

ХИМИЧЕСКИЙ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ Os-СОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ И СУЛЬФИДОВ ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ ЭВАНДЕР ВИТВАТЕРСРАНДСКОГО БАССЕЙНА (ЮЖНАЯ АФРИКА)

© 2016 г. И. Ю. Баданина*, К. Н. Малич*, Р. К. В. Меркле**, А. В. Антонов***, И. Н. Капитонов***, В. В. Хиллер*

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15
E-mail: dunita@yandex.ru

**Университет Претории,
Претория 0002, Южная Африка

***Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
199106, г. Санкт-Петербург, Средний пр., 74

Поступила в редакцию 25.05.2016 г.

Принята к печати 29.08.2016 г.

Впервые охарактеризованы вещественные и изотопно-геохимические особенности Ru-Os-Ir сплавов, Ru-Os сульфидов и поликомпонентных твердых растворов системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm$ Fe) из конгломератной формации Кимберли золоторудного поля Эвандер Витватерсрандского бассейна (Южная Африка). Для исследования платиноидной минерализации применен комплекс методов, включающий рентгеноспектральный микроанализ, лазерную абляцию и масс-спектрометрию с ионизацией в индуктивно-связанной плазме. Новые результаты свидетельствуют в пользу: 1) высокотемпературного образования изученных минералов платиновой группы (МПГ); 2) субхондритового архейского источника рудного вещества; 3) сходства начального изотопного состава осмия в сосуществующих Os-содержащих сплавах и сульфидах в составе полиминеральных ассоциаций; 4) значительных Os-изотопных вариаций в индивидуальных Ru-Os-Ir сплавах, Ru-Os сульфидах и поликомпонентных твердых растворах системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm$ Fe). Предложена возможность использования $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ возрастов МПГ для разбраковки существующих моделей образования благороднометалльной минерализации Витватерсрандского бассейна.

Ключевые слова: минералы платиновой группы, изотопный состав осмия, Os-изотопный возраст, условия образования, золоторудное поле Эвандер, Витватерсрандский бассейн, Южная Африка.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексные Os-Au-U палеороссыпи Витватерсрандского бассейна, известные как Витватерсрандские рифы [28], разрабатываются уже более ста лет. Они являются одним из главных поставщиков золота и осмия на мировой рынок. Богатые осмием МПГ получают в качестве сопутствующего продукта при добыче золота в пределах золоторудных полей Витватерсрандского бассейна. Несмотря на длительную историю изучения до сих пор продолжается дискуссия о происхождении рудных минералов, составляющих экономическую ценность месторождений Витватерсранда, об их коренных источниках и генетических особенностях формирования самих палеороссыпей.

Так как осмий является одним из шести элементов платиновой группы (ЭПГ), осмиевые изотопы обеспечивают высокую надежность и кор-

ректность распространения генетической и геохронологической информации об Os-содержащих МПГ. Величина отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в Ru-Os-Ir сплавах и Ru-Os сульфидах является изотопным критерием, с помощью которого можно надежно идентифицировать источник рудного вещества. Это обусловлено значительным различием в изотопном составе “корового” и “мантийного” осмия [39, 66]. Проведенные Os-изотопные исследования по важнейшим платиноидным месторождениям свидетельствуют о том, что ЭПГ были извлечены из: а) преимущественно коровых (Сэдбери [26, 71]; б) мантийных (Норильск и Кондер [7, 46, 70]) или в) смешанных источников (Бушвельд и Стиллуотер [38, 44, 51]). Наряду с информацией об источнике вещества, начальный изотопный состав осмия мантийных МПГ, представленных минералами системы Ru-Os-Ir, позволяет определять их модельный Os-изотопный возраст [4, 15, 17, 66 и др.].

МПП, описанные *in situ* в литифицированных образованиях Витватерсрандского бассейна или в производственных концентратах имеют типичные размеры в пределах от ≈ 70 мкм [29] до ≈ 150 мкм (наши данные). Характеристика их вещественного состава и условия образования минеральных ассоциаций платиноидов приведены в ряде работ [29, 48, 53 и др.]. Первые Os-изотопные данные по Ru-Os-Ir сплавам Витватерсрандского бассейна выявили значительные вариации значений $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – от 0.0987 до 0.1649 [8, 38, 48].

Для уточнения источников рудного вещества, продолжительности и условий образования Os-содержащих МПП Витватерсранда в данной статье обсуждаются оригинальные данные по химическому и изотопному составу Os-содержащих сплавов и сульфидов из конгломератной формации Кимберли золоторудного поля Эвандер (рис. 1). Информация о генетических особенностях образования данных МПП приводится с учетом выявленно-

го состава редко встречаемых поликомпонентных твердых растворов системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm\text{Fe}$). Новые результаты свидетельствуют в пользу: 1) высокотемпературной природы образования Ru-Os-Ir-Pt сплавов, поликомпонентных твердых растворов системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm\text{Fe}$) и Ru-Os сульфидов; 2) субхондритового архейского источника платиноидов; 3) обломочного происхождения изученных МПП.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Витватерсрандский бассейн представляет собой эрозийный останец от значительно более обширного бассейна, который формировался в течение длительного интервала времени (3074–2714 млн лет) в центральной и южной частях Каапвальского кратона [62, 63]. Он вытянут в северо-восточном – юго-западном направлении на 300 км при ширине

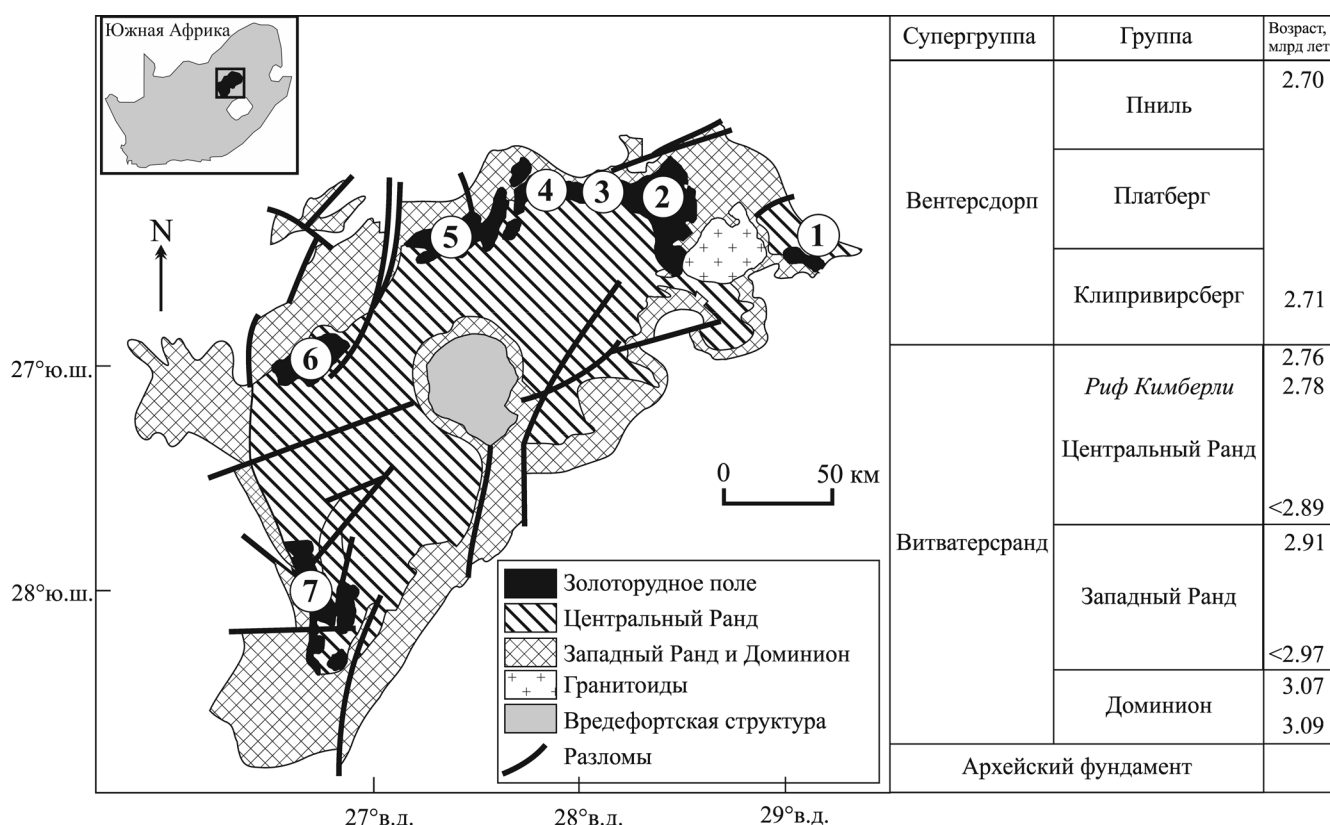


Рис. 1. Схематическая карта Витватерсрандского бассейна и местоположение главных золоторудных полей.

Поля: 1 – Эвандер, 2 – Восточный Ранд, 3 – Центральный Ранд, 4 – Западный Ранд, 5 – Карлетонвилл, 6 – Клерксдорп, 7 – Велком [33]. На стратиграфической колонке показана золотосодержащая конгломератная формация Кимберли (Риф Кимберли), платиноидная минерализация которой положена в основу нашего исследования.

Fig. 1. Schematic map of the Witwatersrand Basin and location of the main goldfields.

Goldfields: 1 – Evander, 2 – East Rand, 3 – Central Rand, 4 – West Rand, 5 – Carletonville, 6 – Klerksdorp, 7 – Welkom [33]. The stratigraphic column shows the position of the Kimberley Reef, from which the PGMs were taken for our study.

около 100 км и выполнен мощной (более 7 км) толщей кварцитов, сланцев и конгломератов, в строении которых установлена четкая ритмичность [28]. В разрезе осадочных толщ конгломераты составляют не более 0.2% ее мощности, слагая 16 самостоятельных горизонтов (рифов), к которым приурочено золотое и урановое оруденение с сопутствующей платиноидной минерализацией. Главные ресурсы золота и платиноидов приурочены к конгломератам Центрального Ранда (Central Rand Group); их добыча ведется шахтным способом в пределах семи золоторудных полей: Эвандер (Evander), Восточный Ранд (East Rand), Центральный Ранд (Central Rand), Западный Ранд (West Rand), Карлетонвилл (Carletonville), Клерксдорп (Klerksdorp) и Велком (Welkom) (см. рис. 1).

