

Посвящается светлой памяти
профессора МГУ Леонида Львовича Перчука

УДК 553.41+553.495 (680)

А.А. Маракушев¹, Л.И. Глазовская², Н.А. Панеях³, С.А. Маракушев⁴

ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ УРАНОВО-ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВИТВАТЕРСРАНД⁵

Обосновывается эндогенная природа месторождения Витватерсранд и совмещение в нем трех рудных формаций — двух сульфидно-кварцевых (нормальной и повышенной щелочности) и одной углеводородной (тухолитовой). Для объяснения концентрации урана и золота в щелочнометаллических кварцевых расплавах выдвинуто новое представление об образовании рудно-кремниевых комплексов $K_3[AuSiO_5]$ и др. Рассмотрено ритмичное взрывное формирование месторождения в архейской депрессии кратона Каапвааль.

Ключевые слова: золотые руды, минералы урана, тухолит, углеводороды, флюидный расплав, жидкостная несмесимость, кратоны, депрессии.

Endogenic nature of Witwatersrand deposits is substantiated and combination of three ore formations, namely two sulfide-quartz (normal and of high alkalinity) and one hydrocarbonic (tucholitic), in it is discussed. New concept on the formation of ore-silicon complexes (e.g., $K_3[AuSiO_5]$) is suggested to explain accumulation of uranium and gold in alkali-metallic quartz melts. Attention is drawn to rhythmic explosive formation of the deposit in the Archean depression of the Kaapvaal craton.

Key words: gold ores, uranium minerals, thucholite, hydrocarbons, fluid melt, liquid immiscibility, cratons, depressions.

Введение. Крупнейшее в мире ураново-золоторудное месторождение Витватерсранд (сокращенно Ранд) в Южной Африке приурочено к архейской депрессии кратона Каапвааль (рис. 1). Его происхождение рассмотрено во многих работах, обзор которых приведен в статье [Сафонов, Прокофьев, 2006]. Месторождение представлено множеством ураново-золоторудных сульфидно-кварцевых горизонтов (рифов) огромной протяженности. По рудно-кварцевому отношению им аналогичны формации золоторудных кварцевых жил, например «четыре тысячи архейских золоторудных жил кратона Зимбабве» [Марфунин, 1987, с. 115–116], смежного с кратоном Каапвааль. Хотя эти объекты различаются по продуктивности, но схожи по архейскому возрасту, приуроченности к депрессиям на древних кратонах и огромному размаху проявления золото-кварцевой формации. Громадная по масштабу концентрация золота в месторождении Витватерсранд связана с длительностью (3100–2700 млн лет) его формирования в ходе развития депрессии (в центральной части) кратона Каапвааль и углеводородной специализацией флюидов. Л.Л. Перчук с сотрудниками [Перчук и др., 2002] исследовали фундамент депрессии (3488–3074 млн лет), который образует в ее центре поднятие Вредефорт, непосредственно

окруженное слоями древнейшего вулканогенно-осадочного заполнения (группа Доминион) совместно с подчиненными ему ураноносными и золоторудными кварцитовыми рифами Доминион (3074 млн лет).

Проблема происхождения поднятия Вредефорт дискуссионна. Обнаружение в нем инъекций стекловатых пород, содержащих коэзит и стишовит, привело некоторых исследователей к представлению об импактном (мгновенном) образовании структуры, обусловленном падением метеорита, несмотря на отсутствие в депрессии метеоритного вещества. Детальный физико-химический анализ парагенезисов минералов гранитогнейсовых пород позволил Л.Л. Перчуку установить многостадийность и длительность воздымания купола Вредефорт, которое завершилось взрывом большой мощности (2023 млн л.н.). На основе полученных им данных отвергнуты представления исследователей, «замороженных теоретическими оценками, согласно которым ядро купола поднялось почти на 10 км за несколько десятков секунд» [Перчук и др., 2002, с. 480].

В статье представлены результаты исследования рудоносных рифов Витватерсранда, приуроченных к этой депрессии (рис. 1), которая начиная с 3074 млн лет заполнялась в основном осадочными породами,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, профессор, академик РАН, докт. геол.-минер. н.; e-mail: belova@iem.ac.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н., e-mail: glazov@geol.msu.ru

³ Институт экспериментальной минералогии РАН, ст. науч. с., e-mail: napaneyah@yandex.ru

⁴ Институт проблем химической физики РАН, ст. науч. с. докт. биол. н., e-mail: shukaram@yandex.ru

⁵ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-5877.2012.5.

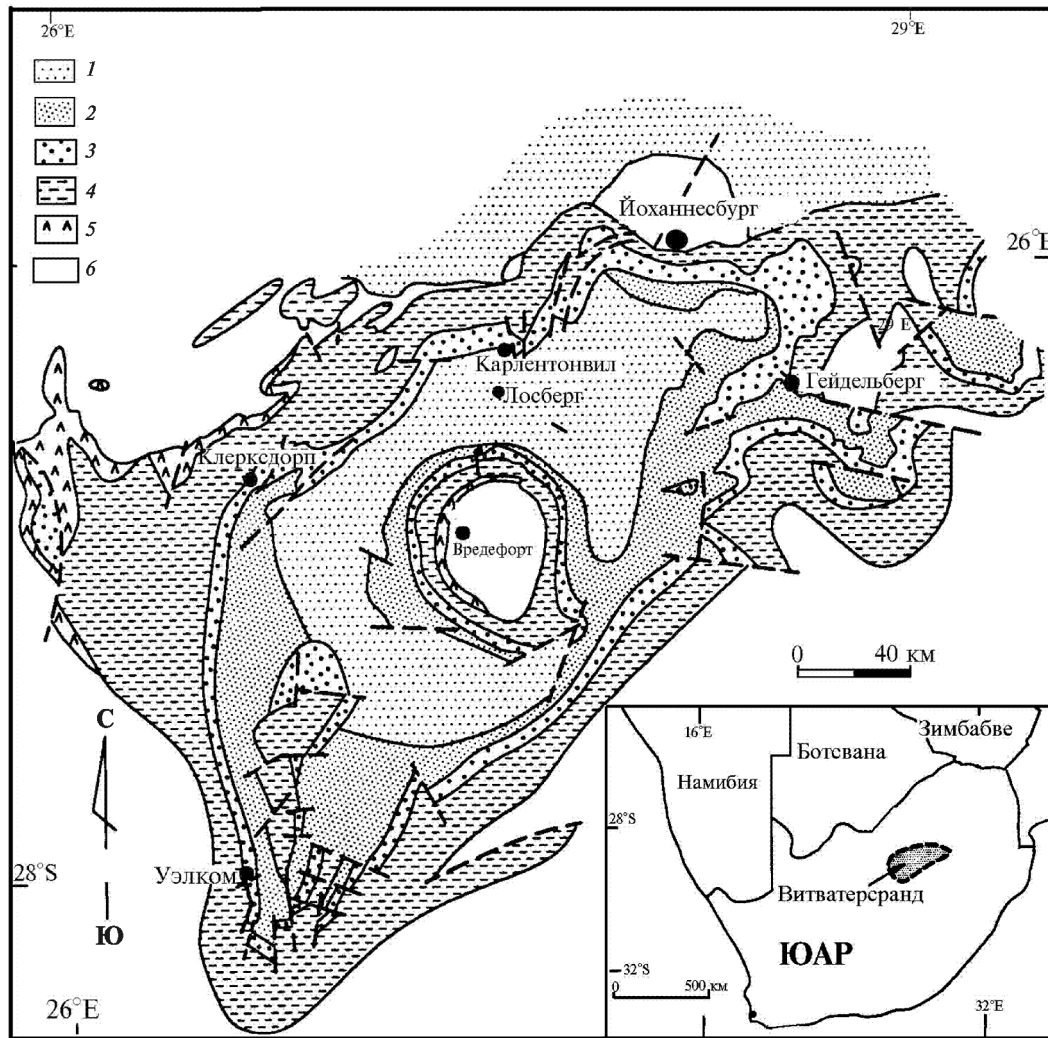


Рис. 1. Схема геологического строения депрессии Витватерсранд [Gibson, Reimold, 1999]. Вулкано-осадочные формации (в скобках — средний возраст, млн лет): 1 — Трансвааль (2025), 2 — Вентерсдорп (2709), 3–4 — верхний и нижний Витватерсранд соответственно (2914), 5 — Доминион (3074), 6 — фундамент (3120). Циркумсинклинальное строение депрессии определяется центральным поднятием Вредефорт

