



УДК 553.495'411:553.061.2(680.1)

## МАГМАТОГЕННЫЙ ГЕНЕЗИС УРАН-ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВИТВАТЕРСРАНДА (ЮАР)

С. С. Долгушин<sup>1</sup>, Г. Н. Черкасов<sup>1</sup>, А. П. Долгушин<sup>2</sup><sup>1</sup>Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия; <sup>2</sup>Березовгеология – Сибирский филиал АО «Урангео», Новосибирск, Россия

На основе критического анализа опубликованной литературы по уран-золоторудным месторождениям Витватерсранда (ЮАР) и использования современных экспериментальных данных по строению и составу рудно-магматических систем сделан вывод о том, что кварцевые уран-золотоносные породы обломочного облика этих месторождений, определяемые как конгломераты, являются псевдоконгломератами. Показано, что их формирование связано с появлением в результате глубокой дифференциации материнской силикатной магмы ликвационного дифференциата – рудоносной (уран-золотоносной) флюидной магмы существенно кремнеземного состава. С ее интрузией, сопровождаемой местными закрытыми эксплозиями, и связано образование кварцевых уран-золотоносных пород различного текстурного облика (от конгломератовидного до брекчиевидного и брекчиевого), которые слагают указанные месторождения. Впервые обосновывается магматогенный генезис уран-золоторудных месторождений Витватерсранда и отнесение их к кварцево-жильной золотосульфидной формации.

**Ключевые слова:** месторождение, уран, золото, флюидная магма, конгломераты, псевдоконгломераты, кремнеземный расплав, гель, коллоид, Витватерсранд.

## MAGMATIC GENESIS OF URANIUM-GOLD-ORE DEPOSITS IN WITWATERSRAND, THE REPUBLIC OF SOUTH AFRICA

S. S. Dolgushin<sup>1</sup>, G. N. Cherkasov<sup>1</sup>, A. P. Dolgushin<sup>2</sup><sup>1</sup>Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia; <sup>2</sup>Berezovgeologiya, the Siberian Branch of AO Urangeo, Novosibirsk, Russia

Based on critical analysis of the references available on the uranium-gold-ore deposits of Witwatersrand (the Republic of South Africa) and the use of current experimental data on the structure and composition of ore-magmatic systems, it can be concluded that fragmentary uranium-gold-bearing quartz rocks of these deposits, identified as conglomerates, are pseudoconglomerates. It is shown that their formation is due to ore-bearing and substantially siliceous (uranium-gold) fluid magma, which derived from differentiated source siliceous magma of liquation differentiate. It is due to intrusion of this magma, accompanied with local closed explosions, that the uranium-gold-ore quartz rocks were formed, having various structures, from conglomerate-type to breccia-type and breccia, which form these deposits.

**Keywords:** deposit, uranium, gold, fluid magma, conglomerates, pseudoconglomerates, siliceous melt, gel, colloid, Witwatersrand.

DOI 10.20403/2078-0575-2017-2-92-103

### Общие черты геологического строения провинции

Южная Африка долгое время была одним из главных поставщиков золота в мире. Однако прославили ее не многочисленные крупные месторождения золота разных генетических типов, традиционных и для других золотоносных провинций мира (штокверковых, штокверково-жильных, жильных, вкрапленных, метасоматических и т.д.), а тип золотоносных конгломератов провинции Витватерсранд, аналогов которого по генезису, а главное по масштабу, в мире, в том числе и в России, не известно. Особенности строения витватерсрандских месторождений обусловлено появлением многочисленных противоречивых гипотез их генезиса. Как следствие, это создает проблему их поисков. Со времени их открытия в 1884 г. в Витватерсранде выявлены многочисленные золоторудные месторождения конгломератового типа, обрабатываемые 44 рудниками; исходя из количества добытого золота, месторождений

было явно больше, чем рудников. Весьма вероятно, что одним рудником (в нашей терминологии – горно-обогачительным комбинатом) отрабатывалось сразу несколько месторождений. К настоящему времени в этой провинции добыто 43 тыс. т золота, судя по данным Интернета, в разведанных запасах осталось 38 тыс. т. В публикациях за аналоги витватерсрандских месторождений выдаются многочисленные золоторудные (золотоурановые) месторождения в разных частях мира [6, 20, 21]. Однако критерии этих сопоставлений, в первую очередь генетические, далеко не однозначны. В связи с этим подавляющее большинство авторов придерживается мнения о том, что достоверных аналогов пока не обнаружено.

Геологическое строение изучаемой провинции подробно рассмотрено во многих публикациях [3, 6, 10, 13, 20, 21], в связи с чем мы охарактеризуем его лишь в самом общем виде, в части, необходимой для рассмотрения генезиса месторождений.



В общеструктурном плане уран-золотоносная провинция Витватерсранд располагается в пределах мульды размером 400×180 км, расположенной на архейском фундаменте (Каапваальском кратоне) древней Африканской платформы. Мульда представлена в основном терригенно-вулканогенными пологолежащими породами нескольких докембрийских систем общей мощностью до 15 км. Вторая снизу система мощностью 7,5 км, известная как Витватерсрандская, вмещает большую часть золоторудных месторождений. Она выполнена песчаниками, алевролитами, филлитами, углеродистыми сланцами, в значительной степени (местами до 30 %) кварцитами и вулканитами, а также многочисленными маломощными (0,5–1,2 м) слоями полимиктовых конгломератов (до 0,2 % разреза).

Учитывая, что проблема генезиса рассматриваемых месторождений «завязана» на конгломераты, необходимо дать некоторые пояснения по их составу и отношению к оруденению. Дело в том, что с открытия золоторудных месторождений Витватерсранда безраздельно господствовала гипотеза об их одновременном с конгломератами осадочном образовании, выраженная в понятии «формация золотоносных конгломератов». Следует уточнить: в рассматриваемой концепции все исследователи неизменно выделяли два вида конгломератов: полимиктовые, состоящие из обломков (галек) разнообразных пород акватории сноса, и олигомиктовые только кварцевые. При этом указывалось, что в количественном отношении резко преобладают полимиктовые конгломераты, слагающие протяженные горизонты мощностью в несколько метров. Олигомиктовые кварцевые на их фоне являются экзотическими образованиями в виде линз мощностью 0,3–1,5 м (в среднем 0,5 м) и представляют собой рудные тела, в то время как полимиктовые никогда не несут рудной минерализации. Никогда не возникало вопросов об экзогенной осадочной природе полимиктовых конгломератов и их отнесения к собственно конгломератам. Но вот экзогенная осадочная природа олигомиктовых в последнее время ставится под сомнение, а относят их к эндогенным образованиям (псевдоконгломератам) – продуктам эндогенного рудно-магматического процесса. Мы особо обращаем внимание на конгломераты, так как разное понимание природы пород, объединенных этим термином, и послужило одной из главных причин появления различных гипотез генезиса месторождений Витватерсранда.

Витватерсрандская рудная провинция располагается в северном фасе мульды, образуя дугообразную, согласную с формой мульды полосу (протяженность около 280 км, ширина 20–25 км), условно разделяемую на Восточный, Центральный и Западный Ранд (см. рисунок).