Длительный и полициклический характер формирования Витватерсрандского бассейна подтвержден многочисленными геохронологическими данными, которые были получены при U-Pb датировании цирконов из конгломератов разных стратиграфических уровней, а также при датировании кристаллических сланцев Rb-Sr и Pb-Pb методами [19, 62]. Детритовые цирконы из осадочных толщ Западного Ранда Витватерсрандского бассейна (West Rand Group) образовались в интервале 3305–3044 млн лет тому назад, а детритовые цирконы из стратиграфически выше расположенных осадочных пород Центрального Ранда (Central Rand Group) имеют возраст 3207–2894 млн лет. При этом вариации U-Pb возрастов цирконов отражали полициклическость магматических процессов в период 3300–2900 млн лет, когда происходило интенсивное образование гранитов. С помощью Rb-Sr изотопно-геохимической системы зафиксированы более молодые процессы метаморфизма, которые были проявлены на рубежах 2550, 2300 и в интервале 2020–2060 млн лет [63, 68].

Более детально геологическая характеристика Витватерсрандского бассейна наряду с особенностями строения, состава и генезиса продуктивных конгломератов рассмотрены и обобщены в многочисленных публикациях [3, 14, 28, 30, 32, 33, 55, 58, 59, 61, 64, 69, 72 и многие другие].

Представительная выборка МПГ, состоящая из 950 зерен размером от 60 до 150 мкм, выделена из производственного концентрата конгломератной формации Кимберли (или Рифа Кимберли), расположенной в верхнем отделе Центрального Ранда (Turffontein Subgroup of the Central Rand Group), максимальный возраст которого равен 2940 млн лет [69]. Временной интервал образования осадочных отложений Центрального Ранда достигал около 230 млн лет и маркируется вышележающими вулканическими породами Вентерсдорпской супергруппы (Ventersdorp Supergroup), имеющими возраст ≈ 2710 млн лет [19, 62].

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Исследование химического состава платиноидной минерализации выполнено при помощи рентгеноспектрального микроанализа (ARL-SEMQ, Университет Леобена, Австрия; CamScan MX2500, ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург; CAMECA SX 100, ИГГ УрО РАН, Екатеринбург). При проведении количественных анализов были использованы следующие рентгеновские спектральные линии и стандартные образцы: OsMa, IrLa, RuLa, RhLa, PtLa, PdL β , NiKa (все чистые металлы), FeKa, CuKa, SKa (халькопирит), AsLa – сплав InAs; проведен учет спектральных наложений линий (RuLa на AsLa; RuL β на RhLa; IrLa на CuKa и др.). Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, сила тока пучка электронов – 20 нА, диаметр точки анализа – 1–2 мкм. Всего выполнено около 700 анализов. Определение начального изотопного состава осмия в индивидуальных МПГ осуществлялось посредством лазерной абляции и масс-спектрометрии с ионизацией пробы в индуктивно-связанной плазме на многоколлекторных масс-спектрометрах Neptune в Университете Дурхама (Великобритания) и Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте (Санкт-Петербург). Диаметр пучка при абляции составлял от 30 до 80 мкм, частота импульсов – 8–20 Гц, время анализа – 40–72 с. При измерениях осуществлялась нормировка изотопных отношений, позволяющая учитывать масс-дискриминационные эффекты. Нормирование проводилось по отношению $^{189}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 1.21978$ [64]. Всего выполнено 92 анализа. Детальная характеристика аналитических методов приведена в ряде работ [2, 17, 41, 47, 56, 57].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав Ru-Os-Ir сплавов и Ru-Os сульфидов

Подавляющее большинство изученных МПГ образованы Ru-Os-Ir($\pm$ Pt) сплавами в составе мономинеральных индивидов или полиминеральных ассоциаций (рис. 2). Для Ru-Os-Ir ($\pm$ Pt) сплавов характерны значительные вариации состава от знака к знаку. По номенклатуре Д. Харриса и Л. Кабри [37] минералы рутения преобладают над минералами осмия, иридия и рутениридосмином (рис. 3а, табл. 1, ан. 1, 13). Ru-Os сульфиды встречаются в составе полиминеральных зерен (см. рис. 2е, ж, и) и по химическому составу соответствуют лауриту и эрликманиту, образующими непрерывный ряд твердых растворов (Ru# варьирует от 100 до 24, см. табл. 1, ан. 12 и 14). Поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm$ Fe) установлены в составе как мономинеральных, так и полиминеральных ассоциаций (см. рис. 2а–з),

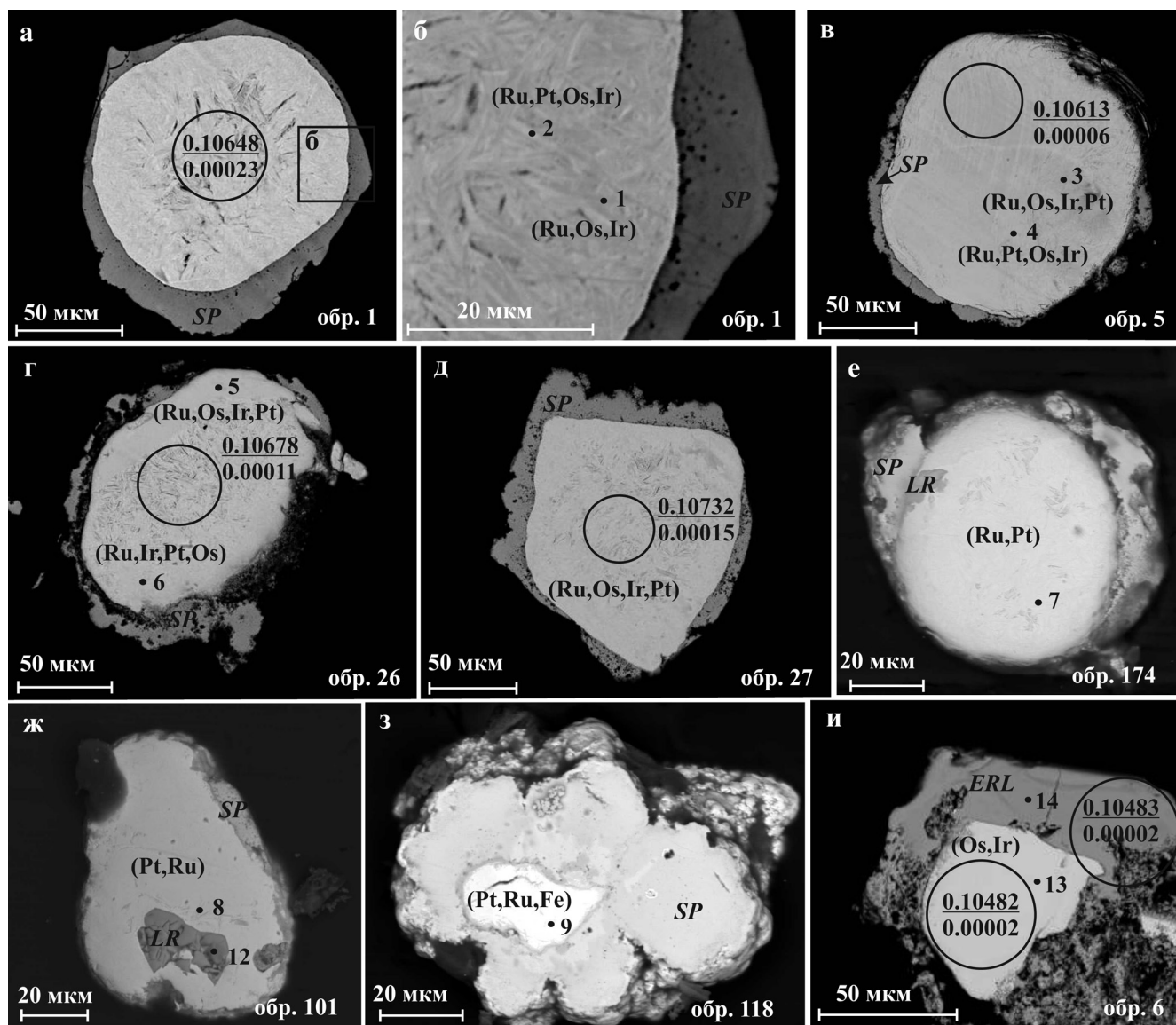


Рис. 2. Особенности внутреннего строения ассоциаций МПГ из конгломератной формации Кимберли золоторудного поля Эвандер.

Номера 1–9, 12–14 обозначают места проведения рентгеноспектральных микроанализов МПГ, которые соответствуют таковым в табл. 1. Круги указывают места проведения Os-изотопных анализов; цифры в числителе и знаменателе соответствуют значению $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и погрешности измерения соответственно. Все изображения в обратно-рассеянных электронах с вещественным контрастом.

Fig. 2. Back-scattered electron images showing the internal textures of polyphase PGM grains from the Kimberley Reef of the Evander Goldfield.

Numbers 1–9, 12–14 denote areas of electron microprobe analyses corresponding to the same numbers in Table 1. Circles indicate the location of Os-isotope analyses; numbers in the numerator and denominator correspond to the $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ composition and the measurement error respectively.

в которых они образуют ядерную часть, облекаемую оторочкой сперрилита (PtAs_2), реже – Ru-Os сульфидами (см. рис. 2и) или Ru-Os-Ir-Rh сульфидарсенидами. Среди поликомпонентных твердых растворов системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm\text{Fe}$) в порядке их распространенности выявлены следующие разно-

видности: (Ru, Os, Ir, Pt), (Ru, Pt, Os, Ir), (Ru, Os, Pt, Ir), (Ru, Ir, Os, Pt, Fe), (Ru, Pt, Ir), (Ru, Pt, Fe), (Os, Ru, Ir, Pt), (Os, Ru, Ir, Pt), (Ir, Ru, Os, Pt), (Ru, Pt), (Pt, Ru, Fe), (Pt, Ru, Os, Fe), (Pt, Fe, Ru) и (Pt, Ru) (см. рис. 2а–з). Установленный тренд составов на основе тугоплавких платиноидов, платины и железа (см.

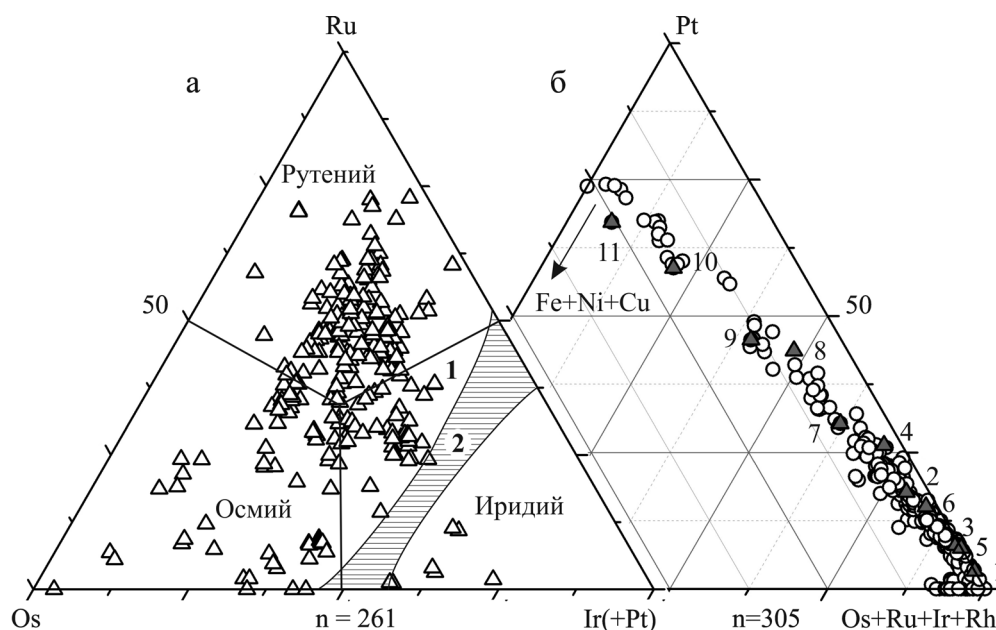


Рис. 3. Химические составы МПГ золоторудного поля Эвандер в координатах Ru–Os–Ir (+Pt), ат. % (а) и Pt–(Fe + Ni + Cu)–(Os + Ru + Ir + Rh), ат. % (б).

