



## КОМПЛЕКСНЫЕ ПАЛЕОРОССЫПИ ВИТВАТЕРСРАНДА

В.А. СТЕПАНОВ

ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр»  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
30, Северо-Восточное шоссе, г. Петропавловск-Камчатский 683002, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Расположенная в Южной Африке золотоносная провинция Витватерсранд является наиболее богатой в мире. Месторождения являются комплексными, из них наряду с золотом, серебром и ураном попутно добываются осмириды и алмазы. Генезис месторождений Витватерсранда дискусионен. Большинство местных геологов поддерживают гипотезу наличия палеороссыпей с последующим метаморфическим преобразованием рудоносных конгломератов. Кроме того, существуют эоловая, гидротермально-осадочная, гидротермально-осадочно-метаморфическая и магматическая модели рудообразования.

**Цель.** Установить генезис месторождений Витватерсранда.

**Материалы и методы.** Анализ опубликованной литературы и фактических данных.

**Результаты.** Месторождения Витватерсранда являются комплексными. Из них наряду с золотом, серебром и ураном попутно добывают осмириды и алмазы. Такой набор полезных компонентов не известен ни на одном из месторождений магматического или гидротермального генезиса. Учитывая приуроченность полезных компонентов к конгломератам, детритный характер большей части золотин и наличие разнообразных сопутствующих минералов тяжелой фракции, характерных для магматических пород кислого, основного и ультраосновного состава, гипотеза о первичной аллювиальной природе месторождений Витватерсрандской провинции выглядит наиболее обоснованной.

**Заключение.** Фактический материал указывает на аллювиальное происхождение месторождений Витватерсранда с последующим метаморфическим преобразованием рудоносных рифов. На первичное аллювиальное формирование рудоносных конгломератов указывает приуроченность золота и урана к русловым фациям с тенденцией накопления в базальных горизонтах рифов, наличие окатанных частиц золота, несущих следы транспортировки в аллювиальных потоках, а также набор минералов тяжелой фракции шлиха, характерный для россыпей.

**Ключевые слова:** золотоносная провинция, россыпь, конгломераты, золото, серебро, ртуть, уран, осмириды, алмазы

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**Для цитирования:** Степанов В.А. Комплексные палеороссыпи Витватерсранда. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2020;63(4):8—22. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-4-8-22>

Статья поступила в редакцию 02.07.2020

Принята к публикации 18.04.2021

Опубликована 31.05.2021

## WITWATERSRAND COMPOSITE PALEOPLACERS

VITALIY A. STEPANOV

*Scientific Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences  
30, Northeast Highway, Petropavlovsk-Kamchatsky 683002, Russia*

### ABSTRACT

**Background.** The Witwatersrand gold province located in South Africa is the richest in the world. The Witwatersrand deposits are composite, where osmirids and diamonds are mined along with gold, silver and uranium. The genesis of the Witwatersrand deposits is controversial. Most local geologists support the hypothesis of the presence of paleoplacer deposits with subsequent metamorphic transformation of ore-bearing conglomerates. In addition, there are aeolian, hydrothermal-sedimentary, hydrothermal-sedimentary-metamorphic and magmatic models of ore formation.

**Aim.** To establish the genesis of the Witwatersrand deposits.

**Materials and methods.** Analysis of published literature and factual data.

**Results.** Osmirids and diamonds are mined along with gold, silver and uranium from the composite Witwatersrand deposits. Such a set of useful components is not known in any of the deposits of magmatic or hydrothermal genesis. Considering the confinement of useful components to conglomerates, the detrital nature of most of the gold grains and the presence of various accompanying minerals in the heavy fraction, characteristic of igneous rocks of felsic, basic and ultrabasic composition, the hypothesis of the primary alluvial nature of the deposits of the Witwatersrand province looks the most reasonable.

**Conclusions.** The factual material indicates an alluvial origin of the Witwatersrand deposits with subsequent metamorphic transformation of ore-bearing reefs. The primary alluvial formation of ore-bearing conglomerates is indicated by the confinement of gold and uranium to channel facies with a tendency to accumulate in the basal horizons of the reefs, the presence of rounded gold particles bearing the traces of transportation in alluvial flows, as well as a set of minerals in the heavy fraction of concentrate, characteristic of placers.

**Keywords:** gold-bearing province, placer, conglomerates, gold, silver, mercury, uranium, osmirids, diamonds

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**Financial disclosure:** no financial support was provided for this study

**For citation:** Stepanov V.A. Witwatersrand composite paleoplacers. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2020;63(4):8–22. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-4-8-22>

*Manuscript received 02 July 2020*

*Accepted 18 April 2021*

*Published 31 May 2021*

Расположенная в Южной Африке золотоносная провинция Витватерсранд является наиболее богатой в мире. Это крупнейшее сосредоточение золота в структурах Земли, в котором находится около 70 тыс. т золота, из которых 40 тыс. т уже добыто [10]. Несмотря на более чем столетние исследования месторождений провинции, до сих пор не кончаются споры о генезисе золота Витватерсранда. Большинство местных геологов поддерживают гипотезу наличия здесь палеороссыпей. Но существует ряд вопросов: отсутствие ясно выраженных источников сноса рудного вещества,

малые размеры и высокая ртутистость самородного золота, обогащение золотом глинистых составляющих разреза, наличие пиритовой дробы, геохимические ассоциации S-Fe-As-Cu и U-C-Ti и другие [5]. Они заставляют модернизировать осадочную гипотезу и предлагать гидротермально-осадочную [29] или гидротермально-осадочно-метаморфическую модель рудообразования [4, 8, 16, 22]. Н.А. Шило относит Витватерсранд к месторождениям гидротермально-метасоматического генезиса. По его мнению, месторождение сформировалось в мезозоне земной коры, куда

со значительной глубины из одного источника и в течение длительного времени поступали золото, серебро, уран. К транспорту элементов, скорее всего, причастны флюиды, насыщенные цианидами или другими золотосодержащими комплексами, растворимыми в термах [19]. Обзор публикаций по изотопии серы, кислорода и углерода не снял дискуссионности вопроса об источниках поставки золота, установил отдельные источники поставки золота и урана и подтвердил действие в архее фотосинтеза как механизма пополнения кислорода в атмосфере [6]. В некоторых работах обосновывается магматическая модель формирования руд месторождения [3, 9, 15, 22].

На наш взгляд, главная особенность месторождения — это нахождение промышленных концентраций не только золота с входящими в его состав серебром и ртутью, но и попутно извлекаемых минералов урана, иридоминов и алмазов. Такой набор полезных компонентов характерен для россыпей Каапвальского и расположенного севернее Зимбабвийского кратонов, но не встречается в совокупности в пределах конкретных месторождений магматического или гидротермального генезиса.

#### Геологическое строение провинции

Золотоносная провинция Витватерсранд приурочена к крупной мульде или синклинорному прогибу в центральной части Каапвальского кратона. Прогиб вытянут в северо-восточном направлении на 400 км при ширине порядка 200 км (рис. 1). Он представляет собой эрозионный останец от значительно более обширного бассейна, который формировался в течение длительного интервала времени (3074—2714 млн лет) в центральной и южной частях Каапвальского кратона [39]. Судя по форме бассейна и расположению в нем золотоносных районов, провинция представляет собой северо-западную половину крупной структуры центрального типа. Площадь провинции (80 тыс. кв. км) мала по сравнению с другими золотоносными провинциями мира, но масштабы золотого оруденения являются уникальными. Прогиб осложнен куполовидными структурами, в которых выходят на поверхность гранитоиды и гнейсы основания. Выше располагается толща терригенно-осадочных пород архея системы Витватерсранд, представленная ритмичным чередованием конгломератов, кварцитов, песчаников и сланцев с горизонтами основных и кислых эффузивов. Мощность ее около 8 км. Нижний отдел системы Витватерсранд (Доминион, Западный Ранд) состоит

преимущественно из тонкозернистых кварцитов и сланцев, а верхний (Центральный Ранд) насыщен грубообломочными фациями, в том числе рудоносными конгломератами, именуемыми рифами. В Центральном Ранде заключены основные горизонты конгломератов: Майн, Майн Лидер, Южный и Карбон Лидер. Эти отложения разбиты многочисленными разломами, сопровождаемыми приразломной складчатостью.