разделенными на ритмы, фиксируемые горизонтами распространения золотых кварцево-сульфидных руд (рифов), особенно в верхней половине формации Витватерсранд. Согласно перекрывающая ее формация Вентерсдорп (2709 млн лет) — безрудная. За ее формированием следовала складчатость, обрамляющая поднятие Вредефорт, окруженное глубокой синклинальной структурой с множеством мелких дислокаций. В кольцевой складчатости, обрамляющей поднятие Вредефорт, можно проследить проявление так называемой центробежной тектоники [Baundemont, Fedorovich, 1996], которая определяется растягивающими усилиями, порождаемыми формированием центральных поднятий эндогенных взрывных кольцевых структур. Затем последовали воздымание структуры и эрозия, завершившие развитие архейской рудоносной депрессии северо-восточного простирания. В протерозое на нее наложилась меридиональная депрессия, отложения которой, представленные формацией Трансвааль (2025 млн лет), отчасти пере-

крыли дислоцированные эродированные рудоносные отложения архейской депрессии.

Гнейсы Вредефорта прорваны стекловатыми породами (псевдотахилитами), в которых, как отмечено выше, были найдены коэсит и стишовит. Еще раньше эти минералы обнаружены в кварцитах формации Витватерсранд, что свидетельствует об участии взрывов высокой энергии в процессе формирования депрессионной структуры в целом. К взрывным признакам относятся и мельчайшие (<1 кар.) зеленоватые зерна алмаза, систематически входящего в состав золоторудных кварцевых рифов Витватерсранда. Это ставит рудоносную депрессию в один ряд с алмазоносными эндогенными взрывными кольцевыми структурами [Маракушев, Панях, 2011]. Стекловатые алмазоносные породы в них (зювит, тагамит) выбрасываются взрывом на большую высоту и распространяются на огромную площадь. Мы полагаем, что взрывы высокого энергетического уровня аналогично обеспечили наблюдаемое ритмично повто-

ряющееся распространение алмазосодержащих рифов в депрессии Витватерсранд на огромную площадь в сотни квадратных километров. Рифы характеризуются идеальной выдержанностью строения и состава.

Чтобы выяснить их генезис, мы исследовали образцы руды под электронным микроскопом и на микрозонде⁶, а также проводили физико-химический анализ парагенезисов золота с сульфурофильными металлами, ураном и редкими землями. Особое внимание уделялось углеводородам, образующим соединения с уранинитом (тухолит), с которыми на месторождении связана самая высокая концентрация золота и урана.

Строение ураново-золоторудных рифов и их сульфидно-кварцевые руды. Монолитные рифы в приповерхностных условиях залегают в относительно рыхлых осадочных породах и образуют гряды, напоминающие скальные обрамления (риффы) береговых окраин морей и океанов. В составе ураново-золоторудных рифов преобладает кварц (зернистый и монокристалльный), в подчиненном количестве присутствуют сульфиды и углеродные фазы, из последних наиболее известен тухолит. Тухолит (thucholite) — это «смесь органических веществ (углеводородов) и уранинита с примесью небольшого количества сульфидов» [Толковый словарь..., 1979, с. 327]. Тухолит обладает очень высоким химическим сродством к золоту, концентрирующемуся в нем совместно с ураном, по-видимому, в виде соединения $AuUO_2$, его углеводородный состав рассматривается в дальнейшем по данным [Mossman et al., 2008].

Характерна довольно единообразная расслоенность рифов: базальный (нижний) слой кварцита сложен безрудным зернистым кварцем, выше залегает слой сульфидно-кварцевой руды, перекрытой верхним кварцитовым слоем. Рудное тело состоит из каплевидных выделений кварца в кварцево-сульфидной матрице. Каплевидные выделения кварца наблюдаются и во вмещающих кварцитах, придавая им реликтовую каплевидную текстуру. В руде и в кварцитах тухолит (а также углеродистое вещество) может содержаться как в рассеянном состоянии, так и в виде линзочек и прослоев. Крупные и выдержанные ураново-золоторудные тухолитовые прослои с характерной для них столбчатой структурой наблюдаются в рифах на границе между базальным кварцитом и сульфидно-кварцевой рудой (рис. 2). Они отличаются повышенной продуктивностью.

Строение рифов существенно осложняется наложенными деформациями, развивающимися в общем субсогласно с их расслоенностью. Под воздействием деформаций рифы приобретают сланцеватое сложение, образование которого сопровождается дроблением кварцевых обособлений и минералов матрицы, переотложением кварца и пирита, образующих про-

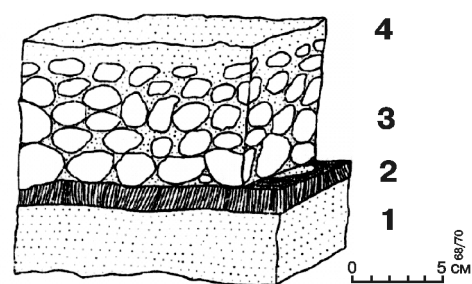


Рис. 2. Блок-диаграмма, иллюстрирующая строение рифа, богатого золотом и ураном, и содержащего прослой тухолита со столбчатой структурой, по [Schidlowski, 1970, 1981]: 1 — кварцит, 2 — тухолит, 3 — сульфидно-кварцевая руда, 4 — кварцит. Внизу фото образца столбчатого тухолита [Hallbauer et al., 1981]

жилковые, гнездовые скопления и чередующиеся полосы, вытянутые вдоль сланцеватости. При этих трансформациях породы приобретают брекчиевый характер, кварцево-пиритовая матрица становится цементом обломков кварца, проникая в них в виде прожилков. Перемещению и перемешиванию материала в рифах способствует также взрывной характер рудообразования. Сланцеватое сложение рифов усиливается с повышением в них содержания серицита и хлорита с фукситом с образованием так называемых зеленых рифов. В метаморфические преобразования рифов активно вовлекается и углеводородное вещество, образующее субсогласные и секущие прожилки в сульфидно-кварцевых рудах и подстилающих их кварцитах [Сафонов, Прокофьев, 2006, с. 1481].

В соответствии с приведенным описанием строения рифов рассмотрим руды двух генетических линий формирования — сульфидно-кварцевой и углеводородной (тухолитовой).

Сульфидно-кварцевая руда на 70–80% состоит из каплевидных выделений кварца в кварцево-сульфидной матрице, в которой в свою очередь обособляются небольшие капельки пирита (реже пирротина). Эта характерная текстура жидкостной

⁶ Анализы выполнены в лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ с использованием растрового электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV» с энергодисперсионной приставкой «INCA_ENERGY-350». Ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока 15 нА.