### Месторождения

Золотоурановые месторождения (местное название – рифы, имеющие собственные имена –

Мейн-Риф, Блэк-Риф и т.д.) распределены по всему 15-километровому протерозойскому разрезу, концентрируясь в верхнем (4,5 км) отделе Витватерсрандской системы, в пределах которого они располагаются минимум на 16 стратиграфических уровнях (горизонтах) [3, 6, 20]. В конкретных горизонтах рудные тела не составляют единого пласта, а слагают лишь отдельные разобщенные кварцевые линзы мощностью 0,1–0,5, в среднем 0,3 м, редко до 1,5 м, а в единичных случаях (в раздувах, называемых рудными столбами) – до 6 м. Их протяженность по простиранию десятки метров, лишь в одном случае достигает 1360 м [6], а по падению до 250–400 м, например, на руднике Лесли-Голд до 3220 м. Кварцевые тела (рифы), представляющие собой месторождения, обычно залегают согласен со слоистостью пород. Однако встречается и несогласное их залегание, как, например, в пачке «...Мейн-Риф-Лидер, где полосчатые пиритизированные кварциты, имеющие мощность от нескольких сантиметров до 25 м, выполняют канал и являются рудой» [6, с. 30]. Об этом же свидетельствует и часто употребляемый африканскими геологами термин «рудные столбы». Строение рифов от простого до сложного. Простое свойственно большинству рифов, они представляют собой единое (сплошное) кварцевое тело. При сложном строении золотоносные кварцевые линзы мощностью 0,1–0,5 м образуют компактные пачки общей мощностью до нескольких метров, разделенные золотоносными кварцитами. В таких пачках промышленно золотоносны одна-две линзы. Контакты кварцевых линз четкие (по типу кварцевых жил), однако по мере выклинивания по простиранию часто отмечается переход в кварциты с сохранением золотоносности. Мощность кварцитов уменьшается до нескольких сантиметров, и они быстро выклиниваются. Промежутки по простиранию между золотоносными рифами в одном горизонте составляют многие сотни метров, чаще – многие километры.

Золотооруденение представлено жильной кварц-золото-сульфидной, местами золото-урано-сульфидной формацией двух обычно разобщенных в пространстве морфологических типов: 1) так называемыми кварцевыми конгломератами, 2) брекчиевидными кварцевыми жилами и их штокверками. В Витватерсранде первый является главным, а в соседней провинции Гане он резко уступает второму: из 19 ранее действовавших рудников 16 работали на жильном (брекчиево-жильном) типе и только 3 – на «конгломератовом» [6]. Содержание золота составляет от 4,5 до 10–19 г/т, иногда и 20–30 г/т. Для обоих типов, кроме того, характерно присутствие сульфидов (пирита (до 30 г/т), пирротина, пентландита, халькопирита), алмазов и редкоземельных элементов (иттрия и иридия, причем последний даже извлекался в промышленных масштабах). На многих месторождениях отмечается промышленное содержание урана, значительно повышающее

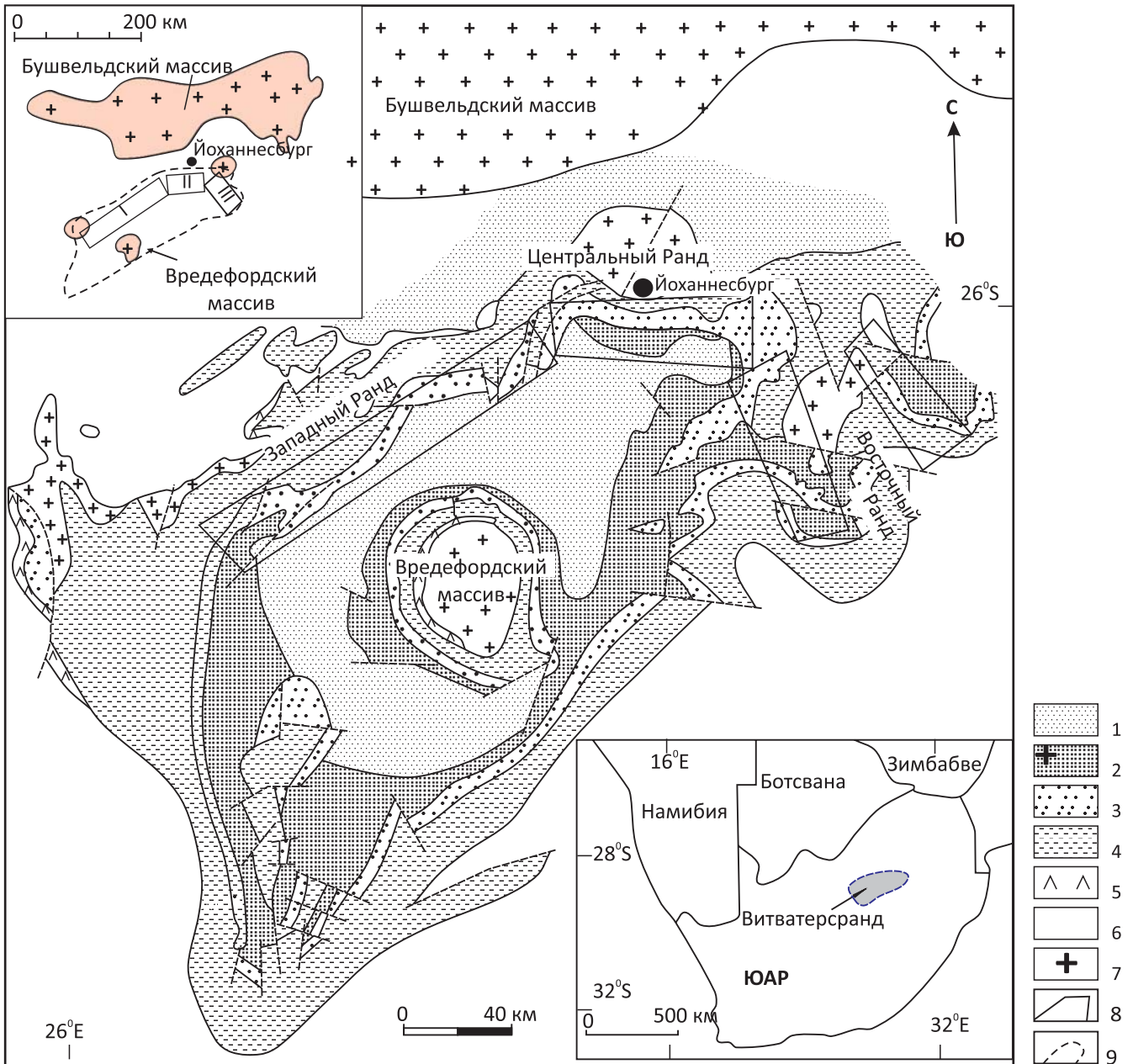


Схема геологического строения депрессии Витватерсранд [24] (циркумсинклинальное строение депрессии определяется поднятием Вредефорда; дополнения авторов: схематично нанесены контуры золотоносной провинции Витватерсранд)

Вулканогенно-осадочные формации (в скобках средний возраст, млн лет): 1 – Трансвааль (2025), 2 – Вентерсдорп (2709), Витватерсранд (2914): 3 – верхний, 4 – нижний, 5 – Доминион (3074), 6 – фундамент (3120); 7 – интрузивные массивы габбро-гранитного состава бушвельдского комплекса; 8 – Au-U провинция Витватерсранд (I – Западный Ранд, II – Центральный Ранд, III – Восточный Ранд); 9 – Витватерсрандский прогиб

рентабельность их отработки. На четырех месторождениях восточного Витватерсранда были найдены единичные алмазы. (Здесь и далее, называя месторождения по главному полезному ископаемому золоторудными, мы имеем в виду комплексный уран-платино-алмазо-золоторудный характер их минерализации.)