На рис. 3а: 1 – рутениридосмин, 2 – область несмесимости [37]. На рис. 3б цифры у треугольников соответствуют порядковым номерам химических анализов в табл. 1. Анализы 2–10 соответствуют тренду составов поликомпонентных твердых растворов системы Ru–Os–Ir–Pt–Fe.

Fig. 3. Chemical composition of PGMs from the Evander Goldfield in the diagram (at. %) Ru–Os–Ir (+Pt) (a) and Pt–(Fe + Ni + Cu)–(Ru + Os + Ir + Rh) (б).

According to [37] 1 and 2 in Fig. 3a denote areas of rutheniridosmine and miscibility gap' respectively. Grey triangles 1–11 in Fig. 3b correspond to the same numbers of electron microprobe analyses in Table 1; analyses 2–10 denote compositional trend of polycomponent solid solutions of the system Ru–Os–Ir–Pt–Fe.

рис. 3б, табл. 1, ан. 2–10) удовлетворительно согласуются с трендом фракционирования, предложенного К. Фезером [29].

Начальный Os-изотопный состав Ru–Os–Ir сплавов и Ru–Os сульфидов

Величина $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в единичных зернах МПГ различного состава (рутения, осмия, иридия, рутениридосмина, лаурита, эрликманита и других минералов системы Ru–Os–Ir–Pt–Fe) варьирует в пределах от 0.10449 ± 0.00001 до 0.10895 ± 0.00006 (табл. 2) и $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ менее 0.0006. Согласно расчетам, выполненным по программе ISOPLOT [45], можно выделить две основные группы МПГ (табл. 3, рис. 4), которые характеризуются средними значениями $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, равными 0.10519 ± 0.00037 ($n = 42$) и 0.10696 ± 0.00055 ($n = 47$), с подчиненным кластером значений 0.10855 ± 0.00036 ($n = 3$, погрешности отвечают 95% доверительному интервалу). При этом в пределах достигнутой точности измерений не отмечено какой-либо закономерной связи между химическим и изотопным

составом образцов. Сходный интервал значений Os-изотопного состава характерен как для оптически гомогенных МПГ, так и полиминеральных агрегатов, состоящих из ядра и оторочки (см. табл. 2). Для сосуществующих Os-содержащих МПГ (Ir-содержащего осмия и эрликманита), входящих в состав полиминеральных ассоциаций МПГ, выявлен одинаковый изотопный состав осмия ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.10482 \pm 0.00002$ и 0.10483 ± 0.00002 соответственно; см. рис. 2и, табл. 2, ан. 5, 6). Близкие изотопные характеристики также установлены для сосуществующих Os–Ru–Ir–Pt сплава и лаурита (см. табл. 2, ан. 12, 13).

$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ возрасты МПГ, рассчитанные с использованием модели хондритового резервуара (CHUR) [22], варьируют в пределах 2.73–3.33 млрд лет (см. табл. 2). Средние модельные возрасты $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$ для двух основных групп МПГ оказались равными 3.237 ± 0.049 и 2.998 ± 0.074 млрд лет (см. табл. 3, рис. 5). Третий возрастной кластер 2.783 ± 0.049 млрд лет образован подчиненной по распространенности группой МПГ (см. табл. 3, рис. 5).

Таблица 1. Химические составы МПГ золоторудного поля Эвандер**Table 1.** Chemical composition of platinum-group minerals (PGMs) from the Evander Goldfield

Компо- нент	Анализ													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Образец													
	1	1	5	5	26	26	174	101	118	243	247	101	6	6
	Рис. 2													
	б	б	в	в	г	г	е	ж	з	—	—	ж	и	и
Мас. %														
Fe	0.00	1.39	0.25	0.54	0.00	0.73	3.14	2.97	5.32	7.21	9.10	0.00	0.16	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00
Ru	40.46	32.97	35.76	28.38	39.42	38.46	33.50	22.39	16.25	7.34	1.70	57.90	0.00	8.23
Rh	0.00	0.00	2.00	2.19	2.87	0.00	0.76	2.29	1.36	0.53	3.07	2.19	0.00	0.00
Os	28.00	23.36	34.21	19.50	29.02	19.32	10.20	2.46	10.57	2.94	0.36	0.44	64.63	49.07
Ir	25.97	18.28	16.77	14.15	18.10	20.63	10.06	12.41	6.93	8.27	0.00	0.64	34.34	16.17
Pt	4.51	24.00	11.02	34.66	10.57	20.85	42.51	57.13	59.07	73.85	84.67	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.29	0.00	26.49
Сумма	100.08	99.86	100.06	99.85	100.03	100.21	100.17	99.89	99.50	100.14	99.05	99.46	99.13	99.96
Ат. %														
Fe	0.00	3.60	0.64	1.43	0.00	1.84	7.82	7.92	14.35	20.05	25.23	0.00	0.55	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	1.46	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00
Ru	56.72	47.13	50.45	41.58	54.26	53.64	46.11	32.99	24.23	11.28	2.60	31.93	0.00	6.52
Rh	0.00	0.00	2.77	3.15	3.87	0.00	1.02	3.31	1.99	0.80	4.29	1.19	0.00	0.00
Os	20.86	17.75	25.64	15.18	21.23	14.32	7.46	1.93	8.37	2.40	0.29	0.13	65.18	20.64
Ir	19.14	13.74	12.44	10.90	13.10	15.13	7.28	9.62	5.43	6.68	0.00	0.18	34.27	6.73
Pt	3.28	17.78	8.05	26.30	7.54	15.07	30.31	43.62	45.63	58.79	67.19	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	66.57	0.00	66.11
Ru#												100		24

Примечание. Содержания Pd, Cu и As ниже предела обнаружения PCMA; Ru# Ru-Os сульфидов равен $100 \cdot \text{Ru ат. \%} / (\text{Ru} + \text{Os})$ ат. %. Анализы: 1 – (Ru, Os, Ir), 2 и 4 – (Ru, Pt, Os, Ir), 3 и 5 – (Ru, Os, Ir, Pt), 6 – (Ru, Ir, Pt, Os), 7 – (Ru, Pt), 8 – (Pt, Ru), 9 – (Pt, Ru, Fe), 10 – (Pt, Fe, Ru), 11 – Pt-Fe сплав, 12 – лаурит, 13 – Ir-содержащий осмий, 14 – эрликманит. Анализы 1–11 соответствуют номерам на рисунке 3б.

Note. Concentrations of Pd, Cu and As were below the limit of detection of electron microprobe analysis; Ru # of Ru-Os sulfide equals to $100 \cdot \text{Ru at. \%} / (\text{Ru} + \text{Os})$ at. %. Analyses: 1 – (Ru, Os, Ir), 2 and 4 – (Ru, Pt, Os, Ir), 3 and 5 – (Ru, Os, Ir, Pt), 6 – (Ru, Ir, Pt, Os), 7 – (Ru, Pt), 8 – (Pt, Ru), 9 – (Pt, Ru, Fe), 10 – (Pt, Fe, Ru), 11 – Pt-Fe alloy, 12 – laurite, 13 – Ir-bearing osmium, 14 – erlichmanite. Analyses 1–11 correspond to the same numbers in Fig. 3b.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Большинство аккумулярованных в Витватерсрандских рифах тяжелых минералов рассматриваются в качестве первичных [23, 35, 55 и др.]. Среди них наиболее распространены пирит, уранинит, циркон, хромит, кобальтин, арсенопирит, минералы золота, осмия и иридия. Предполагается, что данный набор минералов в большинстве случаев своим происхождением обязан породам архейского гранит-зеленокаменного фундамента. Однако многие петрологические характеристики пород источника, объемные соотношения и палеогеографическое положение в значительной степени являются неопределенными [29, 32, 61, 63 и др.]. Такие минералы золотоносных конгломератов, как браннерит, лейкоксен, пирротин, герсдорфит, халькопирит, галенит и сфалерит, а также пирит и значительная часть золота, демонстрируют признаки ремобилизации многих рудных составляющих и мо-

гут рассматриваться как более типичные для гидротермальных эпигенетических рудных систем [59, 60, 68 и др.].

В отличие от ранее полученных результатов по минералогической характеристике платиноидной минерализации Витватерсранда [23, 29 и др.], нами установлено значительное распространение минералов рутения, которые преобладают над минералами осмия [(Os,Ru, Ir), (Os, Ir) и Os], иридия [(Ir, Os), (Ir, Ru, Os) и Ir], рутениридосмином (Ir, Os, Ru), поликомпонентными твердыми растворами системы Ru-Os-Ir-Pt(±Fe), Pt-Fe твердыми растворами, Ru-Os сульфидами и другими МПГ. Для изученных Ru-Os-Ir(±Pt) сплавов конгломератной формации Кимберли характерно более низкое значение $(\text{Os} + \text{Ir}) / (\text{Ru} + \text{Pt} + \text{Rh})$ из-за повышенного содержания Ru и Pt в Os-Ir-Ru сплавах.