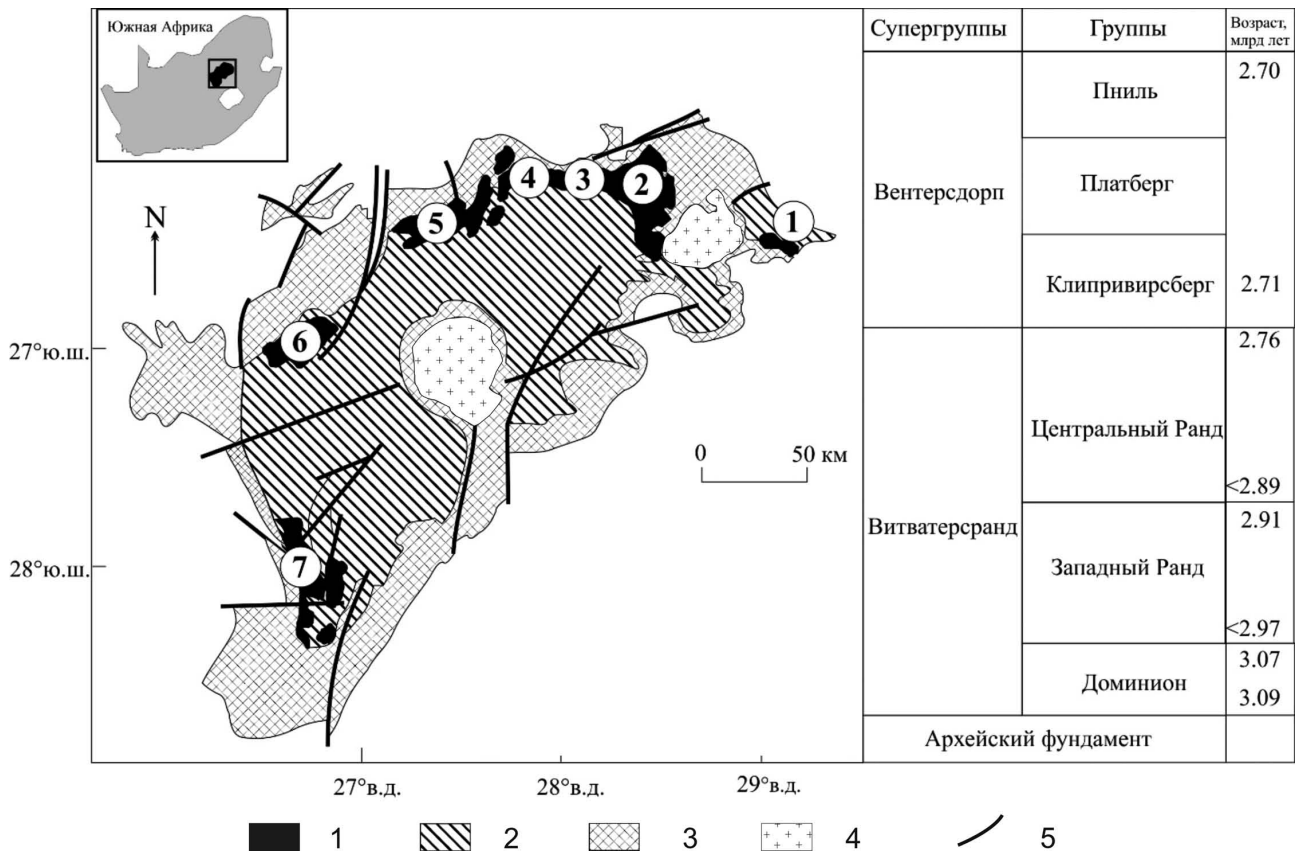
В разрезе осадочных толщ конгломераты составляют не более 0,2% мощности, слагая 16 самостоятельных горизонтов (рифов), к которым приурочено золотое и урановое оруденение с сопутствующими осмиридами и алмазами. Главные ресурсы золота и платиноидов располагаются в конгломератах Центрального Ранда (Central Rand Group); их добыча ведется шахтным способом в пределах семи золотоносных районов: Эвандер, Восточный Ранд, Центральный Ранд, Западный Ранд, Карлетонвил, Клерксдорп и Велком.

Рудоносные конгломераты (рифы) прослежены по простиранию примерно на 350 км в дугообразно изогнутой к северо-западу полосе. Слои наклонены к центру этой полукольцевой структуры под углом от 25—30° до (реже) 70—80°. Они обрабатываются шахтами до глубины почти 4000 м.

#### Строение и параметры рифов

Рудные горизонты не представляют собой, как полагают многие, непрерывные пласты вроде каменного угля. Это обычно руслообразные в плане линзы и полосы. Полезные компоненты (уран и золото) распределяются не по всей массе пласта, а зависят от вещественного состава вмещающих пород. В сульфидных конгломератах оруденение связано с сульфидами и локализуется чаще в подошве рифа. Если пласт обогащен тухолитом, то оруденение концентрируется в прослоях углистого вещества, причем обычно такие прослойки находятся на верхней кромке рифа. Однако это правило выдерживается далеко не всегда, и нередко наблюдается обратное расположение обогащенных и бедных участков. Мощность рудных горизонтов изменяется от нескольких сантиметров до 1,5 м, но промышленная часть составляет только треть общей мощности. Средняя мощность обычно равна 0,3 м [7].

Рудные пласты группируются в разрезе в конгломератовые пачки по 2—4 пласта. Такие пачки прослеживаются на десятки километров. Внутри пачки содержание полезных компонентов в каждом пласте непостоянно и на значительные расстояния не выдерживается. Приуроченность золота



**Рис. 1.** Схематическая карта Витватерсрандской провинции и местоположение главных золоторудных районов [25]: 1 — золоторудные районы и их номера (1 — Эвандер, 2 — Восточный Ранд, 3 — Центральный Ранд, 4 — Западный Ранд, 5 — Карлетонвил, 6 — Клерксдорп, 7 — Велком), 2 — Центральный Ранд, 3 — Западный Ранд и Доминион, 4 — гранитоиды, 5 — разломы

**Fig. 1.** Schematic map of the Witwatersrand province and the location of the main gold-bearing areas [25]: 1 — gold-bearing areas and their numbers (1 — Evander, 2 — Eastern Rand, 3 — Central Rand, 4 — Western Rand, 5 — Carletonville, 6 — Klerksdorp, 7 — Welkom), 2 — Central Rand, 3 — Western Rand and Dominion, 4 — granitoids, 5 — faults

и урана к руслам и руслообразным струям в докембрийских осадках многие исследователи считают важнейшим доказательством россыпного генезиса Витватерсранда [12, 37]. По их мнению, русловые фации — главноеместилище золота. Очень часто в осадочных толщах, непосредственно подстилающих рудоносные пласты, промыты депрессии, вытянутые ложины или русла, заполненные галечным, иногда глинистым материалом. Эти углубления впоследствии выровнены эрозией и перекрыты новыми пластами конгломератов. Однако такие депрессии содержат рудные минералы не на всем протяжении, а только локально. Наиболее крупный риф Витватерсранда вытягивается извилистой лентой на расстояние 1350 м при максимальной ширине около 360 м, что при средней мощности 0,3 м и содержании золота в 10,9 г/т дает около 4 т металла.

Обычно рудные тела имеют меньшие размеры. Как отмечает Л.Т. Нел [12], промышленные прослои в рифах Футуол залегают согласно напластованию русловых осадков и следуют извилистому направлению русел. Более высокие содержания золота и урана имеют тенденцию сосредотачиваться в базальных частях рудоносных пластов конгломератов. Минерализация не переходит из рудоносных конгломератов и русловых отложений в конгломераты, кварциты или песчаники, слагающие стенки русел, несмотря на то что по характеру этих пород нет каких-либо оснований предполагать, что они были недоступны для проникновения минерализующих растворов. Здесь речь идет о рудах, не содержащих тухолита. При наличии последнего обогащенными становятся верхние части пластов, где скапливается и сам тухолит. Рудные скопления в конгломератах русел бывают богаче,

чем в пластах, которые они предположительно размывали, что считается признаком переотложения поверхностными водами рудных минералов. К этому доказательству привлекают иногда факт уменьшения концентрации оруденения «вниз по течению» от точки, в которой русло прорезает рудные конгломераты подстилающей толщи. Там, где русловые конгломераты налегают на безрудные толщи, они также не содержат оруденения.