Золотоносные рифы сложены кварцевыми породами обломочной текстуры, традиционно называемыми конгломератами. Эти весьма экзотичные образования – своего рода «визитная карточка» уран-золоторудных месторождений Витватерсранда. Именно они обуславливают в генетическом

плане мировую известность и неповторимость месторождений. Это породы обломочной текстуры конгломератовидного, а чаще конгломерато-брекчиевого или даже только брекчиевого облика с постепенными переходами друг в друга даже в пределах отдельных образцов. Состав пород независимо от их текстурного облика существенно кварцевый с содержанием кремнезема от 70 до 90, а в ряде случаев до 98 %. В обломках встречается только кварц жильного типа, редко – единичные обломки (в нашей интерпретации, ксенолиты) вмещающих пород – кварцитов, песчаников, сланцев. Размер кварцевых обломков от 1 до 15 см, по массовым



(25 тыс.) замерам в среднем 1,4 см [3]. Форма обломков разная – от округлой гальковидной до угловатой. Для округлых обломков, особенно крупных, характерны эллипсоидные формы с уплощенной нижней поверхностью [3, 6], свойственные, как мы полагаем, вовсе не галькам, а ликвационным глобулам. Там, где преобладают такие обломки, породы имеют конгломератовидный облик, угловатые – брекчиевидный или даже брекчиевый.

Традиционно обломки округлой формы называли гальками. Их считали продуктами окатывания в водной среде, а отсюда, и всю породу называли конгломератами. Это не единственная точка зрения. Так, после статей А. М. Портнова о конгломератах Витватерсранда как эндогенных образованиях [11] многие отечественные геологи стали рассматривать эти породы как псевдоконгломераты. А. М. Портнов считал, что они образовались в подземных гидротермальных потоках и частично при эксплозиях. Близких представлений придерживался и А. Д. Щеглов [20], который полагал, что по крайней мере часть обломков сформировалась не только при эксплозиях, но и из гидротермального кремнеземного флюида – коллоида, переходящего при коагуляции в кремнеземный гель, из которого образовались кварцевые нодулы. Д. И. Царев определял эти породы как псевдоконгломераты метасоматического генезиса [15]; Ю. Г. Сафонов [13], А. А. Кременецкий (1996, 2001) и мн. др. – как продукты гидротермальных коллоидно-дисперсных систем, переходящих на месте становления в кремнеземные гели, из которых образовались псевдоконгломераты. С. С. Долгушин [1, 2] и А. А. Маракушев [12] считают их продуктами ликвации кремнеземной магмы с формированием кварцевых глобул и частичным их дроблением при эксплозивных явлениях, сопровождавших процесс ее становления.

Общим положением этих гипотез является признание образования кварцевых пород из гидротермальных высококонцентрированных коллоидных систем существенно кремнеземного состава, превратившихся при коагуляции в кремнеземные гели. Но природу этих гелей исследователи понимают по-разному: появились они в водной среде или в гидротермальных растворах [13, 20] либо в магматических кремнеземных расплавах (магмах) [1, 2, 12].

Существуют разные мнения об обломках обоих типов (округлых кварцевых гальковидных и угловатых, также кварцевых, формирующих брекчиевидный облик породы). У сторонников осадочного генезиса месторождений это гальки или сингенетичные брекчии, эндогенного – метасоматиты по обломочным породам, а чаще – тектонические брекчии. Однако в последнее время появилась принципиально новая точка зрения: их считают эксплозивными брекчиями. Впервые эта гипотеза была высказана А. М. Портновым [11], затем в разных вариантах А. Д. Щегловым [20], Н. А. Фогельман (1998), С. С. Долгушиным [1, 2] и А. А. Маракушевым [12] и др.

Необходимо отметить, что наиболее распространенными, а точнее господствующими породами золоторудных рифов являются вовсе не конгломератовидные, а брекчиевидные породы, вплоть до настоящих брекчий. Это следует из многочисленных публикаций как африканских, так и отечественных ученых. Например, Ю. Г. Сафонов и В. Ю. Прокофьев [13], посещавшие африканские рудники, пишут, что «риф Карбон-Лидер в осмотренных выработках не выглядит, как „конгломератовый“ горизонт. „Галечные“ образования здесь можно выделить лишь условно в нечетко выраженных зонах мощностью от 1–2 до 30 см, имеющих брекчиевидное строение» (с. 148). То же отмечает и А. Д. Щеглов [20], осматривавший ряд карьеров и подземных выработок. Примечательно и замечание Ф. П. Кренделева: «...В районе Претории конгломерат более всего похож на брекчированный кремль» [6, с. 33]. Тем не менее, несмотря на весьма скромные масштабы распространения кварцевых пород более или менее выраженного сравнительно с брекчиями конгломератовидного облика, в мировой литературе прочно закрепилось мнение обо всех обломочных золотоносных породах кварцевого состава как о конгломератах. Вероятно, это связано с тем, что долгое время, особенно на первых этапах изучения месторождений, безраздельно господствовало представление об их экзогенной (россыпной) природе и термин «конгломераты» был как нельзя к месту.

Другая, не менее примечательная особенность витватерсрандских месторождений, создающая им мировую известность, – наличие в цементе пирита в форме шариков, известных как «пиритовая дробь» или «картечь». Пирит наряду с другими сульфидами является составной частью цемента (от 5–10 до 30 %), присутствуя в виде вкраплений или гнезд, а на отдельных месторождениях, кроме того, – в виде шаровидных форм с разной степенью округленности, вплоть до шариков. Размеры шариков пирита разные даже в одном образце – от нескольких миллиметров до 1–2 см. Строение разное, но обычно концентрически-зональное. Независимо от формы пирит всегда золотоносен. По внешнему виду и строению шаровые формы пирита похожи на глобулярные руды эндогенных месторождений, таких как оловянные, полиметаллические и, особенно, глобулярные руды железорудных месторождений Ангаро-Илимской группы Сибирской платформы. Мы рассматриваем шаровые формы пирита (вместе с кварцевыми нодулями) как продукты ликвации сульфидсодержащего кремнеземного флюида [1, 2].

Обсуждая происхождение пиритов шаровых форм (для россыпной гипотезы генезиса витватерсрандских месторождений это один из главных аргументов), небезынтересно отметить, что акад. А. Н. Шило, автор монографии «Учение о россыпях», отрицая экзогенную (россыпную) природу шаровых пиритов, в 2007 г. писал, что он никогда не видел шаровых форм в россыпях пиритов.



Подобные формы имеет не только пирит, но и другие минералы изучаемых месторождений, например уранинит и тухолит, которые образуют шаровые формы размером до 2–5 мм, а также золото, иногда встречающееся в виде микроскопических шариков. Сторонники осадочного генезиса считают шарики пирита, как и кварцевые гальки, «окатышами» в россыпях; сторонники эндогенного генезиса – глобулами, образовавшимися при коагуляции рудоносного гидротермального флюида. Так, например, А. Д. Щеглов [20] с коллективом минералогов, специально занимавшихся изучением шаровидных пиритов этих месторождений, а вслед за ними Ю. Г. Сафонов [13] и А. А. Маракушев [12], основываясь на концентрически-зональном строении, трещинах усыхания в гелеобразных массах и ряде других признаков, категорически отрицают их осадочную природу, считая эндогенными образованиями.

Цемент (10–30, в единичных случаях до 60 %) кварцевого состава обычно темно-серого цвета от примеси сульфидов (главным образом пирита), хлорита, серицита, углеродного вещества (графита) и рудных, при значительных содержаниях углеродистого вещества (Блэк-Риф) он почти черный. Отмечается прямая корреляция между золотом и углеродным веществом. Цемент золотоносен. Золото содержится примерно поровну в кварцевом цементе и пирите, оно тонкодисперсное, невидимое даже под микроскопом. Распределение его по цементу более или менее равномерное, но иногда отмечаются скопления в виде полосок или даже пленок мощностью 1–2 мм как в нижних, так и в верхних частях рифа. Наличие золота устанавливается только в результате химического анализа. Особенностью золотооруденения является то, что при тонкодисперсном состоянии и относительно равномерном распределении оно не образует самородков, лишь как исключение иногда формирует видимые зерна размером до 1–2 мм. Будучи тонкодисперсным, оно отсутствует в шлихах. Содержание золота по месторождению колеблется от 4,5 до 19 г/т, иногда до 30 г/т, в среднем 11,9 г/т.