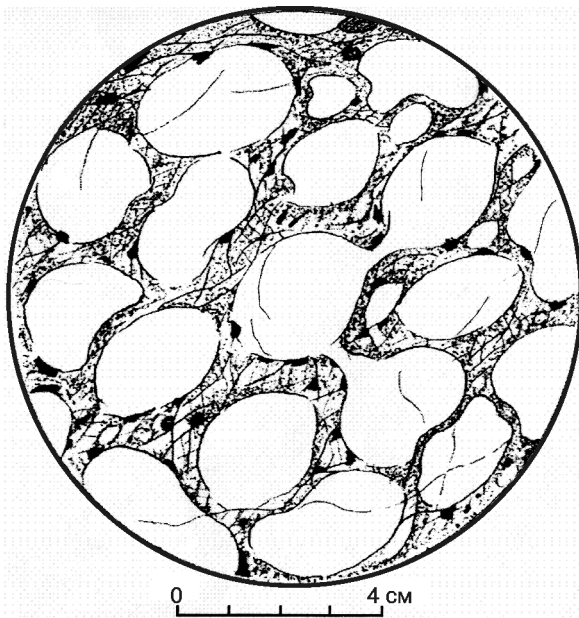


Рис. 3. Схематическая зарисовка шлифа ураново-золотой сульфидно-кварцевой руды [Царев, 2002, с. 254], разделяющейся на крупные капли кварца и мелкие капли сульфидов (черное) в кварцево-сульфидной матрице. Выражены взаимное облекание, гантелеобразная форма кварцевых капель и их связанность перемычками

несмесимости хорошо видна на рис. 3, представляющем зарисовку шлифа, опубликованную Д.И. Царевым [Царев, 2002], который изучил руды Ранда в коллекциях музеев Москвы, Санкт-Петербурга, Улан-Удэ. Он трактует эту текстуру как результат действия кварцевого метасоматизма, наложенного на золотоносные конгломераты. Однако в этой текстуре отчетливо видны признаки жидкостного разделения первично однородного расплава на кварцевые капли и сульфидно-кварцевую матрицу с небольшими каплями пирита (черные овальные выделения). Текстура хорошо выражена морфологически, что проявляется во взаимном облекании кварцевых капель, их слиянии в виде гантелеобразных форм и кварцевых перемычек, связывающих капли. Эта взаимосвязанность капель однозначно свидетельствует о том, что они образовались на месте, непосредственно вслед за расслоением однородного сульфидно-кварцевого расплава.

Кроме монокристалльных капель, представленных на рис. 3, в рудах Ранда содержатся зернистые кварцевые капли и их зональные типы (зернистые во внутренней части и монокристалльные в краевых частях). Капельвидные выделения пирита в матрице местами вдаются в кварцевые капли, что отражает их практически одновременное выделение до затвердевания кварцевых капель. Кварц в каплях обычно чистый, не содержит включений других минералов, что сближает его с кварцем нижних кварцитов. В матрице кварц чаще преобладает над пиритом, хотя описаны случаи локального преобладания пирита, образующего скопления овальных и круглых выделений, представленных на рис. 4 [Парк, Мак-Дормид, 1966]. В руде на

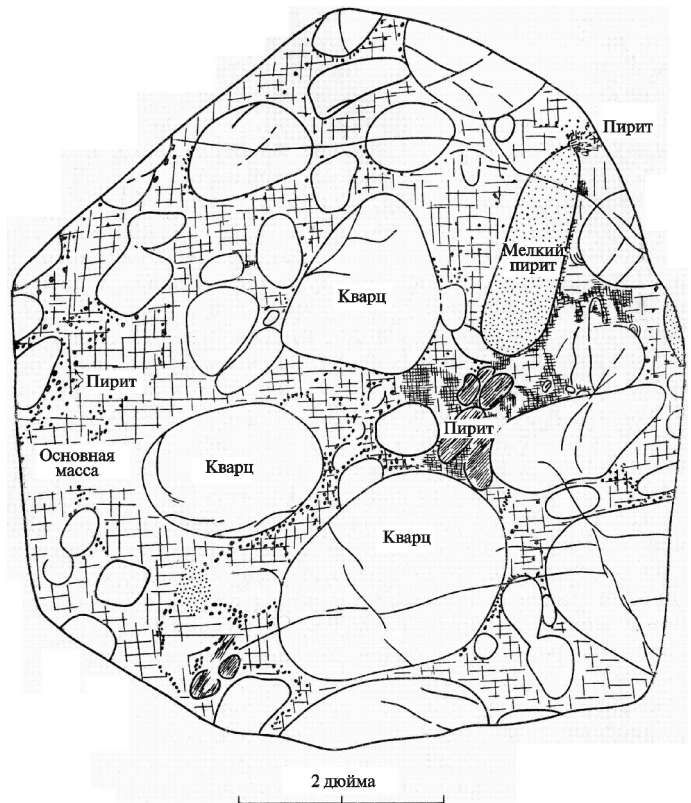


Рис. 4. Сульфидно-кварцевая руда рифа Вентерсдорп Контакт, по [Парк, Мак-Дормид, 1966]

зарисовке виден удлиненный сульфидно-кварцевый блок (обозначен как «мелкий пирит»), который, судя по его однородности, можно рассматривать в качестве фрагмента руды, консолидировавшейся непосредственно из первичного рудного расплава, еще не испытавшего обычное расщепление на кварцевые капли и рудную матрицу.

Кварц, кроме того, образует линзы, прослойки, неправильные выделения кварцитов и жилы неправильной формы, обычно не выходящие за пределы рифов. В процессе слияния капель происходит вытеснение кварц-пиритовой матрицы руд, которая сохраняется в кварцитах только в тонких интерстициях между каплями, фиксирующими их бывшее капельное сложение (рис. 5). На микрофотографии (рис. 5) хорошо видна интерстиционная текстура, свойственная сульфидно-кварцевым рудам, а также ее реликты, сохраняющиеся на переходе от этих руд к кварцитам.

При отделении кварцевых капель рассеянные в первичных расплавах рудные металлы концентрируются, образуя совместно с преобладающим пиритом «более 70 минеральных видов» [Марфуни, 1987, с. 100]. Даже далеко не полный анализ парагенезисов этих минералов убеждает в комплексном характере руд, которые сложены рудными минералами, свойственными как нормальному, так и щелочному магматизму. Геохимически это прослеживается по слагающим руды металлам, которые на диаграмме (рис. 6) разделяются на металлы нормальной и повышенной щелочности (табл. 1). Это разделение сделано

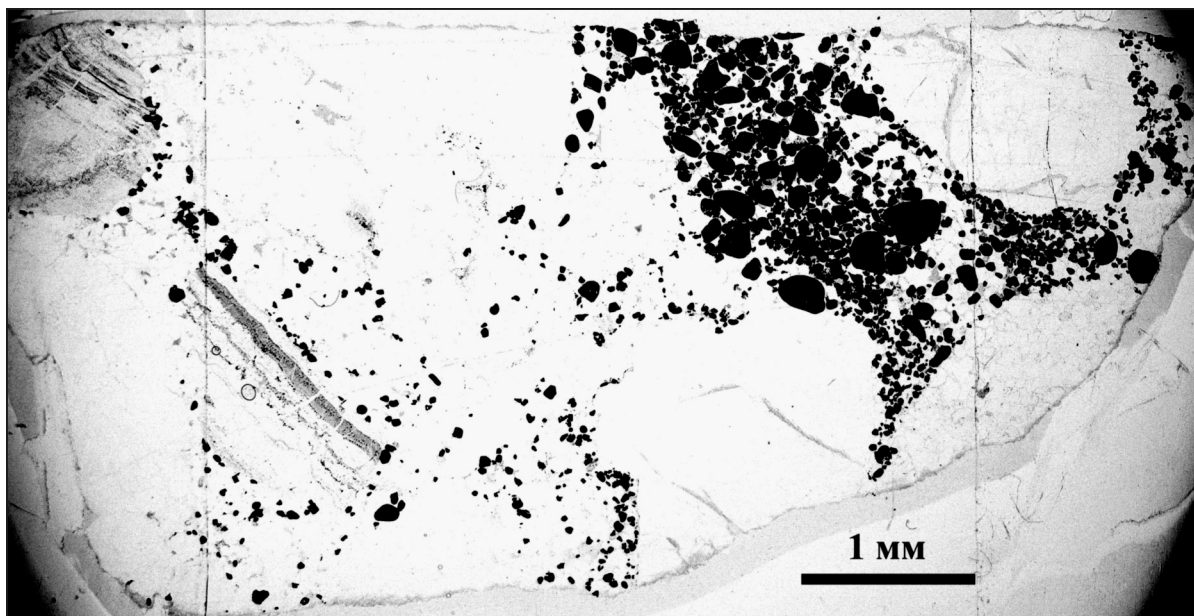


Рис. 5. Кварцит, образовавшийся при слиянии кварцевых капель; в некоторых местах сохранились интерстиционная текстура кварц-сульфидной руды и ее реликты