### Состав конгломератов

Конгломераты Ранда, по существу, являются мономиктными породами, гальки которых представлены только кварцем. Изредка встречаются гальки тонкозернистого кварцита и окремненного известняка. Описаны единичные гальки кварцитов, кремней, кварцевых порфиров, кристаллических сланцев, гранитов и джеспилитов [34], но эти находки относятся к горизонту Блэк-Риф. Некоторые исследователи отмечают присутствие в конгломератах Витватерсранда обломков и гальки кварца, сохранившего своеобразные полосчато-фестончатые текстуры и реликты колломорфного строения. Особенности строения такого кварца сопоставлены с текстурами золотоносного кварца из месторождений Бaleyского рудного поля Забайкалья [22].

Цвет галек в конгломератах несколько отличается. В горизонте Доминион-Риф кварцевые гальки однокристалльные темно-серые, слегка синеватые и погружены в травяно-зеленый цемент кварц-хлорит-серицитового состава. Цвет цемента определяется хлоритом. В рифах Витватерсрандской системы, особенно в Оранжевой республике, гальки голубоватые, как бы опалесцирующие, но встречаются и черные (морион). Гальки заключены в бледно-сером кварц-хлорит-серицитовом цементе. В нем преобладает серицит, а хлорит бледный яблочно-зеленый. Различие в окраске придают и сульфиды. Здесь это ярко-латунный пирит, а в конгломератах Доминион-Рифа — темный пирротин с тусклым блеском. В конгломератах Блэк-Рифа гальки не выглядят однокристалльными, они зернистые и имеют розоватый оттенок, роднящий эти конгломераты с красноцветами. Цемент кварц-серицитовый, хлорита практически нет. Среди рудных минералов преобладают окислы железа. Пирит тонко рассеян и встречается редко. Поэтому межгалечные пространства резко отделяются по цвету от галек.

**Минералы цемента.** Главный минерал цемента — кварц во всех разновидностях конгломератов и на всех стратиграфических уровнях.

Следующими по распространенности из нерудных минералов являются серицит и хлорит, а также пиррофиллит и хлоритоиды. Реже отмечаются кальцит, доломит и турмалин. Из сульфидов преобладает пирит, затем идут пирротин, галенит, сфалерит, халькопирит, кобальтин, арсенопирит и линнеит [34].

Среди минералов тяжелой фракции обычны хромит, ильменит, гранаты, шпинели, монацит, циркон, турмалин, пирохлор, рутил, лейкоксен, касситерит и др. Причем не всегда ясно — обломочные они или новообразованные. В конгломератах есть прожилки, выполненные всеми перечисленными минералами, включая монацит. В таблице 1 отражена распространенность главных минералов цемента в разных рифах. Набор минералов в цементе конгломератов схож с комплексом минералов тяжелой фракции шлиха россыпных месторождений золота.

Для суждения о генезисе оруденения в конгломератах важнейшее значение имеют кварц и сульфиды.

**Кварц.** В цементе находится в двух разновидностях. Одна из них — это округлые зерна обломочного происхождения. Особенность зерен в том, что они всегда монокристалльны. В рифах верхних формаций Витватерсрандской, Ватербергской и Трансваальской систем заметно нарастание вторичных каемок вокруг окатанных зерен кварца. При этом оптическая ориентировка каемок одинакова с самим зерном. Между зернами и гальками кварца иногда наблюдаются микростиллолитовые сопряжения, причем стиллолиты прорывают только регенерационную каемку, если она существует. Вторая разновидность кварца считается переотложенной. Это тонкозернистые прожилки, «заливы» выполнения межзерновых и межгалечных пространств. Такой кварц образует несколько генераций, поскольку отчетливо наблюдается пересечение кварцевыми микропрожилками перекристаллизованного кварца межзерновых пространств и галек. В конгломератах серии Доминион-Риф изредка вместе с вторичным кварцем встречается микроклин, идиоморфный по отношению к кварцу. Вместе с вторичным кварцем слоистые минералы и хлориты образуют агрегаты, тончайшие срастания. Если возникают прожилки, хлориты располагаются преимущественно по зальбандам. Тонкочешуйчатые белые слюдки размещаются по всему прожилку, но тенденция к накоплению в зальбандах все же сохраняется. Интересно, что чешуйчатые минералы огибают обломочные зерна и гальки, но иногда

**Таблица 1.** Минералогический состав цемента конгломератов месторождения Витватерсранд [2]  
**Table 1.** Mineralogical composition of cement conglomerates of the Witwatersrand deposit [2]

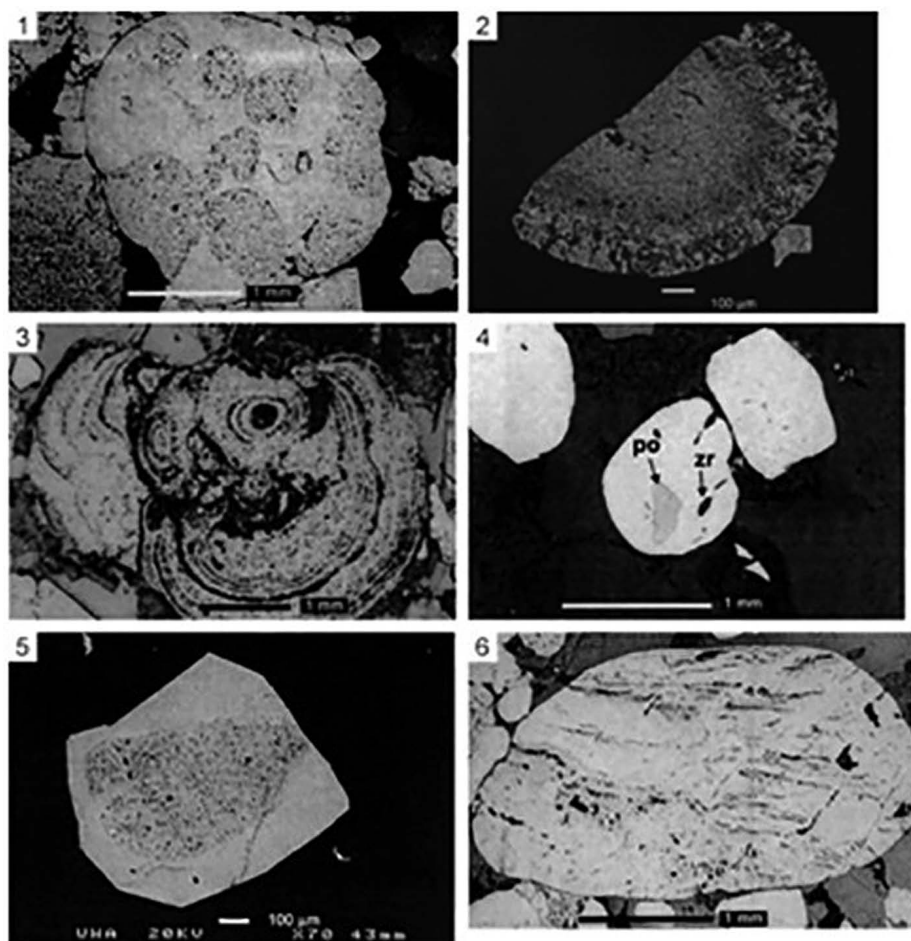
Распространенность	Доминион- Риф	Витватерсранд	Вентерсдорп, Контакт-Риф	Блэк-Риф
Преобладают	Кварц Хлорит Серицит Пирофиллит Хлоритоид Пирротин Пирит	Кварц Серицит Пирофиллит Хлоритоид Пирит	Кварц Хлорит Серицит Пирофиллит Хлоритоид Пирит	Кварц Хлорит Пирит Углистое вещество Серицит
Обычный	Золото Уранинит Урановая смолка Галенит Сфалерит Осмистый иридий Халькопирит Арсенопирит Касситерит Монацит Шпинель Гранат Циркон Корунд Дистен	Золото Уранинит Тухолит Урановая смолка Пирротин Галенит Сфалерит Халькопирит Кобальтин Линнеит Циркон Циртолит Осмистый иридий	Золото Уранинит Тухолит Урановая смолка Пирротин Галенит Сфалерит Халькопирит Пентландит Осмистый иридий Циркон Циртолит	Золото Уранинит Сфалерит Урановая смолка Халькопирит Пирротин Галенит Осмистый иридий
Встречаются редко или в отдельных частях рифов	Тухолит Хромит Рутил Кобальтин Ильменит Марказит Танталит Пирохлор Молибденит	Монацит Гранат Ксенотим Шпинель Касситерит Кальцит Турмалин Рутил Анатаз Ильменит Арсенопирит Марказит Герсдорфит Миллерит Кубанит Троилит Платина Алмаз	Монацит Ильменит Рутил Анатаз Кобальтин Линнеит Марказит Хромит Гранат Касситерит Турмалин	Тухолит Циркон Хромит Арсенопирит Турмалин

как бы внедряются в тело гальки вместе с вторичным кварцем. Такое явление отмечается обычно с той стороны гальки, которая направлена «по течению» русла, а огибание слюдястыми минералами наблюдается на плоскостях наслоения.