Следует еще раз особо отметить, что главной особенностью месторождений Витватерсранда является тесная связь оруденения с обломочными породами, называемыми конгломератами, причем не с любыми полимиктовыми конгломератами, а только с олигомиктовыми кварцевыми. Однако природу этой связи разные геологи понимают по-разному. По представлениям сторонников осадочного россыпного генезиса, она генетическая, обусловленная одновременным образованием конгломератов с россыпями золота, что и отражено в выделении ими «формации золотоносных конгломератов» [3]. По мнению сторонников гидротермального, наложенного на уже существующие конгломераты оруденения, она парагенетическая, когда конгломераты рассматриваются только как благоприятная среда. Так, например, А. Д. Щеглов, отрицая существование

«формации золотоносных конгломератов», считает, что «сочетание золотого оруденения с конгломератами... в определенной мере случайное явление, которому не следует придавать универсального значения» [20, с. 38]. Однако в этом случае совершенно не учитывается наложение гидротермального оруденения только на кварцевые «конгломераты», а не на соседствующие с ними все другие полимиктовые. На это обращал внимание Ф. П. Кренделев, отметив, что «по-видимому, кварц играет какую-то существенную роль в процессе обогащения конгломератов золотом» [6, с. 191]. Он не раскрыл характер этой связи, но нам представляется, что именно она, являясь генетической, и определяет витватерсрандские месторождения как образованные из эндогенного, первоначально золотоносного кремнеземного флюида (кремнеземной магмы).

Считается, что месторождения Витватерсранда якобы выделяются среди других золоторудных месторождений стратиграфическим контролем оруденения и послышной (силлообразной) формой их залегания. У исследователей и на этот счет есть разные точки зрения. Традиционные представления не соответствуют действительности. Мы уже отмечали, что месторождения расположены по вертикали в пределах всего 15-километрового разреза докембрия. Только в одном верхнем отделе Витватерсрандской системы мощностью 4,5 км находится не менее 16 таких уровней [6, 20], а ведь накапливались эти отложения в течение 600 млн лет [20]. Получается, что за это время как минимум 16 раз повторялись абсолютно одинаковые палеогеографические условия образования только кварцевых золотоносных конгломератов, что вряд ли возможно.

Неясно, как далеко прослеживается по простиранию конкретный, содержащий золотоносные «конгломераты» горизонт, поскольку его прослеживание по скважинам в условиях больших глубин с увязыванием между собой отдельных разобщенных участков при отсутствии маркирующих горизонтов чрезвычайно сложно. На конкретных уровнях (горизонтах) рудные рифы не составляют сплошного тела, это лишь отдельные, разобщенные тела протяженностью по простиранию лишь десятки или первые сотни метров, лишь в одном случае до 1360 м [6]. В то же время промежутки между золотоносными рифами в пределах одного горизонта – многие сотни метров или даже многие километры. Следует отметить, что послышное залегание золотоносных рифов свойственно отнюдь не только им. На разрезах месторождений, приведенных в многочисленных публикациях, видно, что такое залегание в пологих толщах на месторождениях – явление обычное для интрузивных пород. Они представлены многочисленными силлами диабазов, габброидов, альбитофиоров, а также безрудными и рудными (например, в доломитовой свите Трансваальской системы) кварцевыми жилами, образующими вместе с золоторудными рифами «слоеный пирог».



Представляется, что вертикальный разброс месторождений по стратиграфическому разрезу связан вовсе не с их приуроченностью к многочисленным «рудным» горизонтам, а с разной высотой проникновения вверх рудоносных флюидов. Следует отметить, что кроме господствующего залегания, согласного с вмещающими породами золотоносных рифов, отмечаются случаи и рвущего их несогласного залегания, как, например, на руднике Адья-Биппо [6], что обычно объясняется влиянием тектонических процессов. Кроме того, иногда отмечается наличие промышленного золотооруденения в альбандах даек разного состава (рудник Фанти [6]).

### Источники золота для россыпей

Гигантская концентрация рудного вещества, и в первую очередь золота, на весьма ограниченной площади, отвечающей Витватерсрандской провинции, естественно, является одним из опорных положений как гидротермальной, так и осадочной гипотез. В первой оруденение связывается с мантийными магматическими флюидами (отсюда и мантийный набор рудных элементов), определяющими в верхних горизонтах земной коры образование магматических очагов (предположительно бушвельдского комплекса). С глубокой дифференциацией магматического очага и связано появление рудоносных гидротермальных растворов или рудных магм. Во второй источник золота видят в золотоносных кварцевых жилах фундамента, при разрушении питающих россыпные месторождения Витватерсранда.

Суть вопроса об источниках заключается в количестве золота и путях его доставки до месторождения. Если для эндогенного процесса практически любое количество рудного компонента и его доставка не составляет проблемы, то для экзогенных это не так. Как уже отмечалось [13], самое уязвимое предположение россыпной гипотезы – количество золота в коренном источнике. В связи с этим возникают по крайней мере два вопроса: 1) гигантские объемы источников золота в фундаменте (до 100 тыс. т), питающих россыпи провинции; 2) дальность переноса золота от источника до россыпи. Витватерсрандская провинция, находясь в пределах мульды, удалена от выходов фундамента на многие километры, а от возможных источников в фундаменте – на многие сотни километров. Естественно, возникает вопрос, каким образом золото попадало в россыпи от источника, удаленного на столь большие расстояния. Из монографии [19], а также из практики известно, что россыпи золота образуются на расстоянии не более первых километров от источника, а в «ближайшем сносе» уже теряется до 50 % металла. Иначе говоря, если в провинции запасы золота оценены в 100 тыс. т, то в источнике его должно быть не менее 200 тыс. т, чего в акватории сноса быть не может. Напомним также, что среднее содержание золота в россыпях составляет 0,4 г/т, а в коренном источнике – 10 г/т [6, с. 13], в то время как в витватерсрандских место-

рождениях его среднее количество 11,9 г/т, встречается 20 и 30 г/т. Следовательно, только эти факты отрицают саму возможность осадочного (россыпного) генезиса африканских месторождений.

### Генезис месторождений

Уникальность Витватерсрандской провинции по запасам золота (вкуче с ураном) не сравнится ни с какими другими регионами мира. Наличие в ней крупных (гигантских) месторождений вдохновляет геологов на поиски аналогов. Однако, как уже отмечалось, таких аналогов, в первую очередь по масштабам оруденения, за прошедшие 130 лет так и не было обнаружено. Причина, как нам представляется, заключается в разном понимании генезиса этих месторождений и, как следствие, критериев поиска оруденения такого типа.

Камнем преткновения любых гипотез генезиса данных месторождений являются два вопроса: 1) почему обломочная порода, традиционно называемая конгломератами, имеет только кварцевый состав; 2) почему оруденевают только олигомиктовые кварцевые конгломераты, в то время как другие породы, в том числе и полимиктовые конгломераты, – никогда. Все другие проблемы, как бы сложны они не были, являются производными этих двух.

Существует множество гипотез генезиса золоторудных месторождений Витватерсранда, основа которых – вопросы происхождения «конгломератов» и соотношений с ними золоторуденения. Эти гипотезы можно разделить на три группы: осадочные, гидротермальные и комбинированные осадочно-гидротермальные.

В группе осадочных гипотез наиболее популярна, а для зарубежных геологов, занимающихся месторождениями Витватерсранда [3], – непрерываемая россыпная, согласно которой южноафриканские месторождения представляют собой древние (протерозойские) россыпи, сингенетичные вмещающим конгломератам, а источником золота последних являются золотоносные кварцевые жилы архейского фундамента.