Таблица 1

Систематика химических элементов на основе их атомных орбитальных радиусов

Нечетные элементы								Четные элементы							
Щелочность ↑	3	11	19	37	55	87	Щелочные металлы	Щелочность ↑	4	12	20	38	56	88	Щелочноземельные металлы
	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr	Be		Mg	Ca	Sr	Ba	Ra		
					57 La	89 Ac	Лантаниды и актиноиды						58 Ce	90 Th	Цериды и ториды
					59 Pr	91 Pa							60 Nd	92 U	
					61 Pm	93 Np							62 Sm	94 Pu	
					63 Eu	95 Am							64 Gd	96 Cm	
					65 Tb	97 Bk							66 Dy	98 Cf	
					67 Ho	99 Es							68 Er	100 Fm	
					69 Tm	101 Md							70 Yb	102 No	
			21 Sc	39 Y	71 Lu	103 Lr	Переходные металлы				22 Ti	40 Zr	72 Hf	104 Rf	Переходные металлы
		23 V	41 Nb	73 Ta	105 Db				24 Cr	42 Mo	74 W	106 Sg			
		25 Mn	43 Tc	75 Re	107 Bh				26 Fe	44 Ru	76 Os	108 Hs			
		27 Co	45 Rh	77 Ir	109 Mt				28 Ni	46 Pd	78 Pt	110			
		29 Cu	47 Ag	79 Au	111				30 Zn	48 Cd	80 Hg	112			
	5 B	13 Al	31 Ga	49 In	81 Tl	Кислотные металлы и неметаллы		6 C	14 Si	32 Ge	50 Sn	82 Pb	114	Кислотные металлы и неметаллы	
	7 N	15 P	33 As	51 Sb	83 Bi			8 O	16 S	34 Se	52 Te	84 Po	116		
1 H	9 F	17 Cl	35 Br	53 I	85 At			2 He	10 Ne	18 Ar	36 Kr	54 Xe	86 Rn		118
	I	II	III	IV	V	VI	Периоды		I	II	III	IV	V	VI	Периоды

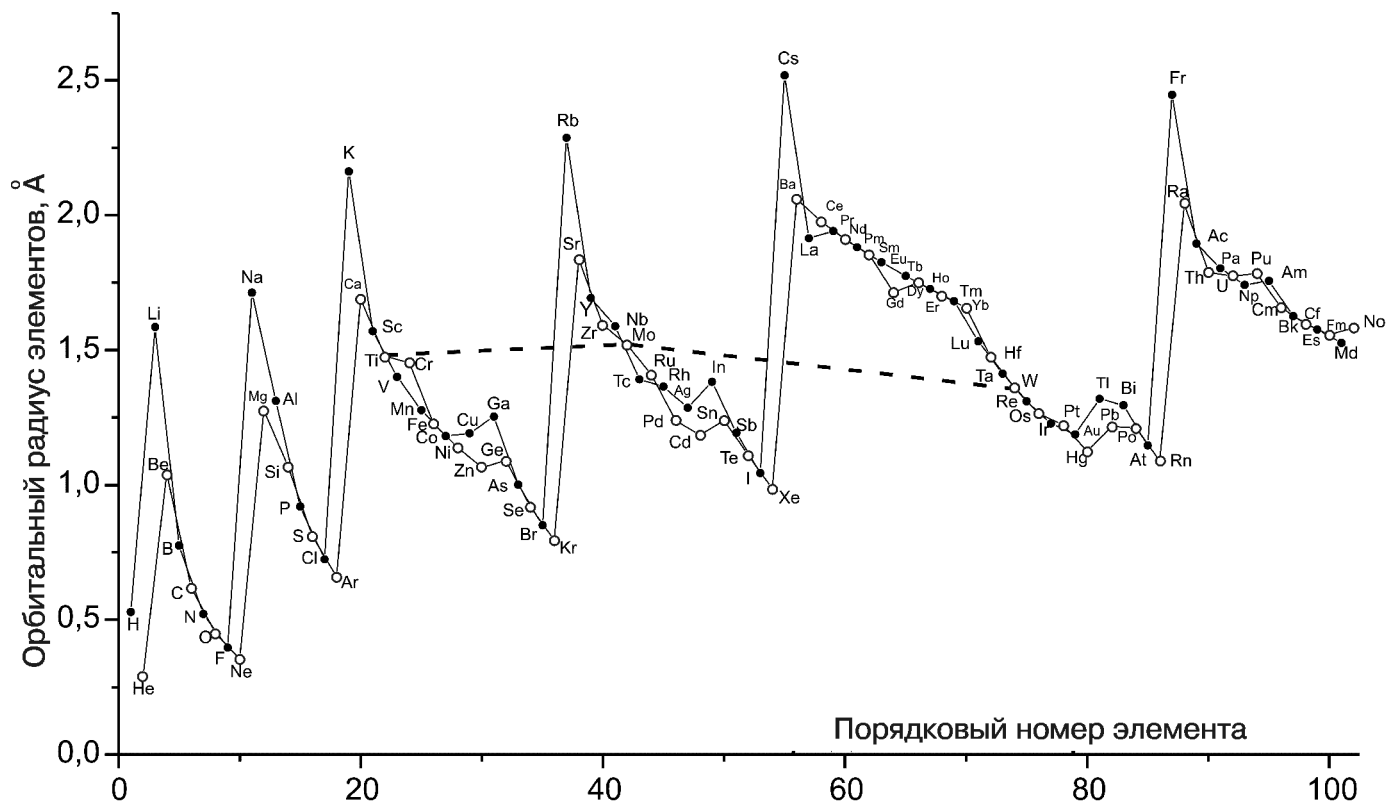


Рис. 6. Диаграмма значений атомного орбитального радиуса химических элементов — четные (черные кружки) и нечетные (белые кружки). Штриховая линия Ti–Mo–W показывает разделение рудных металлов на группы, свойственные нормальному (ниже линии) и щелочному (выше линии) магматизму

по величинам их атомных орбитальных радиусов, в каждом периоде уменьшающихся с нарастанием кислотных свойств металлов. Сопоставлять металлы по этому признаку можно только при их одинаковой валентности. Например, согласно диаграмме (рис. 6), уран — более основной металл по сравнению с золотом, соответственно кислота HAuO_2 более сильная по сравнению с HUrO_2 . В восстановительных условиях золото переходит в одновалентное состояние и теряет кислотные свойства. Это стабилизирует соединение AuUO_2 , определяющее парагенезис золота с ураном.

Пирит в матрице между кварцевыми каплями повсеместно доминирует над всеми другими сульфидными минералами. В генетическом плане наиболее интересны сфероидальные (каплевидные) обособления пирита — пиритовая дробь, обычно более крупная, чем его кристаллы. Сфероидальные выделения пирита исследованы в работах [Шило, Сахарова, 1986; Шило, 2007], показана ошибочность представлений некоторых исследователей об их терригенном (россыпном) происхождении, так как сфероидальный пирит никогда не наблюдается в россыпях. Каплевидные выделения и мелкие кубические зерна пирита сочетаются в матрице с множеством других минералов, кристаллы которых также не имеют признаков окатанности. На зернах пирита может отлагаться золото 910-й пробы (Au 84,3, Ag 15,7) в виде образований причудливой конфигурации (рис. 7).