#### Пиритовая дробь

К «пиритовой дроби» или «картечи» относят округлые, похожие на гальки образования пирита, часто встречаемые в конгломератах. Исследование Н.А. Шило и М.Е. Захаровой показало,

что сфероидальные агрегаты имеют почти правильную округлую шаровидную, иногда каплевидную форму. Размер зерен — от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Поверхность сферидов ровная, без следов механических повреждений, типичных для минералов, подвергнутых аллювиальной обработке [20]. Содержание такого пирита составляет 3—5%. С горизонтами их развития часто связаны повышенные содержания золота. Пирит золотоносен на уровне сотен г/т. Разнообразности «пиритовой дроби» показаны на рисунке 2.



**Рис. 2.** Пиритовая дробь из конгломерата Стейн-Рифа шахты Велком, фото в отраженном свете [24]: 1 — двухфазное внутреннее строение округлого зерна пирита, 2 — обломок конкреции пирита с коркой радиально-лучистого тонко структурированного агрегата, 3 — зерно пирита колломорфной текстуры (псевдоморфоза по карбонатному ооиду), 4 — компактный пирит различной степени окатанности с включениями пирротина и циркона, 5 — зерно пористого пирита с обрастанием компактным пиритом эвгедральной формы, 6 — «полосчатый» округлый пирит (псевдоморфоза по глинистым сланцам?)

**Fig. 2.** Pyrite fraction from the Stein Reef conglomerate of the Welkom mine, photo in reflected light [24]: 1 — two-phase internal structure of a rounded pyrite grain, 2 — a fragment of a pyrite nodule with a crust of a radially radiant finely structured aggregate, 3 — a grain of pyrite of a collomorphic texture (pseudomorphosis according to a carbonate ooid), 4 — compact pyrite of various degrees of edging with inclusions of pyrrhotite and zircon, 5 — a grain of porous pyrite with fouling with compact pyrite of the euhedral form, 6 — “striped” rounded pyrite (pseudomorphosis according to clay shales?)

Многие исследователи считают эти выделения пирита обломочными россыпными образованиями. В противовес им Н.А. Шило отмечал, что в большинстве шлиховых комплексов из различных россыпей мира, среди которых аллювиальные месторождения занимали значительное место, ни разу не был отмечен «окатанный» пирит, сходный с «пиритовой дробью» месторождения Витватерсранд. Это понятно, так как пирит обладает такими физическими свойствами, которые при транспортировании в водно-аллювиальной

среде способствуют дроблению минерала, его крошению, поэтому он не окатывается [19].

Но существует мнение о гидротермально-осадочном происхождении «пиритовой дробь» [14, 21]. И.Н. Шумская установила идентичность морфологии пиритовых зерен Витватерсранда и пиритовых конкреций в осадках современных морей [21]. В.М. Округин и Д.А. Яблокова пришли к выводу о схожести «пиритовой дробь» со стяжениями пирита из термальных источников Камчатки [14].

### Полезные компоненты

Главную промышленную ценность месторождения представляют золото и уран, попутно добываются осмириды и алмазы.

**Золото.** С 1986 г. по настоящее время добыто около 50 тыс. т золота. Максимальная добыча в 1000 т отмечалась в 1970 г., а затем уменьшалась. Содержание золота составляло от 8 до 20 г/т, иногда доходило до 3000 г/т. Золото Витватерсранда почти целиком сосредоточено в конгломератах. Например, исследование золотой фракции конгломератов Витватерсранда из месторождения в Оранжевой республике подтвердило, что основная часть этого металла сосредоточена в донных частях «рифов», главным образом вблизи контактов с подошвой [41]. Однако это не всегда так и касается только сульфидных разновидностей конгломератов. При наличии тухолитов золото связано с ними. Оно не подчиняется гравитации [31] и приурочено к кровле пласта. Золото есть и в кварцевых жилах, пересекающих риф, и в послонных прожилках, которые лежат обычно ниже рифа Мейн-Риф-Лидер. В конгломератах Витватерсранда золото наблюдается в нескольких разновидностях. Оно очень мелкое, особенно в богатых рудах, а чаще вообще микроскопическое, так как входит в состав пирита. Но в отдельных рифах присутствует золотины размером 0,3—1,0 мм [35]. Самородки, типичные для большинства современных россыпей, отсутствуют.

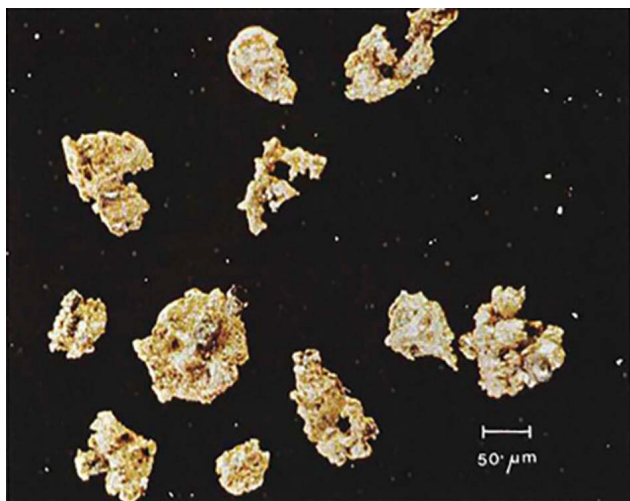
Округлые, овальные зерна золота считаются первично россыпными. Такое золото отмечено почти во всех рифах, за исключением Блэк-Рифа и Доминион-Рифа. Детально исследованы форма и размеры золотин из Базального рифа месторождения Витватерсранд [32]. Тысячи золотин были выделены в результате кислотного растворения кварцевых конгломератов. Размеры частиц золота колебались между 0,038 и 0,473 мм. Они имеют логнормальное распределение со средним диаметром 0,136 мм и стандартным отклонением 0,48. Преобладающие формы золотин дисковидные с тороидальными краями. Они обнаруживают абразионные текстуры поверхности, которые характерны для россыпного золота. Бугристая поверхность золотин месторождения Витватерсранд схожа с поверхностью окатанных золотин как из девонских, так и из молодых россыпей, а также золотин, обработанных в барабане с песком и галькой в воде [32]. Тороидальная форма некоторых золотин указывает на значительную роль золовых процессов в переносе золота [13].

Другой разновидностью является вторичное золото, составляющее около 25% общего содержания. Оно более мелкое, имеет интерстициальную или губчатую формы, нередко нарастает на поверхность пирита и обломочного золота, а также образует тончайшие каемки вокруг зерен пирита, уранинита, пирротина и других минералов. Золото выполняет пустотки в цементе и промежутки между обломочными составляющими, замещает минералы основной массы, такие как хлорит, мусковит, кварц, причем последний чаще других. Иногда золотом замещаются пирит, осмистый иридий, реже такие сульфиды, как пирротин, халькопирит, кобальтин, сфалерит, галенит, арсенопирит линнеит, пентландит или выполняются тончайшие трещинки в «пиритовой дробе», цирконе, кварце, осмистом иридии [32]. Следует отметить находку мирмекитовых сростаний линнеита ( $\text{Co}_3\text{S}_4$ ), золота и пирротина в базальном рифе Витватерсрандской системы в Оранжевой республике [40].

Д. Холлбауер выделил три типа золота в золотоносных рифах Витватерсранда: детритное (detrital) золото, «биохимически» отложенное золото и рекристаллизованное золото [26]. Детритное золото несет следы транспортировки в аллювиальных потоках, выраженные в деформации, истирании и сплющивании частиц золота (рис. 3). Редко наблюдаются сростки между золотом и сфалеритом, кобальтином, герсдорфитом, халькопиритом, бравоитом, пиритом и молибденитом. Эти минеральные ассоциации указывают на первичный источник, подобный месторождениям порфирирового типа. Слои углеродистого вещества слагают окаменелые маты докембрийских растений. Тонкие частицы золота задерживались на этих матах (рис. 4). Кроме того, в углеродистом веществе наблюдается биохимически осажденное золото в виде частиц неправильной формы, часто тонких переплетенных или разветвленных нитей, похожих на водоросли или грибковые нити. Большинство нитей имеют средний диаметр 1—2 мкм. Рекристаллизованное золото является продуктом более поздних процессов, связанных с метаморфизмом осадков. Оно нередко осаждается на гранях вторичного пирита (рис. 5) или выполняет в нем тонкие трещинки или интерстиции.