Гидротермальные гипотезы основаны на мнении о том, что оруденение избирательно наложено на уже существующие кварцевые конгломераты [6, 21 и др.] или имеет метасоматическую природу с одновременным образованием кварцевых метасоматитов псевдоконгломератового облика [15].

Гипотезы третьей группы представляют собой комбинацию осадочных и гидротермальных. Считается, что месторождения являются осадочно-гидротермальными образованиями, когда в результате вулканической деятельности (по типу «черных курильщиков») рудное вещество, выносимое гидротермами, отлагается осадочным путем (частично хемогенным) синхронно во вмещающих породах и конгломератах. Этой точки зрения придерживаются А. Д. Щеглов, А. А. Кременицкий, В. Н. Старостин, А. М. Шило и др.



Содержанию этих гипотез и их критическому анализу посвящены многочисленные публикации зарубежных и отечественных геологов [3, 6, 13, 20, 21 и др.], поэтому мы ограничимся только ссылкой на две последние работы по данной теме [14, 18]. Их авторы в результате критического рассмотрения если не всех, то по крайней мере главных гипотез констатируют, что в настоящее время наиболее популярной, хотя и недостаточно обоснованной является осадочно-гидротермальная (и ее вариант вулканогенно-гидротермальная).

По отношению к главному вопросу генезиса золотооруденения (соотношению его с конгломератами) все гипотезы, несмотря на их противоречивость, имеют одну общую отправную точку: признают контролируемую роль в локализации оруденения обломочных пород, называемых конгломератами. Однако при этом они словно не замечают значения состава (в данном случае кварцевого) указанных «конгломератов». Как следствие, появилось выделение на примере африканских месторождений так называемой **формации золотоносных конгломератов** («металлоносных», «золотоураноносных» и т.д.) [3, 6, 20] без указания на их состав. В приведенном определении игнорируется главный критерий африканских месторождений – связь золотооруденения с обломочными породами исключительно кварцевого состава. Конечно, это размывает суть проблемы генезиса и, как следствие, поисковых критериев. Между тем Ф. П. Кренделев обращает особое внимание именно на эту связь и считает указанный признак важнейшим поисковым критерием для подобных месторождений. Так, настаивая на важности данного факта, он пишет, что «уран-золоторудными являются не любые конгломераты, а только хорошо отсортированные олигомиктовые разности с преобладанием кремнезема в составе галек и цемента. По-видимому, кварц играет какую-то существенную роль в процессе обогащения конгломератов золотом» [6, с. 191]. Мы полностью разделяем мнение Ф. П. Кренделева о тесной связи золота именно с кварцевыми конгломератами (в нашем понимании – псевдоконгломератами) и особой роли в этом процессе кварца. Со своей стороны, мы полагаем, что именно расшифровка такой связи и является главной задачей в понимании генезиса месторождений витватерсрандского типа. Однако приходится констатировать, что эта связь в существующих гипотезах не признается. Применительно к золотоорудным конгломератам определение «кварцевые» в каждой гипотезе трансформируется в просто «конгломераты», вероятно, под влиянием того, что в них все же встречаются обломки вмещающих пород (в нашей интерпретации, это ксенолиты в магматических псевдоконгломератах).

В результате критического анализа ранее существовавших гипотез была предложена принципиально новая гипотеза – магматогенная, базирующаяся на признании изначально рудоносного **кремнезем-**

**ного флюидного расплава** как ликвата материнской силикатной магмы, с инъекционно-эксплозивным путем становления которой и связано образование рудоносных кварцевых пород разного текстурного облика (брекчий и псевдоконгломератов) [1, 2, 12].

### Концентрация рудного вещества в гидротермальных растворах

В теории эндогенного рудообразования основополагающими до сих пор являются представления о переносе рудного вещества гидротермальными растворами. Все разногласия в оценке их роли в формировании месторождений сводились к разному пониманию состава, степени концентрации рудного вещества и форм его переноса в этих растворах. Первоначально считалось, что гидротермальные растворы, будучи истинными (ионными), имеют низкую концентрацию рудного вещества, но на месте их становления по мере распада рудное вещество, отделяясь от водной фазы, выпадает в осадок, образуя коллоидные и гелеподобные массы, из которых и образуются месторождения. Однако дальнейшее развитие представлений об ионных растворах показало, что максимально возможная концентрация в них рудных элементов ничтожна и не может обеспечить поступление достаточного для формирования месторождений количества рудного вещества, что неоднократно было показано К. Краускопфом, Ф. П. Чухровым, С. С. Смирновым и мн. др.

Позднее А. Г. Бетехтин вслед за К. Н. Феннером, развивавшим эту гипотезу еще в 1937 г., предположил, что форма переноса металлов в гидротермальном растворе не ионная, а галоидная, что увеличивает их концентрацию в сотни или даже тысячи раз и определяет образование коллоидов. В свое время данная гипотеза получила всеобщее признание, многие специалисты придерживаются ее до сих пор. Однако со временем выяснилось, что галоидная форма переноса металлов применима только к сульфидам, но не к другим рудным и петрогенным минералам, в частности к кремнию, а мы связываем образование африканских месторождений именно с ним. Также, выяснилось, что и эта форма переноса металлов не обеспечивает их необходимой концентрации для формирования месторождений, которые, судя по геологическим данным, образовались из весьма концентрированных коллоидных систем [5, 12, 17].

Кроме того, представления о гидротермальных коллоидных системах как переносчиках вещества от места зарождения до места отложения противоречат тому, что системы эти неустойчивы: при неизбежном на их пути изменении условий (РТ, полимеризации, потери газовой фазы, химических реакций и т.д.) происходит их распад [17]. Месторождения разных металлов, образованные из высококонцентрированных коллоидных систем, весьма широко распространены, на что указывали А. Н. Завариц-



кий, П. Ф. Иванкин О. Д. Левицкий, Е. А. Радкевич, В. Линдгрэн, Ю. Г. Юргенсон и мн. др.

Таким образом, имеющиеся сведения о невысокой концентрации рудного вещества в гидротермальных растворах не только в ионной, но и в других формах противоречат геологическим данным о его отложениях на месторождениях из плотных высококонцентрированных рудоносных систем.

Между тем современные теоретические и экспериментальные материалы позволили решить проблему существования высоких концентраций вещества в рудоносных системах, отрицая ведущую роль в его концентрации и переносе гидротермальными растворами и признавая ведущую роль магматического расплава (флюидной рудной магмы), являющегося ликватом исходной материнской магмы. Данные многочисленных исследований по этому вопросу [4, 5, 12, 22] были обобщены А. А. Маракушевым [7].

### Магматогенная гипотеза генезиса месторождений Витватерсранда

Согласно А. А. Маракушеву [7], в определенных условиях (влияние вмещающей среды, изменение РТ-условий, явлений полимеризации газовых реакций и т.д.) происходит ликвационная дифференциация исходной силикатной магмы магматического очага: «При этом образуются две области ликвации: силикатная магма ( $L_1$ ), флюидная силикатная магма ( $L_2$ ) и, соответственно, флюидная фаза (гидротермальный раствор ( $Y$ ))... причем только одна из них ( $L_2$ ) обладает высоким химическим сродством с рудными металлами и может выступать в роли их эффективного концентратора, тогда как другая флюидная (водная) фаза ( $Y$ -гидротермальный раствор низкой плотности) значительно беднее рудными металлами по сравнению с обеими расплавленными фазами ( $L_1, L_2$ )... Флюидные расплавы ( $L_2$ ) богаты силикатными и другими солями и характеризуются высокой плотностью (до  $2,5 \text{ г/см}^3$ ), мало отличаясь по этой характеристике от материнских силикатных расплавов... Высокая плотность сближает их с силикатными расплавами, оправдывая название флюидные магмы» [7, с. 5]. Таким образом, двухфазное состояние (флюидная магма и гидротермальный раствор) флюидных рудообразующих систем определяет неодинаковую способность концентрировать в себе разные металлы. На практике это выражается в том, что флюидные магмы, как высококонцентрированные (до 70–90 %) системы, при своем становлении определяют образование месторождений с признаками формирования руд из коллоидных масс, а сосуществующие с ними гидротермальные растворы с малой концентрацией рудных элементов осуществляют лишь метасоматическое изменение и окolorудную вкрапленность.