Согласно исследованиям Д. Бэрда и В. Бассета [20], наличие рутениевого тренда химических составов для Ru-Os-Ir(±Pt) сплавов Витватерс-

Таблица 2. Начальный Os-изотопный состав и модельный T_{Ma}^{CHUR} возраст МПГ золоторудного поля Эвандер**Table 2.** Initial Os-isotope composition and model T_{Ma}^{CHUR} age of PGMs from the Evander Goldfield

№ анализа	Номер образца, номер рисунка	Минеральные ассоциации	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	1 σ	T_{Ma}^{CHUR} , млрд лет	1 σ
1	W1-1, рис. 2а	(Ru,Pt,Os,Ir)+(Ru,Os,Ir)+SP	0.10648	0.00023	3.064	0.039
2	W1-2	(Ru,Ir,Os,Pt)+SP	0.10651	0.00010	3.060	0.014
3	W1-3	(Os,Ru,Ir,Pt)+SP	0.10657	0.00008	3.051	0.011
4	W1-5, рис. 2в	(Ru,Os,Pt,Ir)+(Ru,Pt,Os,Ir)+SP	0.10613	0.00006	3.111	0.008
5	W1-6_1, рис. 2и	(Os,Ir)+ERL	0.10482	0.00002	3.287	0.002
6	W1-6_2, рис. 2и	ERL+(Os,Ir)	0.10483	0.00002	3.286	0.002
7	W1-7	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10565	0.00004	3.175	0.006
8	W1-9	(Ru,Os,Pt,Ir)+SP	0.10500	0.00006	3.263	0.008
9	W1-12	(Ru,Ir,Pt,Os)+SP	0.10595	0.00012	3.135	0.016
10	W1-15	(Ru,Ir,Pt,Os)+SP	0.10481	0.00006	3.288	0.008
11	W1-17	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10749	0.00006	2.927	0.007
12	W1-20_1	(Os,Ru,Ir,Pt)+LR+SP	0.10528	0.00002	3.225	0.002
13	W1-20_2	LR +(Os,Ru,Ir,Pt)+SP	0.10533	0.00003	3.218	0.004
14	W1-24	(Ru,Pt,Os,Ir)+LR+SP	0.10512	0.00013	3.247	0.017
15	W1-25	(Ru,Pt,Ir,Os)+SP	0.10694	0.00020	3.002	0.027
16	W1-26, рис. 2г	(Ru,Os,Ir,Pt)+(Ru, Ir,Pt,Os)+SP	0.10678	0.00011	3.023	0.015
17	W1-27, рис. 2д	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10732	0.00015	2.950	0.020
18	W1-28	(Ru,Pt,Os,Ir)+SP	0.10774	0.00031	2.893	0.042
19	W1-33	(Ru,Os,Ir)+ (Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10685	0.00010	3.014	0.014
20	W1-37	(Ru,Pt,Ir,Os)+SP	0.10619	0.00017	3.103	0.022
21	W1-51	(Os,Ru,Ir)+PTS-IRS	0.10736	0.00003	2.945	0.005
22	W1-52	(Ru,Pt,Os,Ir)+SP	0.10691	0.00005	3.006	0.006
23	W1-57	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10504	0.00005	3.257	0.006
24	W1-58	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10641	0.00006	3.073	0.008
25	W1-62	(Ru,Os,Pt,Ir)+SP	0.10713	0.00006	2.976	0.008
26	W1-63	(Ru,Pt,Os,Ir)+(Pt,Ru,Os,Fe)+SP	0.10521	0.00002	3.235	0.003
27	W1-68	LR	0.10496	0.00005	3.268	0.007
28	W1-69	(Ru,Pt,Ir,Os)+SP	0.10704	0.00063	2.988	0.085
29	W1-71	(Pt,Ru,Os,Fe)	0.10847	0.00013	2.795	0.017
30	W1-75	(Ru,Pt,Os,Ir)	0.10710	0.00006	2.980	0.008
31	W1-80	(Ru,Os,Ir,Pt)+LR	0.10691	0.00005	3.006	0.006
32	W1-82	(Ru,Pt,Ir,Os)+SP	0.10679	0.00006	3.022	0.008
33	W1-84	(Ru,Pt,Os,Ir)+SP	0.10895	0.00006	2.730	0.009
34	W1-85	(Ru,Pt,Ir)+SP	0.10713	0.00012	2.976	0.016
35	W1-89	(Os,Ru,Ir)+SP	0.10626	0.00005	3.093	0.006
36	W1-91	(Ru,Ir,Pt,Os)+SP	0.10684	0.00011	3.015	0.015
37	S30-1	Ru-rich alloy+SP	0.10798	0.00009	2.860	0.012
38	S30-13	Ru-rich alloy+SP	0.10512	0.00003	3.247	0.003
39	S30-12	Ru-rich alloy+SP	0.10514	0.00003	3.244	0.004
40	S30-16	OSR + SP	0.10561	0.00003	3.181	0.005
41	S30-19	(Ru,Os,Pt,Ir) + (Os,Ru,Ir)	0.10798	0.00006	2.861	0.008
42	S30-22	(Os,Ru,Ir,Pt)+SP	0.10533	0.00001	3.218	0.002
43	S30-23	Ru-rich alloy+SP	0.10510	0.00002	3.249	0.003
44	S30-24	Ru-rich alloy+SP	0.10508	0.00002	3.252	0.002
45	S30-25	OSR-RURS	0.10468	0.00002	3.306	0.003
46	S30-29	Ru-Ir-Os sulfoarsenide	0.10791	0.00003	2.870	0.004
47	S30-30	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10570	0.00005	3.169	0.006
48	S30-31	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10520	0.00003	3.236	0.004
49	S30-35	(Ru,Os,Ir,Pt)+SP	0.10714	0.00002	2.975	0.003
50	S30-36	Ru-rich alloy+SP	0.10780	0.00014	2.885	0.018
51	S30-39	Ru-rich alloy+SP	0.10609	0.00002	3.116	0.003
52	S30-40	Ru-rich alloy+SP	0.10825	0.00004	2.826	0.005
53	S30-41	Ru-rich alloy + LR	0.10568	0.00002	3.171	0.002
54	S30-43	(Ru,Pt,Fe)	0.10719	0.00006	2.968	0.008
55	S30-49	(Ru,Ir,Pt)	0.10597	0.00002	3.132	0.003
56	S30-50	Ru-rich alloy+SP	0.10654	0.00002	3.055	0.003

Таблица 2. Окончание

Table 2. Ending

№ анализа	Номер образца, номер рисунка	Минеральные ассоциации	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	1 σ	$T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$, млрд лет	1 σ
57	S30-54	(Ru,Ir,Os,Pt)+ <i>SP</i>	0.10484	0.00002	3.284	0.002
58	S30-56	<i>LR</i>	0.10740	0.00002	2.939	0.003
59	S30-57	(Ru,Ir,Os)	0.10695	0.00003	3.000	0.004
60	S30-58	Ru-rich alloy	0.10600	0.00005	3.128	0.007
61	S30-60	<i>OSR-RURS</i> +(Os,Ir,Ru)+ <i>SP</i>	0.10620	0.00002	3.101	0.003
62	S30-65	(Ru,Pt)+(Ru,Pt,Ir)+ <i>SP</i>	0.10635	0.00006	3.081	0.007
63	S30-68	(Ru,Os,Pt,Ir)	0.10764	0.00003	2.907	0.003
64	S30-69	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10771	0.00003	2.897	0.003
65	S30-71	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10468	0.00003	3.306	0.004
66	S30-72	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10703	0.00003	2.989	0.004
67	S30-73	<i>OSR-RURS</i>	0.10495	0.00004	3.270	0.005
68	S30-76	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10518	0.00002	3.239	0.003
69	S30-77	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10533	0.00004	3.218	0.006
70	S30-78	<i>ERL-LR</i>	0.10503	0.00003	3.259	0.003
71	S30-79	<i>OSR-IRS</i>	0.10494	0.00002	3.271	0.003
72	S30-80	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10520	0.00003	3.236	0.004
73	S30-81	(Ru,Os,Ir,Pt)	0.10770	0.00002	2.899	0.003
74	S30-82	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10539	0.00002	3.210	0.003
75	S30-85	(Ru,Os,Pt,Ir)	0.10576	0.00001	3.161	0.002
76	S30-87	(Ru,Os,Pt,Ir)	0.10670	0.00003	3.033	0.004
77	S30-89	(Os,Ru,Pt,Ir)	0.10640	0.00002	3.074	0.003
78	S30-92	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10599	0.00003	3.130	0.004
79	S30-93	<i>ERL-LR</i>	0.10500	0.00002	3.263	0.003
80	S30-94	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10672	0.00001	3.031	0.002
81	S30-95	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10748	0.00002	2.930	0.002
82	S30-97	(Ru,Os,Ir,Pt)	0.10749	0.00002	2.927	0.002
83	S30-98	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10724	0.00010	2.961	0.013
84	S30-99	(Ru,Ir,Pt,Os)	0.10532	0.00003	3.220	0.004
85	S30-103	(Ru,Os,Pt,Ir)	0.10511	0.00002	3.248	0.003
86	S30-104	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10538	0.00001	3.212	0.002
87	S30-105	Ru-rich alloy+ <i>SP</i> +Au	0.10638	0.00012	3.077	0.017
88	S30-106	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10454	0.00001	3.325	0.002
89	S30-107	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10449	0.00001	3.331	0.002
90	S30-156	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10523	0.00002	3.232	0.003
91	S30-157	(Os,Ir)	0.10507	0.00003	3.253	0.003
92	S30-158	Ru-rich alloy+ <i>SP</i>	0.10641	0.00001	3.073	0.002

Примечание. Анализы 1–36 выполнены в ЦИИ ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург), анализы 37–92 – в Университете Дурхама (Великобритания). $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$ – модельный возраст рассчитан с учетом данных изотопного состава осмия в CHUR [22] и константы распада ^{187}Re , $\lambda = 1.666 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$ [67]. (Ru,Os,Ir), Ru-rich alloy – рутений; (Ru,Os,Pt,Ir), (Ru,Pt,Os,Ir), (Ru,Os,Ir,Pt), (Ru,Ir,Pt,Os), (Ru,Pt,Ir), (Ru,Pt), (Pt,Ru,Os,Fe) – поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm\text{Fe}$); (Os,Ir), (Os,Ir,Ru) – осмий; *LR* – лаурит, *ERL* – эрликманит, *SP* – сперрилит, *PTS* – платарсит, *IRS* – ирарсит, *OSR* – осарсит, *RURS* – руарсит, Au – самородное золото.

Note. Analyses 1–36 were performed at Centre of Isotopic Research of Russian Geological Research Institute (St-Petersburg), analyses 37–92 at Durham University (UK). $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$ ages were calculated using CHUR values estimated in [22] and a ^{187}Re decay constant of $\lambda = 1.666 \cdot 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ [67]. (Ru,Os,Ir), Ru-rich alloy – ruthenium; (Ru,Os,Pt,Ir), (Ru,Pt,Os,Ir), (Ru,Os,Ir,Pt), (Ru,Ir,Pt,Os), (Ru,Pt,Ir), (Ru,Pt), (Pt,Ru,Os,Fe) – polycomponent solid solution series of the system Ru-Os-Ir-Pt ($\pm\text{Fe}$); (Os,Ir), (Os,Ir,Ru) – osmium; *LR* – laurite, *ERL* – erlichmanite, *SP* – sperrylite, *PTS* – platarsite, *IRS* – irarsite, *OSR* – osarsite, *RURS* – ruarsite, Au – native gold.