Проба золота, без разделения на детритное и вторичное, колеблется от 906 до 935‰, составляя в среднем для базальных рифов Витватерсрандской системы 925‰. Отношение  $\text{Ag}/\text{Au}$  — 0,0812 [40]. Для Оранжевой республики содержание серебра в золоте составляет 9,9—12,4%. В слитках получено золото 882 пробы. Примесь ртути в золоте

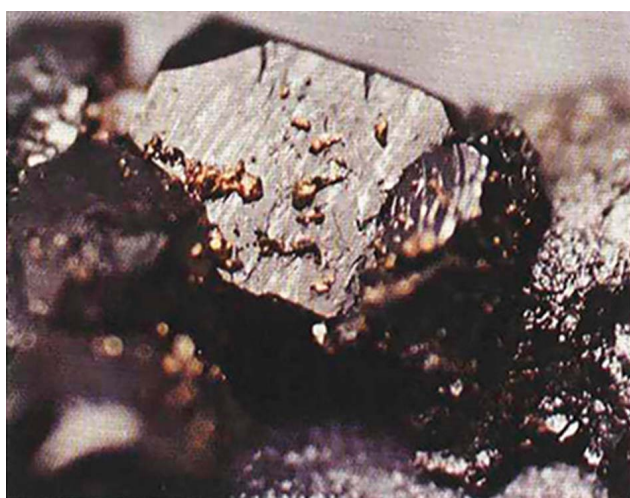




**Рис. 3.** Зубчатые, частично сплюснутые частицы золота, извлеченные из образца В-Рифа, месторождения Лорейн Оранжевой республики [26]  
**Fig. 3.** Jagged, partially flattened gold particles extracted from the B-Reef sample, the Lorain deposit of the Orange Republic [26]



**Рис. 4.** Образец Базал-Рифа месторождения Святой Елены Оранжевой республики с углеродистым слоем, аккумулирующим тонкозернистые детритные частицы золота [26]  
**Fig. 4.** A sample of the Basal Reef of the St. Helena deposit of the Orange Republic with a carbonaceous layer accumulating fine-grained detritus particles of gold [26]



**Рис. 5.** Вторичное золото на кристалле пирита, Контакт-Риф, месторождение Вестерн Дип Левел, Вентерсдорп [26]  
**Fig. 5.** Secondary gold on a pyrite crystal, Contact Reef, Western Deep Level deposit, Ventersdorp [26]

палеороссыпи Карбон-Лидер-Рифа в других месторождениях составляет 1,2—5,9% [33]. В палеороссыпи Ваал Керксдорпского района средние составы зерен золота варьируют от 80 до 95 весовых процентов Au, от 4 до 18 весовых процентов Ag и от 0,5 до 4 весовых процентов Hg, со средним составом (в %): Au — 90, Ag — 8, Hg — 2 [38].

Д. Холлбауэр и Т. Уттер установили связь между морфологическими особенностями и пробой

частиц золота, а также расстоянием, на которое они были перенесены. Показано, что большинство частиц золота из конгломератов Витватерсранда сохранили свою детритную морфологию. Сравнение их с частицами из молодых аллювиальных россыпей позволило оценить расстояние переноса золота Витватерсранда, которое в большинстве случаев составляло от 10 до 30 км. Частицы золота в молодых россыпях проявляют характерный рост пробы с увеличением расстояния переноса из-за выщелачивания серебра. Но золото в россыпях Витватерсранда сохранило первичную пробу, поскольку в кислорододефицитной атмосфере архея выщелачивание серебра не происходило [27]. Что касается существенной примеси ртути в золоте Витватерсранда, то даже в современных россыпях при длительной транспортировке ртутистого золота она сохраняется в центральной части окатанных золотин в концентрациях, близких к первичным [17].

**Уран.** На месторождении Витватерсранд отмечаются следующие радиоактивные минералы: уранинит, тухолит, торинит, браннерит, торит, монацит, бетафит, эвксенит, лейкоксен и циркон. Концентрация  $U_3O_8$  в рифах достигает 0,02—0,05%. Добыча урана колебалась от 3,2 (1976 г.) до 5,5 тыс. т (1979 г.) в год. Запасы окиси урана оцениваются в 150—170 тыс. т.

Уранинит представляет главную промышленную ценность среди радиоактивных минералов. Только

в конгломератах Блэк-Рифа он является подчиненным при преобладании тухолита. Существует несколько разновидностей уранинита. Самая распространенная — зерна или гроздьевидные скопления овальных или округлых зерен, размещающихся в цементе конгломератов. Кроме округлых, встречаются изометричные зерна. Иногда в одном и том же зерне одна сторона овальная, а другая угловатая. Измерение 25 тыс. зерен уранинита, произведенное В. Либенбергом [30], показывает среднюю величину 75—100 мк. Округлая форма зерен дала основания считать их окатанными. Многие зерна уранинита окаймлены отросточками пирита, других сульфидов и золота. Около зерен уранинита кварц-серицитовые агрегаты становятся более мелкозернистыми. Уранинит бывает свежим и измененным. Последний более тусклый, с типичной каймой «выветривания», трещиноват. По трещинкам проникают кварц, серицит, хлорит, сульфиды, золото. Особенно хорошо округлая форма зерен видна при выделении их из концентратов. В этом случае зерна имеют смоляной блеск и бархатисто-черную окраску. Содержание тория в уранинитах составляет примерно 1,5%, а редких земель в сумме не более 2,18%.

Урановая смолка — переотложенный минерал. Он не образует самостоятельных зерен, а выполняет трещинки, каемки вокруг зерен первичного уранинита. Имеются и псевдоморфозы смолки по ураниниту. Смолка отмечается и на некотором расстоянии от первичного уранинита, где выполняет промежутки между зернами кварца, пирита, хромита, циркона и трещинки в перечисленных минералах. Смолка встречается в ассоциации с сульфидами: пиритом, пирротинном, галенитом, пентландитом, халькопиритом. Обнаружена смолка и среди скоплений зернистого тухолита, в этом случае в ней особенно много субмикроскопических вкраплений галенита. Урановая смолка выполняет тончайшие прожилки в цементе и в гальках кварц [30].

**Осмириды.** Среди минералов платиновой группы (МПГ) преобладает осмистый иридий. Он встречается во всех рифах Витватерсранда. Содержание осмистого иридия изменяется от 3 до 28 г/т, в год добывается около 200 кг концентрата МПГ [4]. Зерна осмистого иридия в сростании с самородной платиной отмечаются в цементе конгломератов, они обрастают новообразования самородного золота и пирита. Размеры МПГ в цементе конгломератов в пределах от 70 до 150 мк.

И.Ю. Баданина и соавт. изучили состав и изотопно-геохимические особенности Ru-Os-Ir

сплавов из конгломератов рифа Кимберли рудного района Эвандер Витватерсранда [1]. Представительная выборка минералов платиновой группы состояла из 950 зерен размером от 60 до 150 мк, выделенных из производственного концентрата. Исследование химического состава минералов выполнено при помощи рентгеноспектрального микроанализа. Подавляющее большинство исследованных минералов платиновой группы представлены Ru-Os-Ir( $\pm$ Pt) сплавами в составе мономинеральных индивидов или полиминеральных ассоциаций. Для Ru-Os-Ir( $\pm$ Pt) сплавов характерны значительные вариации состава. По номенклатуре [28] минералы рутения преобладают над минералами осмия, иридия и рутениридосмином. Ru-Os сульфиды встречаются в составе полиминеральных зерен и по химическому составу соответствуют лауриту и эрликманиту, образующими непрерывный ряд твердых растворов. Поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt( $\pm$ Fe) установлены в составе как мономинеральных, так и полиминеральных ассоциаций, в которых они образуют ядерную часть, облекаемую оторочкой сперрилита ( $PtAs_2$ ), реже — Ru-Os сульфидами или Ru-Os-Ir-Rh сульфоарсенидами (табл. 2).