Таким образом, суть этих представлений о строении и составе рудно-магматических систем для определенной группы месторождений сводится

к признанию определяющей роли в рудно-магматическом процессе плотных высококонцентрированных рудных флюидных систем типа рудных магм как ликвационных дифференциатов исходной материнской магмы, в противоположность традиционным представлениям о концентрированных гидротермальных растворах.

А. А. Маракушев и др. в 1983 г. [7] на экспериментальном уровне обосновали представления о главенствующей роли в концентрации рудного вещества не гидротермальных растворов, а магматического расплава. В 2012 г. [12] он переводит эти положения применительно к Витватерсранду в прикладную плоскость, показывая, что месторождения имеют магматогенный генезис при первично расплавленной природе кремнеземного золотосодержащего флюида, связанного с магматическим очагом, материнским для месторождения. Соответственно, он показывает, что кварцевые породы конгломератовидного облика золотоносных рифов являются не конгломератами, а псевдоконгломератами, так как округлые кварцевые обособления, называемые гальками, на самом деле являются глобулами, будучи продуктами ликвационной дифференциации кремнеземного расплава, расслаивающегося на безрудные кварцевые нодулы и кварцевую рудную матрицу. Кварциты, сопровождающие рудные образования, он рассматривает как продукты того же кремнеземистого расплава. Тесные взаимоотношения округлых и обломочных форм кварца в рудных образованиях он связывает с тем, что перемещению и перемешиванию материала в рудах также способствует взрывной характер рудообразования [12, с. 5]. Позиция А. А. Маракушева относительно генезиса месторождений Витватерсранда полностью подтверждает высказанное нами ранее представление о магматогенно-эксплозивном генезисе этих месторождений в связи с инъекцией рудоносного кремнеземного флюида (рудной магмы) [1]. Используя термин «рудная магма», мы следуем за Ч. Ф. Парком, писавшим, что «магмы или магматические фракции, которые после затвердевания оказываются рудами, называются рудными магмами» [10, с. 31].

Следует сказать, что представления о рудных магмах не новы. Это, как говорится, хорошо забытое старое. Еще 100 лет назад они были высказаны Дж. Сперром в его известной работе «О рудных магмах» [26]. Позже в той или иной форме (как рудный остаток, остаточный расплав, рудные расплавы, концентрированный раствор, гидротермальная рапа и т.д.) они были поддержаны многими учеными, в частности Ф. Ю. Левинсон-Лессингом, С. С. Смирновым, Ф. В. Чухровым, Ч. Ф. Парком, а в настоящее время – А. А. Маракушевым [7, 12], Н. П. Ермаковым [4], Г. А. Юргенсоном [22] и мн. др. Так, например, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, разделяя магмы на силикатные и несиликатные, в числе последних выделяет пять типов магм: карбонатитовую, апатитолитовую,





сульфидолитовую, ферролитовую и кварцолитовую. Поддерживая представления о существовании рудных магм, отметим, что прямым доказательством этого являются четвертичные гематит-магнетитовые лавы месторождения Лако (Чили), описанные Ч. Ф. Парком и С. Хаггерти [10, 25], магнетитовые лавы Кируны (Швеция) [23], гематитовые лавы Алтая [9], сульфидные магмы Норильска (Россия), Садбери (Канада) и о. Гавайи (США), современные карбонатные лавы оз. Танганьика (Африка) и Ирана, карбонатиты редкометалльных месторождений, хромитовые интрузивные тела и т.д. В ряду таких магм стоят и кремнеземные магмы рассматриваемых африканских золоторудных месторождений.

Надо отметить, что представление о рудных магмах, несмотря на их возникновение еще на заре геологической науки, вплоть до настоящего времени не пользовалось широкой признательностью, хотя его упорно поддерживали многие ученые. Это отражено в словах Ч.Ф. Парка: «...не исключено, что представление о рудных магмах будет еще утверждено в науке о рудных месторождениях, ибо нет ни теоретического, ни практического смысла отвергать возможность существования рудных фаций магмы» [10, с. 31].

Из самой природы рудных магм (как производных дифференциатов разнообразных материнских силикатных магм) следует, что они имеют разный вещественный состав (карбонатные, кремнеземные, сульфидные, железорудные и т.д.) и разную концентрацию петрогенных и рудных элементов. Это например, кремнеземные с невысоким (доли процентов), но промышленно значимым содержанием золота, урана, сульфидов и других металлов, или, наоборот, – с очень высоким (до 100 %) содержанием рудных элементов (сульфидные, железорудные и другие магмы). Понятно, что разная степень концентрации петрогенных и рудных элементов в рудных магмах и определяет их способности к формированию того или иного облика и состава месторождений.

Не касаясь всего разнообразия рудных магм, обратим внимание только на одну их разновидность – золотоносные кремнеземные магмы, с которыми, по нашим представлениям, связано оруденение рассматриваемых африканских месторождений. Неизбежность в определенных условиях в результате ликвационной дифференциации отщепления от материнской магмы рудоносного флюидного кремнеземного расплава (флюидной кремнеземной магмы) на экспериментальном уровне доказано не только А. А. Маракушевым [7, 12], но и многими другими исследователями (Н. Г. Ермаковым [4], Г. А. Юргенсоном [22], Г. Б. Мелентьевым [8] и др.). Так, Н. П. Ермаков, анализируя соответствующие диаграммы, пишет, что «усиление тенденции магматического расщепления к концентрации кремнезема, связанное с вариациями давления и влияния других флюидных компонентов, ведет к образованию кварцитолитовых (калишпато-квар-

цевых и кварцевых) магм» и далее «ряд гранитных плутонов Казахстана представляют возможность убедиться в широком обособлении кремнистых расплавов от силикатной части гранитных магм» [4, с. 72]. Дополняя эти наблюдения, отметим, что не только в Казахстане, но и в Витватерсранде можно убедиться в широком обособлении кремнистых расплавов от силикатной части гранитных магм в области развития плутонов бушвельдского комплекса. Так, А. Дю Тойт [3, с. 159] отмечает обилие так называемых «псевдотахилитов» – кремнистых пород преимущественно обломочной текстуры, слагающих многочисленные дайки, жилы и штокверки, секущие витватерсрандские толщи.

Особенно подробно для рассматриваемых кварц-золоторудных месторождений эта точка зрения была обоснована Г. А. Юргенсоном [22]. На основе многолетних полевых наблюдений в Забайкалье и экспериментальных работ он установил, что жильный кварц золоторудных месторождений является продуктом эволюции высококонцентрированных существенно силикатных флюидов (кремнеземных магм), обогащенных летучими и рудными элементами. Также со ссылкой на экспериментальные работы А. Г. Миронова (1989) он отметил, что в кремнеземной магме, давшей кварцевые жилы, растворимость золота достигает  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/кг (19,7 г/т), что полностью соответствует содержанию золота в витватерсрандских месторождениях.

Обобщение экспериментальных и геологических данных о природе и составе рудоносных систем позволяет сделать вывод о том, что они, как ликваты исходной материнской магмы, представляют собой разного состава высококонцентрированные флюидные расплавы (флюидную магму), обеспечивающие на месте становления образование месторождений определенного типа. Применительно к витватерсрандским месторождениям это изначально золотоносный кремнеземный флюид, отвечающий понятию «флюидная кремнеземная магма».