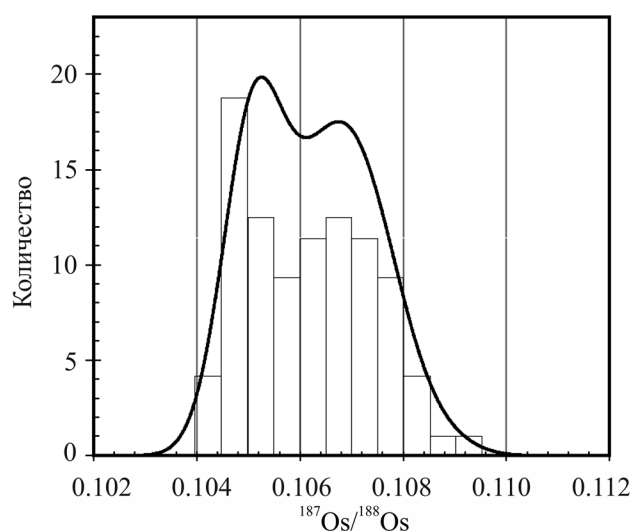
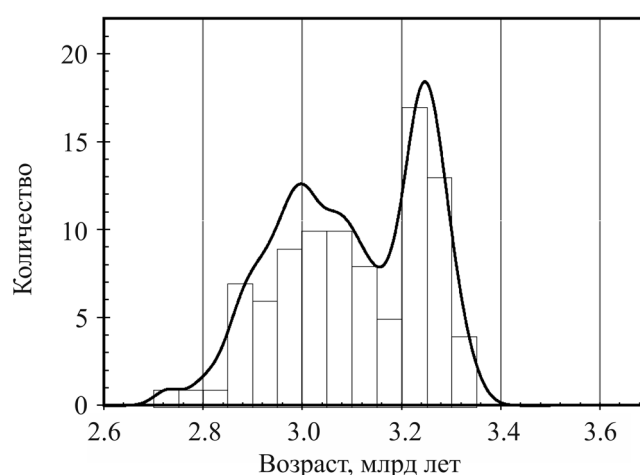
рандского бассейна (см. рис. 3а) свидетельствует об образовании данных минералов в условиях высоких давлений мантийных глубин. Высоко-температурная природа образования Ru-Os сульфидов была подтверждена экспериментально [16]. Верхняя термальная стабильность лаурита оказа-

лась равной 1200–1250°C при $\log f_{\text{S}_2} = -1$; при этом лаурит может находиться в равновесии с Os-Ir сплавами при 1200–1250°C и $\log f_{\text{S}_2}$ в интервале от –0.39 до –0.07 [16].

Близкие по составу поликомпонентные твердые растворы платиноидов были обнаружены в шли-

Таблица 3. Os-изотопные статистические данные для разных групп МПГ золоторудного поля Эвандер**Table 3.** Average Os-isotope characteristics of different PGM groups from the Evander Goldfield

Группа МПГ	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$				Модельный $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$ возраст, млрд лет			
	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
1, n=42	0.10519	0.00037	0.10449	0.10599	3.237	0.049	3.129	3.331
2, n=47	0.10696	0.00055	0.10600	0.10799	2.998	0.074	2.859	3.128
3, n=3	0.10855	0.00036	0.10824	0.10895	2.783	0.049	2.729	2.825

**Рис. 4.** Гистограмма частоты встречаемости Os-изотопного состава осмия в МПГ золоторудного поля Эвандер.**Fig. 4.** Relative probability histogram for Os-isotope composition of PGMs from the Evander Goldfield.**Рис. 5.** Гистограмма частоты встречаемости Os-изотопного возраста $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$ МПГ конгломератной формации Кимберли золоторудного поля Эвандер.**Fig. 5.** Relative probability histogram for Os-isotope $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$ age of PGMs from the Evander Goldfield.

ховых ассоциациях без видимой связи с коренным источником в пределах Корякского нагорья на Дальнем Востоке [11], а также в тесной парагенетической связи с Гулинским клинопироксенит-дунитовым массивом на севере Сибирской платформы [9]. Учитывая, что платина с тугоплавкими платиноидами образует ограниченные изоморфные смеси [13, 49], выявление природных поликомпонентных растворов системы Ru-Os-Ir-Pt ($\pm$ Fe) указывает на особые геодинамические условия их образования. Формирование изученного минерального парагенезиса платиноидов свидетельствует о стабильных условиях на значительных мантийных глубинах, характеризующихся повышенными P - T параметрами, определяя вмещающие их ультрамафитовые субстраты как рудообразующие системы мантийного генезиса [5].

Для объяснения происхождения более чем 96 тыс. т золота, содержащегося в бассейне [30], были предложены три модели/гипотезы.

1. Россыпная модель предполагает, что благороднометалльная минерализация является детритовым/обломочным материалом более древнего об-

ширного по территории гранит-зеленокаменного источника, который был доставлен в бассейн и сконцентрирован речными/дельтовыми процессами [24, 36, 40, 52, 54 и др.].

2. Модифицированная россыпная модель отводит значительную роль гидротермальной переработке для большей части золота/МПГ. В этой модели россыпное золото и сопутствующие МПГ должны были быть мобилизованы гидротермальными или метаморфическими флюидами и локально осаждены повторно вместе с другими минералами [31, 32, 63 и др.].

3. Метаморфическая/гидротермальная модель предполагает, что благородные металлы переносились в растворах из-за пределов бассейна посредством метаморфических или гидротермальных флюидов после образования бассейна [18, 34, 58, 59, 60 и др.].

Возможность определения времени образования разных рудных минералов позволила провести проверку этих гипотез [38, 42, 43, 48, 50, 65]. При изучении **Re-Os изотопной системы золота и пирита** выявлено [42, 43], что изохронный возраст руд-

ных минералов является более древним по сравнению с возрастом отложений бассейна, что свидетельствует в пользу их обломочного происхождения. Пилотные исследования Ru-Os-Ir сплавов золоторудного поля Эвандер позволили сделать близкие выводы [8, 48]. Другие исследователи [50, 65] при изучении возраста пирита установили, что он моложе отложений бассейна и интерпретировали полученные результаты в рамках модифицированной россыпной модели, что согласуется с некоторыми результатами изучения Os-Ir сплавов Витватерсранда [38].

Так как величина $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ во всех изученных нами образцах оказалась менее 0.0006, то при обсуждении результатов можно пренебречь изотопными эффектами, обусловленными радиоактивным распадом ^{187}Re in situ. Вариации изотопного состава осмия в индивидуальных зернах МПГ из золоторудной конгломератной формации Кимберли ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ от 0.10449 до 0.10895) оказались в целом близки к Os-изотопным составам МПГ золоторудных полей Эвандер и Велком, расположенных в восточной и южной частях Витватерсрандского бассейна соответственно [8, 38, 48]. Однако для МПГ золоторудного поля Велком наряду с широким диапазоном $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ отмечаются супрахондритовые значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (0.1056–0.1649 [38, 48]). Для МПГ золоторудного поля Эвандер помимо субхондритовых $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ значений (0.1052–0.1091, $n = 22$ [8, 48]) также установлены наименее “радиогенные” субхондритовые $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ значения для МПГ Витватерсрандского бассейна (0.0987–0.1024, $n = 3$ [48]). Средние значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}}$ основных групп МПГ конгломератной формации Кимберли (см. табл. 3), полученные с помощью метода LA MC-ICP MS, в пределах погрешности совпадают с Os-изотопными параметрами МПГ золоторудного поля Эвандер, охарактеризованными методом N-TIMS ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1053 \pm 0.0001$, $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}} = 3.222$ млрд лет, $n = 11$ и 0.1065 ± 0.0003 , $T_{\text{Ma}}^{\text{CHUR}} = 3.060$ млрд лет, $n = 8$, соответственно [8, 48]).

Присутствие в россыпях разновозрастных МПГ, формирование которых происходило на разных тектоно-магматических этапах геологической истории Земли, характерно для многих россыпных проявлений и месторождений [1, 4, 6, 7, 10, 12 и др.]. Выявленная дискретность платиноидного минералообразования согласуется с представлениями о наличии глобальных этапов мантийного платино-металльного рудогенеза, контролируемого глубинными геодинамическими процессами в мантии [21, 27 и др.]. Совпадение архейских датировок для золоторудных полей Витватерсранда свидетельствует о неоднократных рудных процессах в ранней истории Земли. Выявленные Os-изотопные возрасты Ru-Os-Ir-Pt сплавов, Ru-Os сульфидов и поликомпонентных твердых растворов системы Ru-Os-

Ir-Pt($\pm\text{Fe}$) из конгломератной формации Кимберли также свидетельствуют в пользу обломочного (россыпного) происхождения платиноидной минерализации, подтверждая высокую степень устойчивости Os-изотопной системы МПГ к вторичным воздействиям, широко проявленным в пределах Витватерсрандского бассейна.

Выявленные минералогические и изотопно-геохимические особенности МПГ Витватерсранда могут быть обусловлены разными коренными источниками, из которых они поступали в виде детритового материала в пределы бассейна. В данном контексте образования зеленокаменного пояса Мурчисон (Murchison Greenstone Belt), имеющего возраст 3.70–2.97 млрд лет, на северо-востоке Каапвальского Кратона наряду с еще более древними (3.3–3.5 млрд лет) ультрамафитами Барбертонского зеленокаменного пояса (Barberton Greenstone Belt) [25 и др.] на востоке могли быть источниками МПГ россыпей Витватерсрандского бассейна. Однако их металлогеническая характеристика не отражает таковой Витватерсрандских россыпей. Наиболее вероятно, что основным источником МПГ Витватерсрандского бассейна были мантийные ультрамафиты архея пока неустановленной формационной принадлежности.

ВЫВОДЫ

Совокупность полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. По результатам микрорентгеноспектрального анализа установлено отличие состава МПГ из конгломератной формации Кимберли в пределах золоторудного поля Эвандер от особенностей состава платиноидной минерализации других золоторудных полей Витватерсрандского бассейна.

2. Вещественные характеристики Os-содержащих МПГ свидетельствуют в пользу образования МПГ в мантийных условиях.

3. Наличие поликомпонентных твердых растворов системы Ru-Os-Ir-Pt($\pm\text{Fe}$) предполагает слабую дифференциацию в отношении элементов платиновой группы архейской мантии.

4. Пониженные относительно хондритового универсального резервуара (CHUR) значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в МПГ свидетельствуют о субхондритовом источнике рудного вещества.

5. Платиноидная минерализация попадала в россыпи путем ее механического высвобождения при дезинтеграции материнских пород (предположительно останцов зеленокаменных поясов, развитых к северо-востоку и востоку от золоторудного поля Эвандер).

6. Выявленные минеральные ассоциации, содержащие тугоплавкие платиноиды, являются уникальным источником информации о мантийных процессах в ранней истории Земли.