Источником сноса МПГ в палеороссыпи Витватерсранда, по-видимому, был расположенный непосредственно к северо-востоку Бушвелдский массив основных и ультраосновных пород, содержащий промышленные скопления платиноидов.

**Алмазы.** Обнаруженные в конгломератах ряда месторождений Витватерсранда, алмазы были извлечены при промывке материала, пропущенного через шаровые мельницы для извлечения золота [36]. Алмазы отмывались вместе с золотом вследствие более высокого удельного веса по сравнению с другими нерудными минералами. На фотографии показано 38 алмазов, самый большой из которых весит 1,53 карата, а самый маленький 0,08 карата (рис. 6).

Все кристаллы хорошо огранены, имеют форму октаэдров и додекаэдров. Цвет алмазов меняется от желтовато-зеленого через густо-зеленый до почти черного, причем окраска охватывает только наружные слои. Глубокая окраска поверхности соответствует алмазам, облученным альфа- или бета-частицами высокой энергии. Окраска произошла, по всей вероятности, за счет облучения ураном ввиду наличия в конгломератах уранинита и тухолита. Источниками алмазов, вероятнее всего,

Таблица 2. Химические составы МПГ золоторудного поля Эвандер [1]  
Table 2. Chemical compositions of MPG of the Evander gold field [1]

Компо- нент	Анализ, мас. %													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
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	34,56	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

Примечание: по данным рентгеноспектрального микроанализатора [1], 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.

были алмазонасные кимберлиты, расположенные севернее месторождений Витватерсранда.

#### Обсуждение результатов

Своеобразие золотоносной провинции Витватерсранд заключается не только в уникальном богатстве месторождений и небольшой площади, но и в том, что она является чисто россыпной провинцией. Месторождения золота в ней представлены только россыпями. Другие золотоносные провинции мира являются рудно-россыпными. В них расположены как рудные, так и россыпные месторождения в разных пропорциях. Например, Центрально-Колымская и Приамурская провинции России являются преимущественно россыпными, а Камчатская — преимущественно рудной.



Рис. 6. Фото алмазов Витватерсранда [36]  
Fig. 6. Photo of the Witwatersrand diamonds [36]

Отсутствие золоторудных месторождений на площади провинции поднимает непростой вопрос о коренных источниках сноса золота. По-видимому, ими являлись золоторудные месторождения зеленокаменных поясов Каапвальского, а возможно, и Зимбабвийского кратона. Поэтому длительность переноса золота в россыпях была значительной. Тороидальные формы тонких золотинок Витватерсранда указывают на их вероятный золовый перенос. Можно предположить, что в архее на территории юга Африканского континента было гораздо больше пустынь ввиду отсутствия растительности. Золовым переносом можно объяснить как наличие в конгломератах месторождений Витватерсранда преобладающих мелких фракций золота, так и отсутствие самородков.

Определенный интерес представляет состав самородного золота Витватерсранда. Это высокопробное ртутистое золото с содержанием ртути, по данным разных исследователей, от 0,5 до 5,9%, в среднем 2% [33, 38]. Следовательно, при обработке месторождений вместе с золотом было извлечено около тысячи тонн ртути. Ртутистое золото характерно для верхней фронтальной части ряда золоторудных месторождений, но наиболее часто встречается в месторождениях золото-ртутной формации, например известного карлинского и других типов [18]. Значительная примесь ртути в золоте месторождения архейского возраста предоставляет возможность изучения изотопного состава древней ртути. Известно, что ртуть имеет семь стабильных и ряд радиоактивных изотопов, в ней постоянно происходят процессы ядерного перехода некоторых изотопов ртути в другие элементы [23]. Поэтому не исключена возможность определения по изотопному составу ртути

изотопного возраста ртутистого золота, широко распространенного в золоторудных месторождениях разных типов.

Осмириды нередко отмечаются в россыпных месторождениях золота. Например, в Приамурской золотоносной провинции России они нередко встречаются в количествах, достаточных для попутного извлечения [11]. В россыпях Гарьского узла Приамурья встречаются рутениридосмины, иридосмины, изоферроплатина, самородная платина и эрлихманит. Коренными источниками сноса служат серпентинизированные гипербазиты позднего протерозоя. Алмазы, хотя и значительно реже, также встречаются в россыпях золота не только Якутии, но и Приамурья.

Месторождения Витватерсранда являются комплексными. Из них наряду с золотом, серебром и ураном попутно добывают осмириды и алмазы. Такой набор полезных компонентов не известен ни на одном из месторождений магматического или гидротермального генезиса. Учитывая приуроченность полезных компонентов к конгломератам, детритный характер большей части золотин и наличие разнообразных сопутствующих минералов тяжелой фракции, характерных для магматических пород кислого, основного и ультраосновного состава, гипотеза о первичной аллювиальной природе месторождений Витватер-

срандской провинции выглядит наиболее обоснованной.

### Заключение

Проведенное исследование показало своеобразие золотоносной провинции Витватерсранд, которое заключается не только в небольшой площади и уникальном богатстве месторождений рудоносных конгломератов, но и в том, что она является россыпной, в отличие от других рудно-россыпных провинций мира. Из комплексных палеороссыпей Витватерсранда наряду с золотом, серебром и ураном попутно добывают осмириды и алмазы, такой набор полезных компонентов вместе не встречается ни в одном из рудных месторождений магматического или гидротермального генезиса. Приведенный фактический материал указывает на аллювиальное происхождение месторождений Витватерсранда с последующим метаморфическим преобразованием рудоносных рифов. На первичное аллювиальное формирование рудоносных конгломератов указывает приуроченность золота и урана к русловым фациям с тенденцией накопления в базальных горизонтах рифов, наличие окатанных частиц золота, несущих следы транспортировки в аллювиальных потоках, а также набор минералов тяжелой фракции шлиха, характерный для россыпей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баданина И.Ю., Малич К.Н., Меркле Р.К.В. и др. Химический и изотопный состав Os-содержащих сплавов и сульфидов золоторудного поля Эвандер Витватерсрандского бассейна (Южная Африка) // Литосфера. 2016. № 6. С. 129—144.
2. Беззубов А.И., Бывших Ю.И., Дементьев П.К. и др. Уран в древних конгломератах. М.: Госатомиздат, 1963. 188 с.
3. Долгушин С.С., Долгушин А.П. Генезис золото-урановых месторождений Витватерсранда (ЮАР) и проблема из аналогов // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Томск, 2017. С. 144—149.
4. Константинов М.М. Золоторудные гиганты России и мира. М.: Научный мир. 2000. 270 с.
5. Константинов М.М. Золоторудные провинции мира. М.: Научный мир. 2006. 358 с.
6. Косовец Т.Н. Представления о генезисе золото-урановых месторождений Витватерсранда в свете данных по изотопии серы, кислорода, углерода // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. №2. С. 22—33. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-2-22-33>
7. Кренделев Ф.П. Металлоносные конгломераты мира. Новосибирск: Наука, 1974. 237 с.
8. Кременецкий А.А. Южная Африка: золото, алмазы, платина // Геология — жизнь моя... Сборник очерков. Вып. 6. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. С. 297—361.
9. Маракушев А.А., Глазовская Л.И., Панеях Н.А., Маракушев С.А. Проблема происхождения ураново-золоторудного месторождения Витватерсранд. Вестн. Моск. Ун-та. 2012. Т. 4, № 3. С. 3—16.
10. Марфунин А.С. История золота. М.: Наука, 1987. 246 с.
11. Моисеенко В.Г., Степанов В.А., Эйриш Л.В., Мельников А.В. Платиноносность Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2004. 176 с.
12. Нел Л.Т. Проблема генезиса уранинита в золотоносных конгломератах Южной Африки // Тр. XXI Международ. геол. конгр. М.: Мир, 1964. Вып. 3. С. 258—274.
13. Никифорова З.С. Закономерности размещения золотого золота // Отечеств. геология. 1999. № 4. С. 24—26.
14. Округин В.М., Яблокова Д.А. Сравнительный анализ сульфидных сферолитов золотоносных конгломератов Витватерсранда (ЮАР) и современных гидротермальных систем Камчатки // Вестник КРАУНЦ. 2013. № 2, вып. 22. С. 196—204.