Золото в сульфидно-кварцевых рудах входит в ассоциацию не только с пиритом, но и со множеством других минералов — сфалеритом, халькопиритом, молибденитом, кобальтином, глаукодом, герсдорфитом, бравоитом и др. Оно очень богато элементами-примесями — индикаторами источников флюидов как ультрабазитовой, так и гранитной серий [Сафонов, Прокофьев, 2006, с. 498]. Между тем на месторождении и в его окрестностях совершенно отсутствуют какие-либо признаки ультрабазитов и гранитов, в том числе и в самих рудах, которые ряд исследователей считают метаморфизованными золотоносными конгломератами, хотя сфероидальные выделения в них представлены исключительно кварцем. В дальнейшем мы объясним этот парадокс, это касается и нахождения золота в столбчатом тухолите (рис. 2), в котором его концентрация достигает особенно высоких значений [Hallbauer et al., 1981; Школьник и др., 2005].

Пиритовые капли в матрице обычно крупнее кристаллов, но их размер варьирует и при уменьшении иногда становится сопоставим с размером кристаллов пирита. Каплевидные формы присущи не только пириту, но и пирротину. На рис. 8 показана кристаллизация пирротина в виде удлиненных кристаллов с краев капли: пирротиновая капля облекается каплей пирита (с примесью галенита), что отражает более позднее застывание пирита по сравнению с более тугоплавкой каплей пирротина. Слияние капель пирита выражено

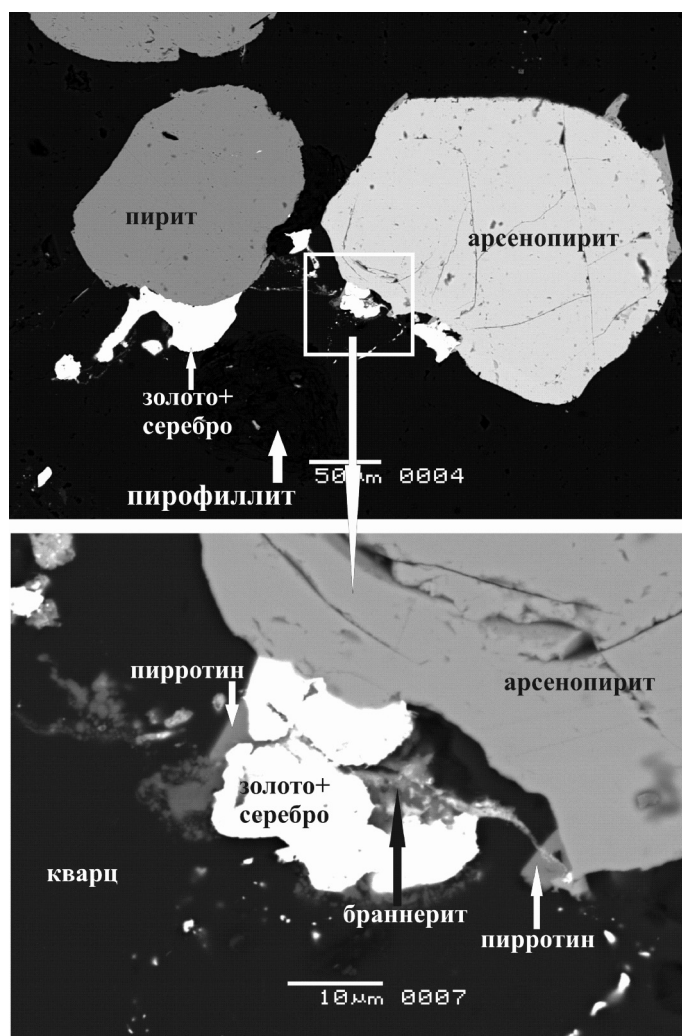


Рис. 7. Причудливые формы выделения золота (910-я проба) на зернах пирита и арсенопирита в ассоциации с браннеритом и уранинитом

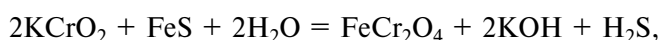
не так отчетливо, как слияние кварцевых капель, но, по-видимому, с этим процессом связано присутствие в рудах выделений и прожилков пирита сложной конфигурации, не выходящих за пределы сульфидно-кварцевых прослоев рифов. Так, в рифе Вааль описан прожилок пирита мощностью 1,5 см с тупым выклиниванием, протяженность которого по простиранию и падению составляет около 10 см [Сафонов, Прокофьев 2006, с. 488]. Длительность формирования пиритовых капель фиксируется структурами захвата ими многих минералов, например, описано включение зерна золота в пирите [там же, с. 289].

Строение рудных пластов осложняется также переходом их капельного кварцево-сульфидного строения в слоистое, нередко ритмичное, характерное для верхних кварцитов.

В рудных рифах спорадически отмечаются ортоклаз и биотит, что подчеркивает их генетическую связь с кислыми дифференциатами материнских магматических очагов. Ниже будет обоснована вероятная природа этой связи.

Генетическое значение платиновой и хромовой минерализации. На наличие в рудах Витватерсранда платиновых минералов, состоящих из рутения, осмия, иридия, платины, обратил внимание еще П.А. Вагнер [Вагнер, 1932]. Он связал это со спецификой глубинного магматического очага, материнского по отношению к месторождению, и полагал его аналогичным Бушвельду — платиноносному плутону, который в апикальной части сложен красными гранитами с оловянными месторождениями кварцево-рудной формации. Об этом же свидетельствует и нахождение в рудах хромита и хромистой шпинели (табл. 2, рис. 9), которые в расслоенных интрузивах входят в ассоциацию с платиновыми металлами.

Крайне высокое содержание железа при ничтожной концентрации магния исключает представление о хромитах Ранда как о терригенных (россыпных) минералах, генетически связанных с разрушением хромитоносных гипербазитов. Это специфические, крайне железистые хромиты, связанные с накоплением хрома в щелочнометалльных сульфидно-кварцевых расплавах в виде щелочного комплекса $KCrO_2$. В результате образуется хромит, отчасти вытесняющий моносulfиды железа по реакции типа



чем объясняется крайне железистый состав хромитов, отличающий их от типичных хромитов гипербазитовых комплексов. Хромит в сульфидно-кварцевых рудах относится к раннему поколению минералов, об этом можно судить по захвату его зерен каплями пирита, примеры чего приводятся в работе [Сафонов, Прокофьев, 2006, с. 496–497].

Глубинный магматизм, сопряженный с формированием депрессии Витватерсранд, фиксируется проявлениями в ней вулканизма. В начале развития депрессии вулканизм был представлен бимодальной лавой Кроун, состоящей из базальтов и кислых вулка-

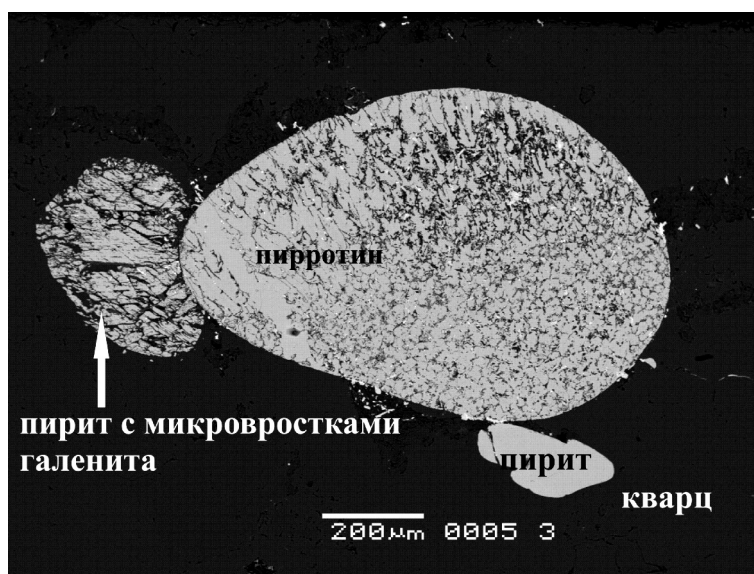


Рис. 8. Округлая капля пирротина, захваченная с краю галенит-пиритовой каплей. На фото видна последовательность выделения капель