Авторы признательны К. Дэйлу за содействие при проведении аналитических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-05-08332-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баданина И.Ю., Малич К.Н., Белоусова Е.А., Мурзин В.В., Лорд Р.А. (2014) Осмиево-изотопная систематика Ru-Os-Ir сплавов и Ru-Os сульфидов дунит-гарцбургитовых массивов: синтез новых данных. *Ежегодник-2013*. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 161, 167-172.
2. Баданина И.Ю., Малич К.Н., Мурзин В.В., Хиллер В.В., Главатских С.П. (2013) Минералогическо-геохимические особенности платиноидной минерализации Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива (Средний Урал, Россия). *Ежегодник-2012*. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160, 188-192.
3. Косовец Т.Н. (2015) Представления о генезисе золотоурановых месторождений Витватерсранда в свете данных по изотопии серы, кислорода, углерода. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (2), 22-33.
4. Костоянов А.И. (1998) Модельный Re-Os возраст самородных платиновых минералов. *Геология руд. месторождений*, **40**(6), 540-545.
5. Малич К.Н., Баданина И.Ю. (1998) Природные поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt-Fe, их генетическое и прикладное значение. *Докл. АН*, **363**(1), 93-96.
6. Малич К.Н., Баданина И.Ю. (2014) Химический состав и осмиевая изотопия Ru-Os-Ir сплавов Кунарского дунит-гарцбургитового комплекса (северо-восточный Таймыр, Россия). *Изв. вузов. Геология и разведка*, (1), 24-29.
7. Малич К.Н., Костоянов А.И. (1999) Модельный Re-Os-возраст платиноидной минерализации Гулинского массива (север Сибирской платформы, Россия). *Геология руд. месторождений*, **41**(2), 143-153.
8. Малич К.Н., Костоянов А.И., Меркле Р.К.В. (2000) Вещественный состав и осмиевая изотопия платиноидной минерализации Восточного Витватерсранда (Южная Африка). *Геология руд. месторождений*, **42**(3), 281-295.
9. Малич К.Н., Лопатин Г.Г. (1997) Новые данные о металлогении уникального Гулинского клинопироксенит-дунитового массива (Северная Сибирь, Россия). *Геология руд. месторождений*, **39**(3), 247-257.
10. Округин А.В., Костоянов А.И., Шевченко С.С., Лазаренков В.Г. (2006) Модельный Re-Os-возраст минералов платиновой группы из "виллюйских" россыпей востока Сибирской платформы. *Докл. АН*, **410**(3), 372-375.
11. Рудашевский Н.С. (1989) Платиноиды в породах ультрамафитовых формаций (минералогия и генезис). Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Л., 42 с.
12. Рудашевский Н.С., Костоянов А.И., Рудашевский В.Н. (1999) Минералогические и изотопные свидетельства происхождения массивов альпинотипной формации (на примере Усть-Бельского массива, Корякское нагорье). *Записки ВМО*, **128**(4), 11-28.
13. Савицкий Е.М., Полякова В.П. (1975) *Металловедение платиновых металлов*. Москва: Металлургия, 423 с.
14. Щеглов А.Д. (1994) О металлогении Южно-Африканской Республики, генезисе золоторудных месторождений Витватерсранда и проблеме открытия их аналогов в России. СПб.: ВСЕГЕИ, 44 с.
15. Allegre C.J., Luck J.-M. (1980) Osmium isotopes as petrogenetic and geological tracers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **48**, 148-154.
16. Andrews D.R.A., Brenan J.M. (2002) Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite and Os-Ir alloy. *Canad. Miner.*, **40**, 1705-1716.
17. Badanina I.Yu., Malitch K.N., Lord R.A., Belousova E.A., Meisel T.C. (2016) Closed-system behaviour of the Re-Os isotope system recorded in primary and secondary PGM assemblages: evidence from a mantle chromitite at Harold's Grave (Shetland ophiolite Complex, Scotland). *Ore Geology Reviews*, **75**, 174-185.
18. Barnicoat A.C., Henderson I.H.C., Knipe R.J., Yardley B.W.D., Napier R.W., Fox N.P.C., Kenyon A.K., Muntingh D.J., Strydom D., Winkler K.S., Lawrence S.R., Cornford C. (1997) Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature*, **386**, 820-824.
19. Barton E.S., Compston W., Williams I.S., Bristow J.W., Hallbauer D.K., Smith C.B. (1989) Provenance ages for the Witwatersrand Supergroup and the Ventersdorp contact reef: constraints from ion microprobe U-Pb ages of detrital zircons. *Econ. Geol.*, **84**, 2012-2019.
20. Bird J.M., Bassett W.A. (1980) Evidence of a deep mantle history in terrestrial osmium-iridium-ruthenium alloys. *J. Geophys. Res.*, **85**, 5461-5470.
21. Carlson R.W. (2002) Osmium remembers. *Science*, **296**, 475-477.
22. Chen J.H., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J. (1998) Re-Os systematics in chondrites and the fractionation of the platinum-group elements in the early solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **62**, 3379-3392.
23. Cousins C.A. (1973) Platinoids in the Witwatersrand system. *J. South African Institute Mining Metallurgy*, **73**, 184-199.
24. Depiné M., Frimmel H.E., Emsbo P., Koenig A.E., Kern M. (2013) Trace element distribution in uraninite from Mesoarchean Witwatersrand conglomerates (South Africa) supports placer model and magmatogenic source. *Mineral. Depos.*, **48**, 423-435.
25. De Wit M.J., Tredoux M. (1988) PGE in the 3.5 Ga Jamestown ophiolite complex, Barberton greenstone belt, with implications for PGE distribution in the simatic lithosphere. *Geoplatinum 87* (Prichard H.M., Potts P.J., Bowles J.F.W., Cribb S.J. eds.). London, Elsevier, 319-341.
26. Dickin A.P., Richardson J.M., Crockett J.H., McNutt R.H., Peredery W.V. (1992) Osmium isotope evidence for a crustal origin of platinum-group elements in the Sudbury nickel ore. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 3531-3537.
27. Dobretsov N.L., Kiryashkin A.G. (1998) Deep-Level Geodynamics. Rotterdam, Netherlands, Swets and Zeitlinger, 328 p.
28. Du Toit A.L. (1954) *Geology of South Africa*, 3rd ed. Edinburgh; London: Oliver and Boyd, 611 p.

29. Feather C.E. (1976) Mineralogy of platinum-group minerals in the Witwatersrand, South Africa. *Econ. Geol.*, **71**, 1399-1428.
30. Frimmel H.E. (2014) A giant Mesoarchean crustal gold-enrichment episode: Possible causes and consequences for exploration. *Soc. Econ. Geologists. Spec. Publ.*, **18**, 209-234.
31. Frimmel H.E., Gartz V.H. (1997) Witwatersrand gold particle chemistry matches model of metamorphosed, hydrothermally altered placer deposits. *Mineral. Depos.*, **32**, 523-530.
32. Frimmel H.E., Groves D.I., Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Minter W.E.L. (2005) The formation and preservation of the Witwatersrand goldfields, the world's largest gold province. *Econ. Geol.*, **100th Anniversary Volume** (Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.P. eds.), 769-797.
33. Frimmel H.E., Minter W.E.L. (2002) Recent developments concerning the geological history and genesis of the Witwatersrand gold deposits, South Africa. *Soc. Econ. Geologists. Spec. Publ.*, **9**, 17-45.
34. Graton L.C. (1930) Hydrothermal origin of the Rand gold deposits. Part I. Testimony of the conglomerates. *Econ. Geol.*, **25** (Supplement to Number 3), 1-185.
35. Hallbauer D.K. (1986) The mineralogy and geochemistry of Witwatersrand pyrite, gold, uranium and carbonaceous matter. Mineral deposits of southern Africa (Anhaeusser C.R., Maske S. eds.). Geological Society of South Africa. Johannesburg, 731-752.
36. Hallbauer D.K., Utter T. (1977) Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent river deposits and the fossil placers of the Witwatersrand. *Mineral. Depos.*, **12**, 296-306.
37. Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canad. Mineral.*, **29**, 231-237.
38. Hart S.R., Kinloch E.D. (1989) Osmium isotope systematics in Witwatersrand and Bushveld ore deposits. *Econ. Geol.*, **84**, 1651-1655.
39. Hattori K. (2002) A review of rhenium-osmium isotope geochemistry of platinum-group minerals and platinum mineralization. The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements (Cabri L.J. ed.). Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Spec. vol. **54**, 251-271.
40. Horscroft F.D.M., Mossman D.J., Reimer T.O., Hennigh Q. (2011) Witwatersrand metallogenesis: The case for (modified) syngeneses. Society for Sedimentary Geology (SEPM). Spec. Publ., **101**, 75-95.
41. Junk S.A. (2001) Ancient artefacts and modern analytical techniques – usefulness of laser ablation ICP-MS demonstrated with ancient gold coins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **181**, 723-727.
42. Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Titley S., Walshe J. (2001) A detrital model for the origin of gold and sulfides in the Witwatersrand basin based on Re-Os isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 2149-2159.
43. Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Walshe J., England G. (2002) A major Archean gold and crust-forming event in the Kaapvaal craton, South Africa. *Science*, **297**, 1856-1858.
44. Lambert D.D., Walker R.J., Morgan J.W., Shirey S.B., Carlson R.W., Zientek M.L., Lipin B.R., Koski M.S., Cooper R.L. (1994) Re-Os and Sm-Nd isotope geochemistry of the Stillwater Complex, Montana: implications for the petrogenesis of the J-M Reef. *J. Petrol.*, **35**, 1717-1753.
45. Ludwig K.R. (2003) User's Manual for ISOPLOT/Ex 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Spec. Publ., (4), 70 p.
46. Malitch K.N., Latypov R.M. (2011) Re-Os and S-isotope constraints on timing and source heterogeneity of PGE-Cu-Ni sulfide ores: a case study at the Talnakh ore junction (Russia). *Canad. Miner.*, **49**, 1653-1677.
47. Malitch K.N., Melcher F., Muhlhans H. (2001) Palladium and gold mineralization in podiform chromitite at Kraubath, Austria. *Mineral. Petrol.*, **73**, 247-277.
48. Malitch K.N., Merkle R.K.W. (2004) Ru-Os-Ir-Pt and Pt-Fe alloys from the Evander Goldfield (Witwatersrand Basin, South Africa): detrital origin inferred from compositional and osmium isotope data. *Canad. Miner.*, **42**, 631-650.
49. Massalski T.B. (ed.) (1993) Binary Alloy Phase Diagrams. Materials Park (Ohio): ASM Intern., 2224 p.
50. Mathur R., Gauert C., Ruiz J., Linton P. (2013) Evidence for mixing of Re-Os isotopes at <2.7 Ga and support of a remobilized placer model in Witwatersrand sulfides and native Au. *Lithos.*, **164-167**, 65-73.
51. McCandless T.E., Ruiz J. (1991) Osmium isotopes and crustal sources for platinum-group mineralization in the Bushveld Complex, South Africa. *Geology*, **19**, 1225-1228.
52. Mellor E.T. (1916) The conglomerates of Witwatersrand. *Transactions Institution Mining and Metallurgy*, **25**, 226-348.
53. Merkle R.K.W., Franklyn C.B. (1999) Milli-PIXE determination of trace elements in osmium-rich platinum-group minerals from the Witwatersrand basin, South Africa. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B158**, 156-161.
54. Minter W.E.L. (1999) Irrefutable detrital origin of Witwatersrand gold and evidence of eolian signatures. *Econ. Geol.*, **94**, 665-670.
55. Minter W.E.L., Goedhart M., Knight J., Frimmel H.E. (1993) Morphology of Witwatersrand gold grains from the the Basal reef: evidence for their detrital origin. *Econ. Geol.*, **88**, 237-248.
56. Nowell G.M., Pearson D.G., Parman S.W., Luguet A., Hanski E. (2008) Precise and accurate $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ and $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ measurements by Multi-collector Plasma Ionisation Mass Spectrometry, part II: Laser ablation and its application to single-grain Pt-Os and Re-Os geochronology. *Chem. Geol.*, **248**, 394-426.
57. Pearson D.G., Parman S.W., Nowell G.M. (2007) A link between large mantle melting events and continent growth seen in osmium isotopes. *Nature*, **449**, 202-205.
58. Phillips G.N., Law J.D.M. (1994) Metamorphism of the Witwatersrand gold fields: a review. *Ore Geology Reviews*, **9**, 1-31.
59. Phillips G.N., Law J.D.M. (2000) Witwatersrand gold fields: Geology, genesis and exploration. *Society Economic Geologists Reviews*, **13**, 439-500.
60. Phillips G.N., Powell R. (2011) Origin of Witwatersrand gold: A metamorphic devolatilisation-hydrothermal replacement model. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Applied Earth Sciences, section B*, **120**, 112-129.