15. *Портнов А.М.* О возможном гипогенном происхождении конгломератов Витватерсранда // Докл. АН. 1978. Т. 239, № 3. С. 664—667.
16. *Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю.* Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранда // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48, № 6. С. 475—511.
17. *Степанов В.А.* Геология золота, серебра и ртути. Часть 2. Золото и ртуть Приамурской провинции. Владивосток: Дальнаука, 2000. 161 с.
18. *Степанов В.А., Моисеенко В.Г.* Геология золота, серебра и ртути. Часть 1. Золото-ртутные месторождения. Владивосток: Дальнаука, 1993. 228 с.
19. *Шило Н.А.* Витватерсранд и проблема рудообразования // Записки Горного института. 2008. Т. 176. С. 7—19.
20. *Шило Н.А., Захарова М.Е.* Природа пиритовых образований из отложений Витватерсранда // Геол. рудн. месторождений. 1986. № 2. С. 85—89.
21. *Шумская Н.И.* Условия образования пиритов месторождения Витватерсранд в Южной Африке и место золотого оруденения // Отечеств. геология. 1998. № 3. С. 64—67.
22. *Щеглов А.Д.* О кварце «Балейского типа» из золоторудных конгломератов Витватерсранда (ЮАР) // Докл. РАН. 1995. Т. 340. № 5. С. 521—524.
23. *Bainbridge K.T., Nier A.O.* Relative isotopic abundances of the elements // Prelim Report Nuclear Ser. Washington, 1950, No 9. 60 p.
24. *England G.L., Rasmussen B., Krapez B., Groves D.J.* Paleoenvironmental significance of rounded pyrite in siliciclastic sequences of the Late Archaean Witwatersrand Basin: oxygen — deficient atmosphere or hydrothermal alteration // Sedimentology, 2002. No 49. P. 1133—1156.
25. *Frimmel H.E., Minter W.E.L.* Recent developments concerning the geological history and genesis of the Witwatersrand gold deposits, South Africa // Soc. Econ. Geologists. Spec. Publ. 2002. Vol. 9. P. 17—45.
26. *Hallbauer D.K.* Witwatersrand Gold Deposits. Their genesis in the light of morphological studies // Gold Bulletin. 1978. Vol. 11. P. 18—23.
27. *Hallbauer D.K., Utter T.* Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent river deposits and the fossil placers of the Witwatersrand // Mineralium Deposita. 1977. Vol. 12. P. 293—306.
28. *Harris D.C., Cabri L.J.* Nomenclature of platinum-group-elementalloys: review and revision // Canad. Mineral. 1991, No 29. P. 231—237.
29. *Hutchinson R.W., Viljoen R.P.* Re-evaluation of gold source in Witwatersrand ores // S. Afr. Geol. 1988. No 91(2). P. 157—173.
30. *Liebenberg W.R.* The occurrence and origin of gold and radioactive minerals in the Witwatersrand System, the Dominion Reef, the Ventersdorp Contact Reef and the Black Reef // Trans Geol. Sjc. South. Afr. 1955. Vol. 58. P. 101—223.
31. *Macadam P.* The distribution of the gold and carbon in the Witwatersrand Bankets Reef // Ann., Trans. Geol. Soc. Africa. 1931. Vol. 34. P. 21—32.
32. *Minter W.E.L., Goedhart M., Knight J., Frimmel H.E.* Morphology of Witwatersrand gold grains from the Basal reef: Evidence for their detrital origin // Econ. Geol. 1993. Vol. 88, No 2. P. 237—248.
33. *Oberphur T., Saager R.* Silver and mercury in gold particles from proterozoic Witwatersrand placer deposits of South Africa: metallogenic and geochemical implications // Econ. Geol. 1986. Vol. 81, No 1. P. 20—31.
34. *Pretorius D.A.* The geology of Central Rand goldfield // The geology of some ore deposits in S. Africa. — Johannesburg: Geol. Society of S. Africa. 1964. Vol. 1. P. 63—108.
35. *Pretorius D.A.* The nature of the Witwatersrand gold-uranium deposits // Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. Editor K.H. Wolf. Amsterdam-Oxford-New York: Sci. Publ. Co. 1976. Vol. 7, No 2. P. 29—88.
36. *Raal F.A.* A study of some gold mine diamonds // Amer. Mineralogist. 1969. Vol. 54, No 1—2. P. 292—295.
37. *Ramdohr P.* New observation the ores of the Witwatersrand in South Africa and their genetic significance // Geol. Soc. of S. Africa. 1958. No 71. P. 67—100.
38. *Reid A.M.* Composition of gold grains in the Vaal Placer, South Africa // Mineralium deposita. 1988. Vol. 23. P. 211—217.
39. *Robb L.J., Meyer F.M.* The Witwatersrand Basin, South Africa: Geologic framework and mineralization processes // Ore Geology Reviews. 1995. Vol. 10. P. 67—94.
40. *Saager R.* The relationship of silver and gold in Basal Reef of the Witwatersrand system, Africa // Mineral deposita. 1969. Vol. 4, No 2. P. 93—113.
41. *Schidlovski M.* The gold fraction of the Witwatersrand conglomerates from the Orange Free State goldfield (South Africa) // Mineralium Deposita. 1968. Vol. 3. P. 344—363.

## REFERENCES

1. *Badanina I.Yu., Malich K.N., Merkle R.K.V., et al.* *Himicheskij i izotopnyj sostav Os-soderzhashchih splavov i sulfidov zolotorudnogo polya Evander Vitvatersrandskogo bassejna (Yuzhnaya Afrika)* [Chemical and isotopic composition of Os-containing alloys and sulfides of the Evander gold field of the Witwatersrand basin (South Africa)] // Litosfera. 2016. No 6. P. 129—144. (In Russ.).
2. *Bezgubov A.I., Byvshih Yu.I., Dement'ev P.K.* i dr. *Uran v drevnih konglomeratah* [Uranium in ancient conglomerates]. Moscow: Gosatomizdat, 1963. 188 p. (In Russ.).
3. *Dolgushin S.S., Dolgushin A.P.* *Genezis zoloto-uranovyh mestorozhdenij Vitvatersranda (YuAR) i problema iz analogov* [The genesis of the gold-uranium deposits of the Witwatersrand (South Africa) and the