Таблица 2

Состав хромита и хромшпинели на месторождении Витватерсранд, мас.%

Состав	Номер пробы					
	1	2	3	4	5	6
TiO ₂	0,00	0,17	0,95	0,90	1,48	0,09
Al ₂ O ₃	21,16	9,09	10,72	10,92	17,90	21,96
Cr ₂ O ₃	41,37	54,23	50,08	46,87	38,70	50,02
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	32,74	27,24	30,94	35,92	37,89	11,06
MnO	1,11	1,03	0,56	1,34	0,49	0,38
MgO	2,50	5,56	5,630	1,48	1,56	16,32
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19
ZnO	0,75	1,04	0,46	0,58	0,81	0,32
Стехиометрическая формула хромшпинели в расчете на 4 атома кислорода						
Ti	0,000	0,004	0,024	0,024	0,038	0,002
Al	0,829	0,372	0,429	0,456	0,718	0,778
Cr	1,087	1,488	1,346	1,314	1,041	1,189
Fe ³⁺	0,084	0,135	0,192	0,198	0,191	0,031
Fe ²⁺	0,826	0,656	0,687	0,866	0,887	0,247
Mn	0,031	0,030	0,016	0,040	0,014	0,010
Mg	0,124	0,288	0,285	0,078	0,079	0,731
Ca	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005
Zn	0,018	0,027	0,012	0,015	0,020	0,007
Некоторые отношения элементов						
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ + Mg)	0,870	0,695	0,707	0,917	0,918	0,253
Fe ³⁺ /Fe(сум)	0,092	0,171	0,219	0,186	0,177	0,110
Cr*	54,36	74,43	67,57	65,94	52,36	59,46
Al**	41,45	18,60	21,56	22,90	36,12	38,91
Fe ³⁺ + Ti	4,18	6,97	10,87	11,16	11,52	1,63
Fe ^{3+***}	4,18	6,75	9,66	9,95	9,61	1,53
Ti****	0,00	0,22	1,22	1,20	1,90	0,10

* Cr = 100Cr/(Cr + Al + Fe³⁺ + Ti), %;

** Al = 100Al/(Cr + Al + Fe³⁺ + Ti), %;

*** Fe³⁺ = 100Fe³⁺/(Cr + Al + Fe³⁺ + Ti), %;

**** Ti = 100Ti/(Cr + Al + Fe³⁺ + Ti), %.

нических пород с возрастом около 3 млрд лет (группа Доминион). В дальнейшем на всем протяжении развития формации Витватерсранд кислые дифференциаты отсутствовали, а ритмы ее осадочного заполнения разделены не кислыми вулканическими породами, а рудными кварцевыми горизонтами. Связь их с магматизмом наглядно выражена на месторождении Вентерсдорп Контакт, представленном мощным пластом (рифом) кварцевой уран-золотой руды, непосредственно перекрытым андезитобазальтовой лавой [там же, с. 483]. Эта вулканическая ассоциация кварцевого рифа с андезитами и базальтами возникла в результате эволюции глубинного, контрастно расслоенного магматического очага, о чем можно судить

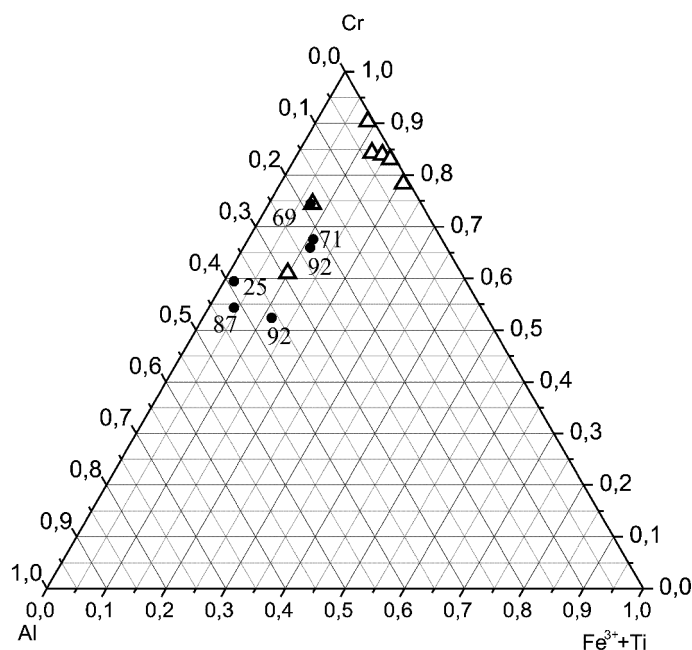


Рис. 9. Диаграмма состава хромитов кварц-сульфидных руд месторождения Витватерсранд с указанием их железистости ($100\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}$) (черные кружки) в сопоставлении с хромитами сульфидных руд (треугольники) месторождения Истерн Голдфилд, связанных с метаморфизованными вулканитами Западной Австралии, по [Groves et al., 1977]

по содержанию и ассоциации платиновых металлов сульфидно-кварцевых руд Ранда (мас.%): Os 40, Ir 30, Ru 15, Pt 14, Rh 1. Отсутствие в их составе палладия и низкое содержание платины отражают специфику глубинного очага, в котором была незначительно развита базитовая зона, отвечающая в расслоенных интрузивах палладиевой специализации.

Рудоносность расслоенных интрузивов характеризуется металлогеническими горизонтами, расположенными на разной глубине. Наиболее глубинный хромитоносный горизонт с осмий-рутениевой специализацией, который отвечает гипербазитовому хромитоносному основанию интрузивов. Выше, на переходе к базитовой зоне, находятся горизонты концентрации хрома, палладия и платины, а также меди и никеля (в сульфидных рудах). Богатые железом, титаном, ванадием дифференциаты залегают существенно выше, непосредственно под апикальными гранитами. Они были подвержены флюидной сульфуризации с образованием дисульфидных — медных, цинковых, свинцовых расплавов. С гранитами расслоенных интрузивов связаны месторождения кварцево-рудной формации [Маракушев и др., 2008], к которой относятся и сульфидно-кварцевые руды Ранда. Тем не менее в месторождениях прослеживается минерализация всех перечисленных металлогенических горизонтов расслоенных интрузивов, в том числе и самых глубинных, представленных хромитом и тяжелыми металлами платиновой группы — осмием и иридием.