61. Pretorius D.A. (1991) The sources of Witwatersrand gold and uranium: a continued difference of opinion. In: Historical Perspectives of Genetic Concepts and Case Histories of Famous Discoveries (Hutchinson R.W., Grauch R.I. eds.). Economic Geology Publishing Company. *Economic Geology Monograph*, **8**, 139-163.
62. Robb L.J., Davis D.W., Kamo S.L. (1990) U-Pb ages on single detrital zircon grains from the Witwatersrand Basin, South Africa: constraints on the age of sedimentation and on the evolution of granites adjacent to the basin. *J. Geol.*, **98**, 311-328.
63. Robb L.J., Meyer F.M. (1995) The Witwatersrand Basin, South Africa: Geologic framework and mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, **10**, 67-94.
64. Rosman K.J.R., Taylor P.D.P. (1998) Isotopic composition of the elements 1997. *Pure and Applied Chemistry*, **70**, 217-235.
65. Schaefer B.F., Pearson D.G., Rogers N.W., Barnicoat A.C. (2010) Re-Os isotope and PGE constraints on the timing and origin of gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Chem. Geol.*, **276**, 88-94.
66. Shirey S.B., Walker R.J. (1998) The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **26**, 423-500.
67. Smoliar M.I., Walker R.J., Morgan J.W. (1996) Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB meteorites. *Science*, **271**, 1099-1102.
68. Stevens G., Boer R.H., Gibson R.L. (1997) Metamorphism, fluid flow and gold remobilization in the Witwatersrand Basin: towards a unifying model. *South African Journal of Geology*, **100**, 363-375.
69. Tweedie E.B. (1986) The Evander Goldfield. *Mineral Deposits of Southern Africa* (Anhaeusser C.R., Maske S. eds). Geological Society of South Africa, Johannesburg, **1**, 705-730.
70. Walker R.J., Morgan J.W., Horan M.F., Czamanske G.K., Krogstad E.J., Fedorenko V.A., Kunilov V.E. (1994) Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 4179-4197.
71. Walker R.J., Morgan J.W., Naldrett A.J., Li C., Fasset J.D. (1991) Re-Os isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Sudbury igneous complex: evidence for a major crustal component. *Earth Planet. Science Lett.*, **105**, 416-429.
72. Young R.B. (1907) Notes on the auriferous conglomerates of the Witwatersrand. *Transactions Geological Society South Africa*, **10**, 17-30.

Chemical and isotopic composition of Os-rich alloys and sulfides from the Evander Goldfield of the Witwatersrand Basin (South Africa)

I. Yu. Badanina*, K. N. Malitch*, R. K. W. Merkle**, A. V. Antonov***,
I. N. Kapitonov***, V. V. Khiller*

*Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

**University of Pretoria, South Africa

***Russian Geological Research Institute (VSEGEI)

We firstly report compositional and isotope-geochemical characteristics of Ru-Os-Ir(-Pt) alloys, Ru-Os sulfides and polycomponent solid solutions of the system Ru-Os-Ir-Pt ($\pm$ Fe) derived from the Kimberley Reef within Evander Goldfield of the Witwatersrand Basin (South Africa). The study employed electron microprobe analysis and laser ablation attached to multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry. The obtained results are consistent with: 1) high-temperature formation of the studied platinum-group minerals, 2) sub-hondritic Archean source of platinum-group elements, 3) similarity of the initial Os-isotope composition in coexisting Os-rich alloys and Ru-Os sulfides and 4) significant Os-isotope variations in individual Ru-Os-Ir alloys, Ru-Os sulfides and polycomponent solid solutions of the Ru-Os-Ir-Pt ($\pm$ Fe) system. $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ages are used to discriminate between different models of noble metal mineralization origin within the Witwatersrand basin.

Key words: *platinum-group minerals, osmium isotope composition, Os-isotope age, conditions of formation, Witwatersrand basin, South Africa.*

REFERENCES

1. Badanina I.Yu., Malitch K.N., Belousova E.A., Murzin V.V., Lord R.A. (2014) Osmium-isotope systematics of Ru-Os-Ir alloys and Ru-Os sulphides from dunite-harzburgite massifs: synthesis of new data. *Yearbook-2013*. Trudy IGG UrO RAN. Vyp. 161, 167-171. (In Russian)
2. Badanina I.Yu., Malitch K.N., Murzin V.V., Khiller V.V., Glavatskikh S.P. (2013) Mineralogical and geochemical characteristics of PGE mineralization of the Verkh-Neivinsk dunite-harzburgite massif (middle Urals, Russia). *Yearbook-2012*. Trudy IGG UrO RAN. Vyp. 160, 188-192. (In Russian)
3. Kosovets T.N. (2015) Notions of Witwatersrand gold-uranium deposits genesis in the light of sulfur, oxygen

- and carbon isotopic characteristics]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geologiya i razvedka*, (2), 22-33. (in Russian)
4. Kostoyanov A.I. (1998) Model Re-Os age of platinum-group minerals. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **40**(6), 545-550. (in Russian)
 5. Malitch K.N., Badanina I.Yu. (1998) Natural polycomponent solid solutions of the system Ru-Os-Ir-Pt-Fe and their genetic and applied significance. *Dokl. Earth Sci.*, **363**(8), 1089-1092 (translated from *Doklady Akademii Nauk*, **363**(1), 93-96).
 6. Malitch K.N., Badanina I.Yu. (2014) Chemical composition and osmium isotopes of Ru-Os-Ir alloys from the Kunar dunite-harzburgite complex (north-eastern Taimyr, Russia). *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geologiya i razvedka*, (1), 24-29. (In Russian)
 7. Malitch K.N., Kostoyanov A.I. (1999) Model Re-Os isotopic age of the PGE mineralization at the Gulinsk Massif (at the northern Siberian Platform, Russia). *Geol. Ore Deposits*, **41**(2), 126-135 (translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **41**(2), 143-153).
 8. Malitch K.N., Kostoyanov A.I., Merkle R.K.W. (2000) Mineral composition and osmium isotopes of PGE-mineralization from the Eastern Witwatersrand, South Africa. *Geol. Ore Deposits*, **42** (3), 253-266 (translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **42** (3), 281-295).
 9. Malitch K.N., Lopatin G.G. (1997) New data on the metallogeny of the unique Guli klinopyroxenite-dunite massif (Northern Siberia, Russia). *Geol. Ore Deposits*, **39**(3), 209-218 (translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **39**(3), 247-257).
 10. Okrugin A.V., Kostoyanov A.I., Shevchenko S.S., Lazarenkov V.G. (2006) The model Re-Os age of platinum-group minerals from Vilyui Placers in the Eastern Siberian Craton. *Dokl. Earth Sci.*, **410**(7), 1044-1047 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **410**(3), 372-375).
 11. Rudashevskii N.S. (1998) *Platinoidy v porodakh ul'tramafitovykh formacij (mineralogiya i genesis)*. Extend. abstr. diss. dokt. geol.-min. nauk [Platinum-group elements in rocks of ultramafic formations (mineralogy and genesis) Dr. geol. and min. sci. diss. ext. abstr.]. St.Petersburg, 42 p. (In Russian)
 12. Rudashevskii N.S., Kostoyanov A.I., Rudashevskii V.N. (1999) Mineralogical and isotope evidences of origin of the Alpine-type massifs (the Ust'-Bel'sky massif, Koryak Highland, as an example). *Zapiski Vserossiyskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, **128**(4), 11-28. (In Russian)
 13. Savitskii E.M., Polyakova V.P. (1975) *Metallovedenie platinovykh metallov* [Metallurgical science of platinum-group metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 423 p. (in Russian)
 14. Shcheglov A.D. (1994) *O metallogenii Yuzhno-Afrikanskoi Respubliki, genezise zolotorudnykh mestorozhdenij Vitwatersranda i probleme otkrytiya ikh analogov v Rossii* [About metallogeny of the South African Republic, origin of gold deposits of the Witwatersrand, and problem of the discovery of their analogs in Russia]. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 44 p. (In Russian)
 15. Allegre C.J., Luck J.-M. (1980) Osmium isotopes as petrogenetic and geological tracers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **48**, 148-154.
 16. Andrews D.R.A., Brenan J.M. (2002) Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite and Os-Ir alloy. *Canad. Miner.*, **40**, 1705-1716.
 17. Badanina I.Yu., Malitch K.N., Lord R.A., Belousova E.A., Meisel T.C. (2016) Closed-system behaviour of the Re-Os isotope system recorded in primary and secondary PGM assemblages: evidence from a mantle chromitite at Harold's Grave (Shetland ophiolite Complex, Scotland). *Ore Geology Reviews*, **75**, 174-185.
 18. Barnicoat A.C., Henderson I.H.C., Knipe R.J., Yardley B.W.D., Napier R.W., Fox N.P. C., Kenyon A.K., Muntingh D.J., Strydom D., Winkler K.S., Lawrence S.R., Cornford C. (1997) Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature*, **386**, 820-824.
 19. Barton E.S., Compston W., Williams I.S., Bristow J.W., Hallbauer D.K., Smith C.B. (1989) Provenance ages for the Witwatersrand Supergroup and the Ventersdorp contact reef: constraints from ion microprobe U-Pb ages of detrital zircons. *Econ. Geol.*, **84**, 2012-2019.
 20. Bird J.M., Bassett W.A. (1980) Evidence of a deep mantle history in terrestrial osmium-iridium-ruthenium alloys. *J. Geophys. Res.*, **85**, 5461-5470.
 21. Carlson R.W. (2002) Osmium remembers. *Science*, **296**, 475-477.
 22. Chen J.H., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J. (1998) Re-Os systematics in chondrites and the fractionation of the platinum-group elements in the early solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **62**, 3379-3392.
 23. Cousins C.A. (1973) Platinoids in the Witwatersrand system. *J. South African Institute Mining Metallurgy*, **73**, 184-199.
 24. Depiné M., Frimmel H.E., Emsbo P., Koenig A.E., Kern M. (2013) Trace element distribution in uraninite from Mesoarchean Witwatersrand conglomerates (South Africa) supports placer model and magmatogenic source. *Mineral. Depos.*, **48**, 423-435.
 25. De Wit M.J., Tredoux M. (1988) PGE in the 3.5 Ga Jamestown ophiolite complex, Barberton greenstone belt, with implications for PGE distribution in the simatic lithosphere. *Geoplatinum 87* (Prichard H.M., Potts P.J., Bowles J.F.W., Cribb S.J. eds.). London, Elsevier, 319-341.
 26. Dickin A.P., Richardson J.M., Crockett J.H., McNutt R.H., Peredery W.V. (1992) Osmium isotope evidence for a crustal origin of platinum-group elements in the Sudbury nickel ore. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 3531-3537.
 27. Dobretsov N.L., Kiryashkin A.G. (1998) *Deep-Level Geodynamics*. Rotterdam, Netherlands, Swets and Zeitlinger, 328 p.
 28. Du Toit A.L. (1954) *Geology of South Africa*, 3rd ed. Edinburgh; London, Oliver and Boyd, 611 p.
 29. Feather C.E. (1976) Mineralogy of platinum-group minerals in the Witwatersrand, South Africa. *Econ. Geol.*, **71**, 1399-1428.
 30. Frimmel H.E. (2014) A giant Mesoarchean crustal gold-enrichment episode: Possible causes and consequences for exploration. *Soc. Econ. Geologists. Spec. Publ.*, **18**, 209-234.
 31. Frimmel H.E., Gartz V.H. (1997) Witwatersrand gold particle chemistry matches model of metamorphosed, hydrothermally altered placer deposits. *Mineral. Depos.*, **32**, 523-530.
 32. Frimmel H.E., Groves D.I., Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Minter W.E.L. (2005) The formation and preservation