Охарактеризуем генезис месторождений Витватерсранда в свете изложенных данных о строении их рудно-магматической системы.

В результате дифференциации магмы, предположительно бушвельдского комплекса, образовался полимеризованный уран-золотоносный кремнеземный флюидный расплав – кремнеземная флюидная магма, с интрузией которой и связано образование уран-золоторудных месторождений. Существенно кремнеземный (70–90 %  $\text{SiO}_2$ ) состав флюидной магмы определил образование кварцевых пород разного текстурного облика от конгломератовидного до брекчиевидного и брекчиевого. При этом конгломератовидный (глобулярный) облик кварцевых пород был связан с ликвационными процессами при распаде (расслоении) флюидной системы, а брекчиевидный – с местными закрытыми эксплозиями, неизбежно сопровождающими становление полимеризованных флюидных систем. В результате



совмещения ликвационных и эксплозивных процессов формирующаяся кварцевая порода приобрела конгломерато-брекчиевый облик с взаимными переходами, что и наблюдается на рассматриваемых месторождениях, даже в одном штуфе.

Рудоносность этих месторождений определяется изначальным содержанием золота и урана в кремнеземном флюиде, при ликвационном расслоении и раскристаллизации которого золото оказалось в кварцевом цементе в дисперсной форме, а также в составе пирита. Содержание других рудных элементов (платиноидов, сульфидов и т.д.) определялось также изначальным их количеством в кремнеземном флюиде. Поэтому сочетание кварцевых пород, определяемых по-разному (конгломераты, псевдоконгломераты или брекчии с рудной (золото-урановой) минерализацией), считающееся рядом авторов [20] случайным, далеко **не случайное, а вполне закономерное**, обусловленное способом образования этих месторождений из рудоносной флюидной кремнеземной магмы, что определяет их принадлежность к кварцево-жильной золото-сульфидной формации, широко распространенной в других регионах мира.

## Выводы

Признание определяющей роли изначальной рудоносной флюидной кремнеземной магмы в формировании рассматриваемых месторождений решает **основные** проблемы в установлении их генезиса: 1) почему так называемые конгломераты имеют только кварцевый состав; 2) почему оруденевают только олигомиктовые кварцевые конгломераты, а не все другие полимиктовые, которых составляют 0,2 % общего объема рудовмещающих толщ. Это связано со следующим.

1. Кварцевые породы обломочного облика (так называемые конгломераты) являются псевдоконгломератами, а их кварцевый состав определяется образованием из кремнеземной магмы.

2. Оруденение генетически связано с кварцевыми породами, поскольку кремнеземный флюид, давший эти породы, был изначальным золотоносен.

Также находят объяснение и другие вопросы: глобулярная форма выделений кварца и шаровая – пирита, уранитита, тухолита и золота как продуктов ликвации рудоносного флюида; брекчиевидная текстура кварцевых пород; резкие интрузивного типа контакты рудных (кварцевых) тел; постепенные переходы по простиранию рудных «конгломератов» в золотоносные кварциты; многочисленные признаки образования кварцевых «галек» при коацервации и синерезисе из плотных гелеобразных масс кремнезема [13, 20]. Как следствие, появляется возможность выработки новых критериев поисков уран-золоторудных месторождений типа Витватерсранда.

Принадлежность витватерсрандских месторождений к широко распространенной в мире кварцево-жильной формации лишает их ореола

генетической уникальности. Они становятся в один ряд с другими месторождениями этой формации, характеризующимися многочисленными вариациями структурно-текстурных особенностей, условиями залегания, спецификой рудной минерализации, ее масштабом и многими другими параметрами, определяющими своеобразие конкретных месторождений, в частности витватерсрандских.

Исходя из принадлежности этих месторождений к кварцево-жильной золотосульфидной формации, их аналоги следует искать в уже известных золоторудных (уран-золоторудных) провинциях с оруденением кварцево-жильного типа с широким проявлением кремнеземного магматизма, в частности, магматических кварцолитов, принимаемых обычно за метасоматические кварциты. По мнению академика Н. А. Шило, разделяемому и нами, Витватерсранду можно противопоставить Северо-Восток России, а по нашим данным – и южное обрамление Сибирской платформы, где имеются аналоги таких провинций, а отсутствие их параллелизации с Витватерсрандом связано «с непониманием истинного существа рудообразующих процессов» [18, с. 110] и с общей недостаточной их изученностью и отсутствием обоснованного сравнения с африканскими.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгушин С. С. О возможном интрузивно-ликвационном генезисе золоторудных месторождений Витватерсранда (ЮАР) // Руды и металлы. – 2000. – № 3. – С. 83–89.
2. Долгушин С. С., Долгушин А. П. Инъекционно-эксплозивная модель формирования золото-урановых месторождений Витватерсранда // Материалы по геологии, поискам и разведке месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: ВИМС, 2015. – С. 393–401. – (Информ. сб.; вып. 159).
3. Дю Тойт А. Геология Южной Африки. – М.: ИЛ, 1957. – 488 с.
4. Ермаков Н. П. Гранитные пегматиты, силикситы и кварцолиты Казахстана // Тр. Междунар. геол. конгр., XXI сес. – М.: Наука. 1960. – С. 62–78.
5. Кормилицын В. С. Рудные формации и процессы рудообразования. – Л.: Недра, 1973. – 327 с.
6. Кренделев Ф. П. Металлоносные конгломераты мира. – Новосибирск: Наука, 1974. – 238 с.
7. Маракушев А. А., Граменицкий Е. Н., Коротаев М. Ю. Петрологическая модель эндогенного рудообразования // Геология рудных месторождений. – 1983. – № 1. – С. 3–20.
8. Мелентьев Г. Б., Делицын А. М., Мелентьев Б. Н. Ликвация и ее значение в петрологии // Редкометалльные граниты и проблемы магматической дифференциации. – М.: Недра, 1972. – С. 253–285.
9. О ликвации рудно-силикатного вещества и возможном механизме разделения компонентов в расплаве / А. М. Дымкин, А. Л. Павлов, С. С. Дол-



гушин и др. // Проблемы генезиса железорудных месторождений Сибири. – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 4–11.

10. **Парк Ч. Ф., Мак-Дормид Р. Л.** Рудные месторождения. – М.: Мир, 1966. – 546 с.

11. **Портнов А. М.** О возможном гипогенном происхождении конгломератов Витватерсранда // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. – 1988. – № 10. – С. 49–54.

12. **Проблема** происхождения ураново-золоторудного месторождения Витватерсранд / А. А. Маракушев, Л. И. Глазовская, Н. А. Панеях, С. А. Маракушев // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2012. – № 3. – С. 3–16.

13. **Сафонов Ю. Г., Прокофьев В. Ю.** Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранда // Геология рудных месторождений. – 2006. – Т. 48, № 6. – С. 475–511.

14. **Старостин В. И.** Эволюция взглядов на происхождение золоторудного месторождения Витватерсранд // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2015. – Т. 70, № 2. – С. 32–38.

15. **Царев Д. И.** Металлоносные псевдоконгломераты Витватерсранда // Руды и металлы. – 2000. – № 3. – С. 70–82.

16. **Черкасов Г. Н.** Золотое оруденение Витватерсранда и его вероятный аналог в Сибири // Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология: тез. Третьего Всерос. симп. с междунар. участием. – Улан-Удэ: Изд-во Бурят. науч. центра СО РАН, 2004. – С. 233–235.

17. **Чухров Ф.В.** Коллоиды в земной коре. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 668 с.

18. **Шило Н. А.** Витватерсранд и проблема рудообразования // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26, № 4. – С. 101–111.

19. **Шило Н. А.** Учение о россыпях: теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 576 с.

20. **Щеглов А. Д.** О металлогении Южно-Африканской Республики, генезисе золоторудных месторождений Витватерсранда и проблеме открытия их аналогов в России. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1994. – 43 с.