Из этого следует, что вещественный состав пирит-кварцевых золотых руд Ранда и их материнско-

Таблица 3

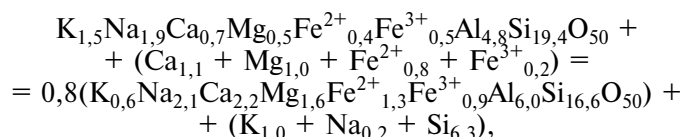
Состав некоторых сульфидов месторождения Витватерсранд, ат.%

Название минерала	Fe	Cu	Co	As	Ni	Zn	S	Эмпирическая формула
Пирит	33,42						66,58	FeS ₂
Пирит	32,91		0,2		0,62		66,27	Fe _{0,98} Ni _{0,02} S ₂
Пирротин	46,78		0,2		0,48		52,55	Fe _{0,89} Ni _{0,01} S
Халькопирит	25,88	23,98					50,13	Cu _{0,96} Fe _{1,03} S ₂
Халькопирит	25,26	24,22	0,14	31,5			50,38	Cu _{0,96} Fe _{1,0} Co _{0,01} S ₂
Сфалерит	1,87					47,96	50,03	Zn _{0,96} Fe _{0,04} S
Арсенопирит	33,55			31,72			34,72	Fe _{0,96} As _{0,91} S
Арсенопирит	33,54		0,22				34,74	Fe _{0,97} As _{0,91} Co _{0,01} S
Глауколот*	3,75		18,75	32,96	11,63		32,91	Co _{0,57} As _{1,0} Ni _{0,35} Fe _{0,11} S
Кобальтин*	3,59		20,79	32,92	9,21		33,5	Co _{0,62} As _{0,98} Ni _{0,2} Fe _{0,11} S
Кобальтин*	2,94		26,73	32,96	4,15		33,22	Co _{0,8} As _{0,98} Ni _{0,13} Fe _{0,09} S
Кобальтин	0,92		30,06	32,97	2,79		33,26	Co _{0,9} As _{0,99} Ni _{0,08} Fe _{0,03} S

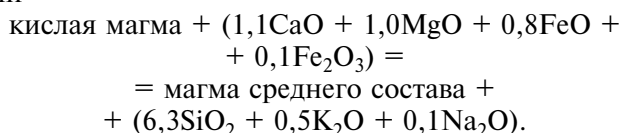
* Повышенное содержание Ni в глаукодите и кобальтине, возможно, объясняется наличием микровключений раммельсбергита (NiAs₂) или вазита (NiS₂).

го расслоенного очага формировался под воздействием трансмагматических флюидов, способных осуществлять восходящую миграцию рудных металлов. Наряду с рудными металлами в этот процесс вовлекались и петрогенные основные компоненты (CaO, MgO, FeO и др.), радикально влиявшие на эволюцию кислой магмы в апикальных частях расслоенного глубинного материнского магматического очага. Благодаря высокой основности приносимые в гранитную магму компоненты выступали в роли геохимических факторов ее антидромного развития, определившего образование флюидного щелочнометалльного кварцевого расплава по реакции, в которой уравнен алюминий (рис. 10): гранитная магма + диоритовая магма + (SiO₂ + K₂O + Na₂O). Этот щелочнометалльный расплав эффективно концентрировал из трансмагматических флюидов рудные металлы с повышенной кислотностью (рис. 6), в том числе золото, в силу образования его щелочных комплексов (KAuO₂ и др.), входящих в устойчивую ассоциацию с соединениями типа K₂SiO₃. Поэтому и происходило вытеснение кислых дифференциатов рудоносными кварцевыми расплавами из апикальной части магматического очага.

Приведем реакцию образования щелочнометалльного кварцевого расплава исходя из средних составов гранита и диорита в числах атомов, рассчитанных на 50 атомов кислорода, нормированных по алюминию:

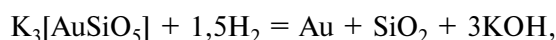


или



Избыточное по отношению к этой реакции приносимое железо подвергалось сульфуризации с приносом халькофильных металлов (табл. 3) и созданием пиритовой специализации кварцевого расплава. Его щелочнометалльный характер обеспечивал концентрацию в нем золота в силу его кислотных свойств (рис. 6). Щелочнометалльность стимулирует развитие в кварцевых расплавах рудно-кремниевых комплексов, подобных алюмокремниевым комплексам силикатов в соединениях со щелочными металлами K₃[AuSiO₅], K₅[AuSiO₆] и др. Они представляют главные формы концентрации рудных металлов в кварцевых расплавах. Их соединения легко разлагаются при ги-

дротермальном воздействии, создающем миграцию щелочных металлов, входящих в их состав:



Модель концентрации золота щелочнометалльными кварцевыми расплавами представляет, как нам кажется, единственное объяснение образования золотоносных, чисто кварцевых жил, не содержащих сульфидной минерализации.

Кварцево-рудная специализация магматизма не только в данном случае, но и вообще определяется смещенностью реакций рассмотренного типа вправо, что отражает степень вытеснения кислого магматизма среднеосновным магматизмом [Маракушев и др., 2008]. Эти соотношения распространяются и на жильные кварцевые месторождения золота,

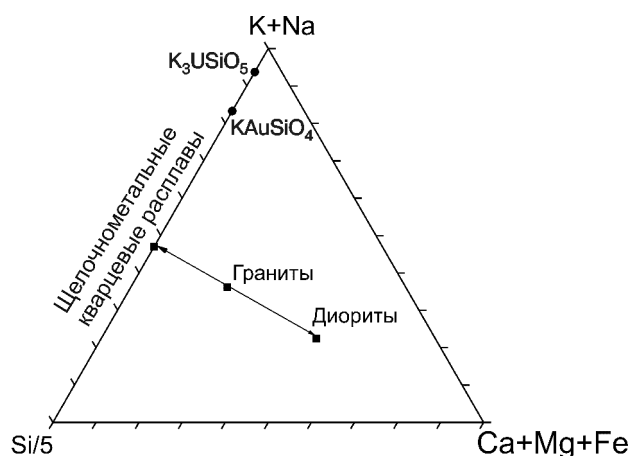


Рис. 10. Схема генерации щелочнометалльного кварцевого расплава в результате антидромного развития магматизма (гранит→диорит)



Рис. 11. Зональный кристалл циркона и его взаимоотношения с интерстицией, сложенной фосфатом редких земель (La, Ce, Nd) и кварцем

материнские граниты которых всегда обнаруживают смещение состава в сторону диоритов. Наиболее золотоносны в гранитоидных комплексах диоритовые, так называемые малые интрузии. Связь золоторудных месторождений с диоритами впервые выявлена для северо-восточной территории России, быстрому освоению которой в 1940–1945 гг. способствовала известная концепция Ю.А. Билибина о догранитных золотоносных диоритовых (дайковых) магмах, развивающихся в единых структурах с гранитами [Онопrienko, 2007, с. 101].

Золоторудные месторождения Ранда отвечают полному смещению рассматриваемой реакции вправо, что и объясняет отсутствие их пространственной связи с кислыми вулканическими породами, полностью вытесненными кварцевыми рифами на всем протяжении геодинамического развития формации Витватерсранд.

Эволюция рифов начиналась с извержения однородных сульфидно-кварцевых расплавов при высокой температуре, с понижением которой в них развивалась жидкостная несмесимость, ведущая к расслоению (рис. 2) и последующему сульфидно-кварцевому разделению, наглядно показанному на рис. 3 и 4. Кристаллизация началась позднее, при дальнейшем существенном понижении температуры и сопровождалась захватом кварцем и другими минералами газоидных включений при температуре 400–350 °C [Сафонов, Прокофьев, 2006, с. 500].

Известно, что температура плавления кварца под водным давлением снижается только до 1100 °C, но в щелочнометалльных сульфидоносных системах, содержащих железо, углерод и серу, возникают кварцевые расплавы с температурой кристаллизации около 550 °C. Экспериментальными исследованиями установлено, что такие кварцевые расплавы (стекла) могут входить в состав метасоматической зональности [Зарайский, 2007].