- of the Witwatersrand goldfields, the world's largest gold province. *Econ. Geol.*, 100th Anniversary Volume (Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.P. eds.), 769-797.
33. Frimmel H.E., Minter W.E.L. (2002) Recent developments concerning the geological history and genesis of the Witwatersrand gold deposits, South Africa. *Soc. Econ. Geologists. Spec. Publ.*, **9**, 17-45.
 34. Graton L.C. (1930) Hydrothermal origin of the Rand gold deposits. Part I. Testimony of the conglomerates. *Econ. Geol.*, **25** (Supplement to Number 3), 1-185.
 35. Hallbauer D.K. (1986) The mineralogy and geochemistry of Witwatersrand pyrite, gold, uranium and carbonaceous matter. Mineral deposits of southern Africa (Anhaeusser C.R., Maske S. eds.). Geological Society of South Africa. Johannesburg, 731-752.
 36. Hallbauer D.K., Utter T. (1977) Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent river deposits and the fossil placers of the Witwatersrand. *Mineral. Depos.*, **12**, 296-306.
 37. Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canad. Mineral.*, **29**, 231-237.
 38. Hart S.R., Kinloch E.D. (1989) Osmium isotope systematics in Witwatersrand and Bushveld ore deposits. *Econ. Geol.*, **84**, 1651-1655.
 39. Hattori K. (2002) A review of rhenium-osmium isotope geochemistry of platinum-group minerals and platinum mineralization. The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements (Cabri L.J. ed.). Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Spec. vol. **54**, 251-271.
 40. Horscroft F.D.M., Mossman D.J., Reimer T.O., Hennigh Q. (2011) Witwatersrand metallogenesis: The case for (modified) syngensis. Society for Sedimentary Geology (SEPM). Spec. Publ., **101**, 75-95.
 41. Junk S.A. (2001) Ancient artefacts and modern analytical techniques – usefulness of laser ablation ICP-MS demonstrated with ancient gold coins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **181**, 723-727.
 42. Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Tittley S., Walshe J. (2001) A detrital model for the origin of gold and sulfides in the Witwatersrand basin based on Re-Os isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 2149-2159.
 43. Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Walshe J., England G. (2002) A major Archean gold and crust-forming event in the Kaapvaal craton, South Africa. *Science*, **297**, 1856-1858.
 44. Lambert D.D., Walker R.J., Morgan J.W., Shirey S.B., Carlson R.W., Zientek M.L., Lipin B.R., Koski M.S., Cooper R.L. (1994) Re-Os and Sm-Nd isotope geochemistry of the Stillwater Complex, Montana: implications for the petrogenesis of the J-M Reef. *J. Petrol.*, **35**, 1717-1753.
 45. Ludwig K.R. (2003) User's Manual for ISOPLOT/Ex 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Spec. Publ., (4), 70 p.
 46. Malitch K.N., Latypov R.M. (2011) Re-Os and S-isotope constraints on timing and source heterogeneity of PGE-Cu-Ni sulfide ores: a case study at the Talnakh ore junction (Russia). *Canad. Miner.*, **49**, 1653-1677.
 47. Malitch K.N., Melcher F., Muhlans H. (2001) Palladium and gold mineralization in podiform chromitite at Kraubath, Austria. *Mineral. Petrol.*, **73**, 247-277.
 48. Malitch K.N., Merkle R.K.W. (2004) Ru-Os-Ir-Pt and Pt-Fe alloys from the Evander Goldfield (Witwatersrand Basin, South Africa): detrital origin inferred from compositional and osmium isotope data. *Canad. Miner.*, **42**, 631-650.
 49. Massalski T.B. (ed.) (1993) Binary Alloy Phase Diagrams. Materials Park (Ohio): ASM Intern., 2224 p.
 50. Mathur R., Gauert C., Ruiz J., Linton P. (2013) Evidence for mixing of Re-Os isotopes at <2.7 Ga and support of a remobilized placer model in Witwatersrand sulfides and native Au. *Lithos*, **164-167**, 65-73.
 51. McCandless T.E., Ruiz J. (1991) Osmium isotopes and crustal sources for platinum-group mineralization in the Bushveld Complex, South Africa. *Geology*, **19**, 1225-1228.
 52. Mellor E.T. (1916) The conglomerates of Witwatersrand. *Transactions Institution Mining and Metallurgy*, **25**, 226-348.
 53. Merkle R.K.W., Franklyn C.B. (1999) Milli-PIXE determination of trace elements in osmium-rich platinum-group minerals from the Witwatersrand basin, South Africa. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B158**, 156-161.
 54. Minter W.E.L. (1999) Irrefutable detrital origin of Witwatersrand gold and evidence of eolian signatures. *Econ. Geol.*, **94**, 665-670.
 55. Minter W.E.L., Goedhart M., Knight J., Frimmel H.E. (1993) Morphology of Witwatersrand gold grains from the the Basal reef: evidence for their detrital origin. *Econ. Geol.*, **88**, 237-248.
 56. Nowell G.M., Pearson D.G., Parman S.W., Luguet A., Hanski E. (2008) Precise and accurate $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ and $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ measurements by Multi-collector Plasma Ionisation Mass Spectrometry, part II: Laser ablation and its application to single-grain Pt-Os and Re-Os geochronology. *Chem. Geol.*, **248**, 394-426.
 57. Pearson D.G., Parman S.W., Nowell G.M. (2007) A link between large mantle melting events and continent growth seen in osmium isotopes. *Nature*, **449**, 202-205.
 58. Phillips G.N., Law J.D.M. (1994) Metamorphism of the Witwatersrand gold fields: a review. *Ore Geology Reviews*, **9**, 1-31.
 59. Phillips G.N., Law J.D.M. (2000) Witwatersrand gold fields: Geology, genesis and exploration. *Society Economic Geologists Reviews*, **13**, 439-500.
 60. Phillips G.N., Powell R. (2011) Origin of Witwatersrand gold: A metamorphic devolatilisation-hydrothermal replacement model. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Applied Earth Sciences, section B*, **120**, 112-129.
 61. Pretorius D.A. (1991) The sources of Witwatersrand gold and uranium: a continued difference of opinion. In: Historical Perspectives of Genetic Concepts and Case Histories of Famous Discoveries (Hutchinson R.W., Grauch R.I. eds.). Economic Geology Publishing Company. *Economic Geology Monograph.*, **8**, 139-163.
 62. Robb L.J., Davis D.W., Kamo S.L. (1990) U-Pb ages on single detrital zircon grains from the Witwatersrand Basin, South Africa: constraints on the age of sedimentation and on the evolution of granites adjacent to the basin. *J. Geol.*, **98**, 311-328.

63. Robb L.J., Meyer F.M. (1995) The Witwatersrand Basin, South Africa: Geologic framework and mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, **10**, 67-94.
64. Rosman K.J.R., Taylor P.D.P. (1998) Isotopic composition of the elements 1997. *Pure and Applied Chemistry*, **70**, 217-235.
65. Schaefer B.F., Pearson D.G., Rogers N.W., Barnicoat A.C. (2010) Re-Os isotope and PGE constraints on the timing and origin of gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Chem. Geol.*, **276**, 88-94.
66. Shirey S.B., Walker R.J. (1998) The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **26**, 423-500.
67. Smoliar M.I., Walker R.J., Morgan J.W. (1996) Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB meteorites. *Science*, **271**, 1099-1102.
68. Stevens G., Boer R.H., Gibson R.L. (1997) Metamorphism, fluid flow and gold remobilization in the Witwatersrand Basin: towards a unifying model. *South African Journal of Geology*, **100**, 363-375.
69. Tweedie E.B. (1986) The Evander Goldfield. *Mineral Deposits of Southern Africa* (Anhaeusser C.R., Maske S. eds). Geological Society of South Africa, Johannesburg, **1**, 705-730.
70. Walker R.J., Morgan J.W., Horan M.F., Czamanske G.K., Krogstad E.J., Fedorenko V.A., Kunilov V.E. (1994) Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 4179-4197.
71. Walker R.J., Morgan J.W., Naldrett A.J., Li C., Fasset J.D. (1991) Re-Os isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Sudbury igneous complex: evidence for a major crustal component. *Earth Planet. Science Lett.*, **105**, 416-429.
72. Young R.B. (1907) Notes on the auriferous conglomerates of the Witwatersrand. *Transactions Geological Society South Africa*, **10**, 17-30.