0.8  | 0.3 | 17900 | 5.8  | 47    | 840   | 1.2  | 1.4  | 0.02 | 0.57 | 950  | 1.2 | 8870 | 1.13 | 8170  | 7640  | 4600  | 6400  |
| Среднее       | 1.3  | 3.9  | 2.4 | 51000 | 10.8 | 97    | 6280  | 6.3  | 11.3 | 4.2  | 2.2  | 845  | 1.9 | 2455 | 150  | 4640  | 4680  | 6890  | 6890  |

*Примечание.* Анализы выполнены на масс-спектрометре Agilent 7700х с лазерной приставкой NWR UP-213, аналитик – Д.А. Артемьев. В таблице приведены средние рассчитанные содержания элементов по данным 3 точек анализа в каждом зерне. Россыпи: Ir – Малоиремельская, Ka – Казанская.

Таким образом, наличие изоморфных примесей, минеральных нано- и микровключений в зернах самородной платины может являться маркером их коренного источника и критерием определения россыпных источников золота для древних артефактов с включениями платиноидов. В дальнейшем планируется расширить список исследуемых россыпей, а также провести исследования по элементам-примесям в других МПГ.

*Исследования выполнены при поддержке госбюджетной темы «Минеральные микровключения в металлах, шлаках и рудах из археологических памятников Центральной Евразии как индикатор источников минерального сырья и хозяйственных связей в древности» № АААА-А16-116033010015-9.*

## Литература

- Баранников А.Г., Осовецкий Б.М. Морфологические особенности и нанорельеф поверхности самородного золота разновозрастных россыпей Урала // Литосфера. 2013. № 3. С. 89–105.
- Зайков В.В., Баранников А.Г. Состав золота из россыпей Южного Урала и их коренные источники // Челябинск: Издат центр. ЮУрГУ, 2015. 2015. С. 417–424.
- Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Блинов И.А. Микровключения рудных минералов в золоте Миасской россыпной зоны (Южный Урал) как показатель коренных источников // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476, № 6. С. 670–674.
- Зайков В.В., Таиров А.Д. Золото и платиноиды в изделиях из археологических памятников и руд центральной Евразии // В сборнике: V Всероссийский археологический съезд. 2017. С. 387–388.
- Зайков В.В., Яблонский Л.Т., Дашковский П.К., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Юминов А.М. Микровключения платиноидов группы самородного осмия в древних золотых изделиях Сибири и Урала // Археология, этнография и антропология Евразии. 2016. Т. 44, № 1. С. 93–103.