- problem of analogues] // Petrologiya magmaticallycheskikh i metamorficheskikh kompleksov [Petrology of magmatic and metamorphic complexes]. Tomsk. 2017. P. 144—149. (In Russ.).
4. Konstantinov M.M. Zolotorudnye giganty Rossii i mira [Gold mining giants of Russia and the world]. Moscow: Nauchnyj mir, 2000. 270 p. (In Russ.).
  5. Konstantinov M.M. Zolotorudnye provincii mira [Gold mining giants of Russia and the world]. Moscow: Nauchnyj mir, 2006. 358 p. (In Russ.).
  6. Kosovets T.N. Notions of Witwatersrand gold-uranium deposits genesis in the light of sulfur, oxygen and carbon isotopic characteristics. Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 20156 No 2. P. 22—33. (In Russ.) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-2-22-33>
  7. Krendelev F.P. Metallonosnye konglomeraty mira [Metal-bearing conglomerates of the world]. Novosibirsk: Nauka, 1974. 237 p. (In Russ.).
  8. Kremeneckij A.A. Yuzhnaya Afrika: zoloto, almazy, platina [South Africa: gold, diamonds, platinum] // Geologiya — zhizn' moy... Sbornik ocherkov. Vyp. 6. [Geology — my life ... a collection of essays. Issue 6.] Moscow: ZAO "Geoinformmark", 2001. P. 297—361. (In Russ.).
  9. Marakushev A.A. Glazovskaya L.I., Paneyah N.A., Marakushev S.A. Problema proiskhozhdeniya uranovo-zolotorudnogo mestorozhdeniya Vitvatersrand [The problem of the origin of the Witwatersrand uranium-gold deposit.]. Vestn. Mosk. Un-ta. 2012. T. 4, no 3. P. 3—16. (In Russ.).
  10. Marfunin A.S. Istoriya zolota [The history of gold]. Moscow: Nauka, 1987. 246 p. (In Russ.).
  11. Moiseenko V.G., Stepanov V.A., Ejrish L.V., Mel'nikov A.V. Platinonosnost' Dal'nego Vostoka [Platinum-bearing Capacity of the Far East]. Vladivostok: Dal'nauka, 2004. 176 p. (In Russ.).
  12. Nel L.T. Problema genezisa uraninita v zolotonosnyh konglomeratah Yuzhnoj Afriki [The problem of the genesis of uraninite in the gold-bearing conglomerates of South Africa] // Tr. XXI Mezhdunarod. geol. kongr. [Proceedings of the XXI International. geol. congress]. Moscow: Mir, 1964. V. 3. P. 258—274. (In Russ.).
  13. Nikiforova Z.S. Zakonomernosti razmeshcheniya eolovogo zolota [Regularities of the placement of Aeolian gold] // Otechestv. geologiya. 1999. № 4. P. 24—26. (In Russ.).
  14. Okrugin V.M., Yablokova D.A. Sravnitel'nyj analiz sulfidnyh sferolitov zolotonosnyh konglomeratov Vitvatersranda (YuAR) i sovremennyh gidrotermal'nyh sistem Kamchatki [Comparative analysis of sulfide spherulites of gold-bearing conglomerates of the Witwatersrand (South Africa) and modern hydrothermal systems of Kamchatka] // Vestnik KRAUNC. 2013. No 2, Vol. 22. P. 196—204. (In Russ.).
  15. Portnov A.M. O vozmozhnom gipogenom proiskhozhdenii konglomeratov Vitvatersranda [On the possible hypogenic origin of the Witwatersrand conglomerates] // Dokl. AN. 1978. T. 239, № 3. P. 664—667. (In Russ.).
  16. Safonov Yu.G., Prokof'ev V.Yu. Model' konsedimentacionnogo gidrotermal'nogo obrazovaniya zolotonosnyh Rifov bassejna Vitvatersranda [Model of consedimentary hydrothermal formation of gold-bearing reefs of the Witwatersrand basin] // Geologiya rudnyh mestorozhdenij. 2006. T. 48, № 6. P. 475—511. (In Russ.).
  17. Stepanov V.A. Geologiya zolota, serebra i rtuti. Chast' 2. Zoloto i rtut' Priamurskoj provincii [Geology of gold, silver and mercury. Part 2. Gold and mercury of the Amur province]. Vladivostok: Dal'nauka, 2000. 161 p. (In Russ.).
  18. Stepanov V.A., Moiseenko V.G. Geologiya zolota, serebra i rtuti. Chast' 1. Zoloto-rtutnye mestorozhdeniya [Geology of gold, silver and mercury. Part 1. Gold and mercury deposits]. Vladivostok: Dal'nauka, 1993. 228 p. (In Russ.).
  19. Shilo N.A. Vitvatersrand i problema rudoobrazovaniya [Witwatersrand and the problem of ore formation] // Zapiski Gornogo instituta. 2008. T. 176. P. 7—19. (In Russ.).
  20. Shilo N.A., Zaharova M.E. Priroda piritovyh obrazovaniy iz otlozhenij Vitvatersranda [The nature of pyrite formations from the Witwatersrand deposits] // Geol. rudn. m-nij. 1986. No 2. P. 85—89. (In Russ.).
  21. Shumskaya N.I. Usloviya obrazovaniya piritov mestorozhdeniya Vitvatersrand v Yuzhnoj Afrike i mesto zolotogo oruleniya [Conditions of formation of pyrites of the Witwatersrand deposit in South Africa and the place of gold mineralization] // Otechestv. geologiya. 1998. No 3. P. 64—67. (In Russ.).
  22. Shcheglov A.D. O kvarce «Balejskogo tipa» iz zolotorudnyh konglomeratov Vitvatersranda (YuAR) [About the "Baley type" quartz from the Witwatersrand gold conglomerates (South Africa)] // Dokl. RAN. 1995. T. 340. No 5. P. 521—524. (In Russ.).
  23. Bainbridge K.T., Nier A.O. Relative isotopic abundances of the elements // Prelim Report Nuclear Ser. Washington, 1950, № 9. 60 p.
  24. England G.L., Rasmussen B., Krapez B., Groves D.J. Paleoenvironmental significance of rounded pyrite in siliciclastic sequences of the Late Archaean Witwatersrand Basin: oxygen — deficient atmosphere or hydrothermal alteration // Sedimentology, 2002. No 49, P. 1133—1156.
  25. Frimmel H.E., Minter W.E.L. Recent developments concerning the geological history and genesis of the Witwatersrand gold deposits, South Africa // Soc. Econ. Geologists. Spec. Publ. 2002. Vol. 9. P. 17—45.
  26. Hallbauer D.K. Witwatersrand Gold Deposits. Their genesis in the light of morphological studies // Gold Bulletin. 1978. Vol. 11. P. 18—23.
  27. Hallbauer D.K., Utter T. Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent river deposits and the fossil placers of the Witwatersrand // Mineralium Deposita. 1977. Vol. 12. P. 293—306.

28. Harris D.C., Cabri L.J. Nomenclature of platinum-group-elementalloys: review and revision // *Canad. Mineral.* 1991, 29, 231—237.
29. Hutchinson R.W., Viljoen R.P. Re-evaluation of gold source in Witwatersrand ores // *S. Afr. Geol.* 1988. No 91(2). P. 157—173.
30. Liebenberg W.R. The occurrence and origin of gold and radioactive minerals in the Witwatersrand System, the Dominion Reef, the Ventersdorp Contact Reef and the Black Reef // *Trans Geol. Sjc. South. Afr.* 1955. Vol. 58. P. 101—223.
31. Macadam P. The distribution of the gold and carbon in the Witwatersrand Bankets Reef // *Ann., Trans. Geol. Soc. Africa.* 1931. Vol. 34. P. 21—32.
32. Minter W.E.L., Goedhart M., Knight J., Frimmel H.E. Morphology of Witwatersrand gold grains from the Basal reef: Evidence for their detrital origin // *Econ. Geol.* 1993. Vol. 88, No 2. P. 237—248.
33. Oberphur T., Saager R. Silver and mercury in gold particles from proterozoic Witwatersrand placer deposits of South Africa: metallogenic and geochemical implications // *Econ. Geol.* 1986. Vol. 81, No 1. P. 20—31.
34. Pretorius D.A. The geology of Central Rand gold-field // *The geology of some ore deposits in S. Africa.* — Johannesburg: Geol. Society of S. Africa. 1964. Vol. 1. P. 63—108.
35. Pretorius D.A. The nature of the Witwatersrand gold-uranium deposits // *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits.* Editor K.H. Wolf. Amsterdam-Oxford-New York: Sci. Publ. Co. 1976. Vol. 7, No 2. P. 29—88.
36. Raal F.A. A study of some gold mine diamonds // *Amer. Mineralogist.* 1969. Vol. 54, no 1—2. P. 292—295.
37. Ramdohr P. New observation the ores of the Witwatersrand in South Africa and their genetic significance // *Geol. Soc. Of S. Africa.* 1958. No 71. P. 67—100.
38. Reid A.M. Composition of gold grains in the Vaal Placer, South Africa // *Mineralium deposita*, 1988. Vol. 23. P. 211—217.
39. Robb L.J., Meyer F.M. The Witwatersrand Basin, South Africa: Geologic framework and mineralization processes // *Ore Geology Reviews.* 1995. Vol. 10. P. 67—94.
40. Saager R. The relationship of silver and gold in Basal Reef of the Witwatersrand system, Africa // *Mineral deposita.* 1969. Vol. 4, No 2.
41. Schidlovski M. The gold fraction of the Witwatersrand conglomerates from the Orange Free State goldfield (South Africa) // *Mineralium Deposita.* 1968. Vol. 3. P. 344—363.

### ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Степанов В.А. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Vitaliy A. Stepanov — contributed to the development of the article concept, prepared the text, approved the final version of the manuscript and accepts responsibility for all aspects of the work.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Степанов Виталий Алексеевич** — доктор геолого-минералогических наук, профессор ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр» Дальневосточного отделения Российской академии наук  
30, Северо-Восточное шоссе, г. Петропавловск-Камчатский 683002, Россия  
e-mail: [vitstepanov@yandex.ru](mailto:vitstepanov@yandex.ru)  
тел.: +7 (985) 440-29-64  
SPIN-код: 6764-5920  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7028-3662>  
Адрес для переписки: кв. 159, д. 20, пр. Боголюбова, Московская обл., г. Дубна 142986, Россия

**Vitaliy A. Stepanov** — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof., Scientific Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences  
30, Northeast Highway, Petropavlovsk-Kamchatsky 683002, Russia  
e-mail: [vitstepanov@yandex.ru](mailto:vitstepanov@yandex.ru)  
tel.: +7 (985) 440-29-64  
SPIN: 6764-5920  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7028-3662>  
The address for correspondence is sq. 159, 20, Bogolyubov ave., Moscow region, Dubna 142986, Russia