21. **Уран** в древних конгломератах / А. И. Безгубов, Ю. И. Бывших, П. К. Дементьев и др. – М.: Госатомиздат, 1963. – 188 с.

22. **Юргенсон Г. А.** Типоморфизм и рудоносность жильного кварца. – М.: Недра, 1984. – 149 с.

23. **Geijer P.** The iron ores of the Kiruna type, geographical distribution, geological characters and origin // Sveriges Geol. Unders. – 1931. – No. 367. – P. 1–39.

24. **Gibson R. L., Reimold W. U.** Field excursion through the Vredefort impact structure // 62nd Meeting of the Meteorological Society. – Johannesburg, Africa, 11–16 July, 1999. – 88 p.

25. **Haggerty S. E.** The Loco magnetite lava flow, Chile // Annu. Rept. Dir. Geophys. lab., Carnegie Inst. – Washington D.C., 1970. – P. 329–330.

26. **Spurr J. E.** The ore magmas: a series of essays on ore deposition. – New York: McGraw-Hill Book Co. Inc., 1923. – 915 p.

## REFERENCES

1. Dolgushin S.S. [On possible intrusive-liquation genesis of gold-ore deposits in Witwatersrand (the Republic of South Africa)]. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2000, no. pp. 83–89. (In Russ.).

2. Dolgushin S.S., Dolgushin A.P. [Injective-explosive model of formation of gold-uranium deposits in Witwatersrand]. *Materialy po geologii, poiskam i razvedke mestorozhdeniy urana, redkikh i redkozemel'nykh metallov* [Materials on geology, search for and development of deposits of uranium, rare and rare-earth metals]. Moscow, VIMS Publ., 2015, collection, issue 159, pp. 393–401. (In Russ.).

3. Du Toit A. *Geologiya YUzhnoj Afriki* [The Geology of South Africa]. Moscow, IL Publ., 1957. 488 p. (In Russ.).

4. Ermakov N.P. [Granite pegmatites, silicites, and quartzolites of Kazakhstan]. *Tr. Mezhdunar. geol. kongr., XXI sessiya* [International geological congress proceedings, 21<sup>th</sup> session]. Moscow, Nauka Publ., 1960, pp. 62–78. (In Russ.).

5. Kormilitsyn V.S. *Rudnye formatsii i protsessy rudoobrazovaniya* [Ore formations and mineralisation]. Leningrad, Nedra Publ., 1973, 327 p.

6. Krendelev F.P. *Metallonosnye konglomeraty mira* [Metal-bearing conglomerates of the world]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974. 238 p. (In Russ.).

7. Marakushev A.A., Gramenitskiy E.N., Korotaev M.Yu. [Petrological model of endogenous mineralisation]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 1983, no. 1, pp. 3–20. (In Russ.).

8. Melentyev G.B., Delitsyn A.M., Melentyev B.N. [Liquation and its meaning in petrology]. *Redkometall'nye granity i problemy magmaticheskoy differentsiatsii* [Rare-metal granites and magmatic differentiation issues]. Moscow, Nedra Publ., 1972, pp. 253–285. (In Russ.).

9. Dymkin A.M., Pavlov A.L., Dolgushin S.S., et al. [Liquation of ore-silicate matter and a possible method to separate melt components]. *Problemy genezisa zhelezorudnykh mestorozhdeniy Sibiri* [The issues of iron-ore deposits genesis in Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, pp. 4–11. (In Russ.).

10. Park C.F., McDermid R.L. *Rudnye mestorozhdeniya* [Ore deposits]. Moscow, Mir Publ., 1966. 546 p. (In Russ.).

11. Portnov A.M. [On the possible hypogenous origin of the Witwatersrand conglomerates]. *Izv. vuzov. Ser. Geologiya i razvedka – Bulletin of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration*, 1988, no. 10, pp. 49–54. (In Russ.).

12. Marakushev A.A., Glazovskaya L.I., Panevakh N.A., Marakushev S.A. [The origin of the Witwatersrand uranium-gold-ore deposit]. *Vestn. Mosk. un-ta – Moscow University Bulletin*, Series 4. Geology, 2012, no. 3, pp. 3–16. (In Russ.).



13. Safonov Yu.G., Prokofyev V.Yu. [The model of syndepositional hydrothermal formation of gold-bearing reefs of the Witwatersrand basin]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no. 6, pp. 475–511. (In Russ.).
14. Starostin V.I. [Evolution of the point of view on the origin of Witwatersrand uranium-gold-ore deposit]. *Vestn. Mosk. un-ta – Moscow University Bulletin, Series 4. Geology*, 2015, vol. 70, no. 2, pp. 32–38. (In Russ.).
15. Tsarev D.I. [Metal-bearing pseudoconglomerates of Witwatersrand]. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2000, no. 3, pp. 70–82. (In Russ.).
16. Cherkasov G.N. [Gold mineralisation of Witwatersrand and its possible analogue in Siberia]. *Zoloto Sibiri i Dal'nego Vostoka: geologiya, geokhimiya, tekhnologiya, ekonomika, ekologiya. Tez. Tretyego Vseros. simp. s mezhdunar. uchastiem* [Gold of Siberia and the Far East: geology, geochemistry, technology, economics, ecology. Proc. of the 3<sup>rd</sup> All-Russia Symposium with international participation]. Ulan-Ude, Buryatia Research Centre SB RAS Publ., 2004, pp. 233–235. (In Russ.).
17. Chukhrov F.V. *Kolloidy v zemnoy kore* [Colloids in the Earth's crust]. Moscow, AS USSR Publ., 1955. 668 p. (In Russ.).
18. Shilo N.A. [Witwatersrand and mineralisation]. *Tikhookeanskaya geologiy – Russian Journal of Pacific Geology*, 2007, vol. 26, no. 4, pp. 101–111. (In Russ.).
19. Shilo N.A. *Uchenie o rosspyakh: teoriya rosspeobrazuyushchikh rudnykh formatsiy i rossypey* [The study of placers: the theory of placer-forming ore formations and placers]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. 576 p. (In Russ.).
20. Shcheglov A.D. *O metallogenii Yuzhno-Afrikanskoy Respubliki, genezise zolotorudnykh mestorozhdeniy Vitvatersranda i probleme otkrytiya ikh analogov v Rossii* [Metallogeny of the Republic of South Africa, genesis of gold-ore deposits of Witwatersrand, and the possible discovery of their analogues in Russia]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1994. 43 p. (In Russ.).
21. Bezgubov A.I., Byvshikh Yu.I., Dementyev P.K., et al. *Uran v drevnikh konglomeratakh* [Uranium in ancient conglomerates]. Moscow, Gosatomizdat Publ., 1963. 148 p. (In Russ.).
22. Yurgenson G.A. *Tipomorfizm i rudonosnost' zhil'nogo kvartsa* [Typomorphism and ore content of quartz veins]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 149 p. (In Russ.).
23. Geijer P. The iron ores of the Kiruna type, geographical distribution, geological characters and origin. *Sveriges Geol. Unders.*, 1931, no. 367, pp. 1–39.
24. Gibson R. L., Reimold W. U. Field excursion through the Vredefort impact structure. *62nd Meeting of the Meteorological Society*. Johannesburg, Africa. 11–16 July, 1999. 88 p.
25. Haggerty S. E. The Loco magnetite lava flow, Chile. *Annu. Rept. Dir. Geophys. lab., Carnegie Inst. Washington D.C.*, 1970, pp. 329–330.
26. Spurr J. E. The ore magmas: a series of essays on ore deposition. New York, McGraw-Hill Book Co. Inc., 1923. 915 p.

© С. С. Долгушин, Г. Н. Черкасов, А. П. Долгушин, 2017