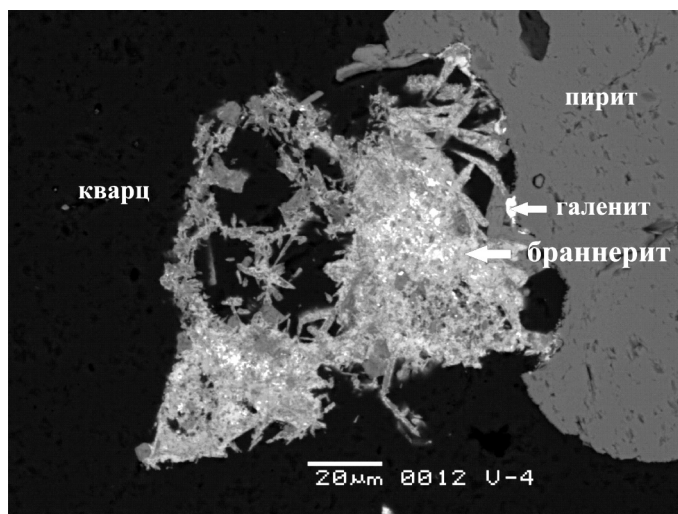


Рис. 12. Замещение сульфидно-кварцевой интерстиции браннеритом между каплями кварца. В браннерите – реликты сульфидов (светлые точки)

Растяжение и углубление депрессии Витватерсранд периодически нарушалось противоположным режимом сжатия и воздымания, который радикально изменял направленность развития магматизма и его металлогеническую специализацию. Первичные водородные флюиды, выносящие рудные металлы из жидкого земного ядра, в режиме растяжения депрессий селективно теряли водород и приобретали кислую специализацию, способствующую развитию магматизма нормальной щелочности и концентрации свойственных ему рудных металлов (рис. 6). Режим сжатия препятствовал потере водорода, давление которого возрастало в каждом цикле и приводило к взрывному выбросу рудных кварцевых расплавов. Увеличение же водородного давления способствовало разложению кислотных компонентов флюидов и приданию им углеводородной специфики ($\text{H}_2\text{CO}_3 + 4\text{H}_2 = 3\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$ и др.), вообще свойственной флюидам щелочного магматизма (щелочной уклон магматизма неизменно сопровождается образованием углеводородных включений в породообразующих минералах).

Углеводородная специфика уран-золотого рудообразования. Щелочной уклон глубинного магматизма Ранда фиксируется по специфике его руд (рис. 6). Показательно в этом отношении, например, нахождение зерен зонального монацита (Ce, La, Nd,...Th) PO_4 и циркона (ZrSiO_4). Наряду с ними развита урановая (браннеритовая и уранинитовая) минерализация, характеризующаяся относительно более поздним проявлением в сульфидно-кварцевых рудах. Она развивается с замещением в основном кварцево-пиритовой матрицы в интерстициях между кварцевыми каплями и наследует интерстиционную текстуру руды (рис. 11–13). Раннее выделение циркона, предшествующее замещению фосфатами редких земель интерстиций между кварцевыми каплями, хорошо выражено на рис. 11. На рис. 12 отчетливо

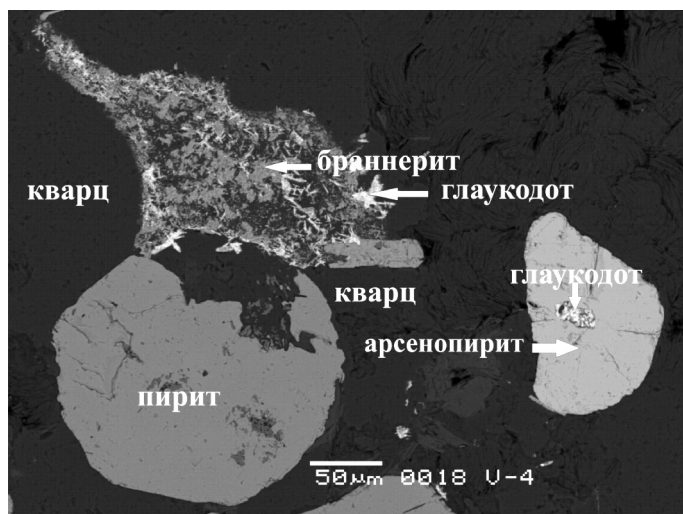


Рис. 13. Интерстиция между каплями кварца сложена кварц-браннеритовым агрегатом (с глауколотом) в контакте с каплей пирита, частично замещенной кварцем с незначительной примесью браннерита

видно замещение кварца браннеритом в основном в интерстициях и незначительно в каплевидных выделениях, в то же время зерно пирита, входящее в состав руды, замещению не подвергалось. На микрофотографии (рис. 13) кварц-браннеритовый агрегат (с глауколотом), заместивший интерстицию между каплями кварца, контактирует с каплей пирита, которая частично замещена почти чистым кварцем с незначительной примесью браннерита, причем только в непосредственном контакте с кварц-браннеритовым агрегатом. На рис. 14 видно замещение углеродистой фазы, содержащей серу, браннеритом (с уранинитом), а также кварц-браннеритовая жилка, секущая пирит. По этим взаимоотношениям фиксируется раннее образование углеродной минерализации.

Позднее развитие урановой минерализации, наложенной на сульфидно-кварцевые руды, нуждается в специальной интерпретации. Возможно, это обусловлено ошелачиванием глубинного магматического очага и созданием в нем урановой, фосфорной и редкоземельной специализации. Однако не исключена возможность и того, что урановый метасоматизм отражает концентрацию урана и сопутствующих ему металлов в тухолитовых флюидных расплавах (рис. 2), сохранявших жидкое состояние после кристаллизации вмещающей их сульфидно-кварцевой руды. В процессе консолидации пластов, ведущей к образованию столбчатого тухолита, происходил частичный флюидный вынос из них урана, определивший наблюдаемое более позднее развитие урановой минерализации, наложенной на сульфидно-кварцевые руды. Тухолитовые прослойки, входившие в общую расслоенность рифов, были главными концентраторами урана в процессе формирования месторождения.

К урану добавляется золото, содержание которого в углеводородной фазе достигает очень высоких значений. Золото и уран образуют таким образом парагенезис углеводородной специфики [Маракушев

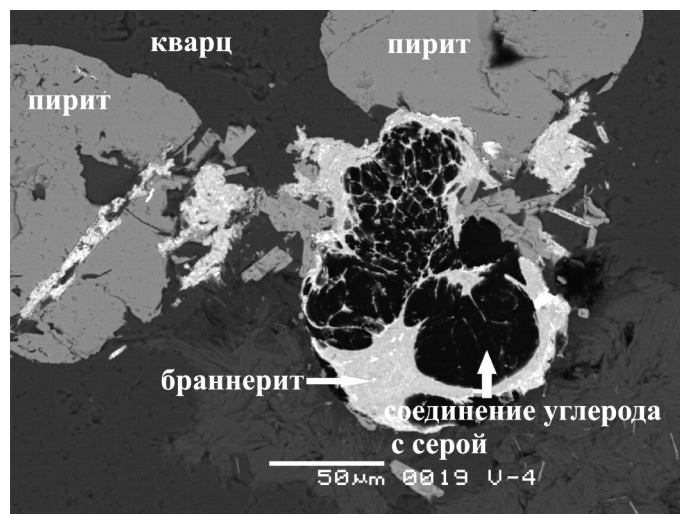


Рис. 14. Углеводородное соединение с серой (черное), замещенное браннеритом, и кварц-браннеритовый прожилок с уранинитом (белое), секущий каплю пирита

и др., 2007, 2008]. С углеводородной фазой ассоциирует примерно 40% золота Витватерсранда [Mossman et al., 2008, p. 173]. Она детально исследована в рифе Вааль в работе [Zumberge et al., 1978]. В состав этой фазы входят следующие типы углеводородов: легкие с атомным преобладанием водорода над углеродом ($C_2H_6-C_4H_{10}$) и ($C_9H_{12}-C_{13}H_{14}$), промежуточные с их одинаковым содержанием ($C_6H_6-C_{12}H_{12}$) и тяжелые с преобладанием углерода над водородом — метилнафталин ($C_{11}H_{10}$), инден (C_9H_8), нафталин ($C_{10}H_8$). В подчиненном количестве присутствуют соединения углеводородов с кислородом (CH_4O , C_2H_4O , C_3H_6O) и серой (C_5H_6S , $C_{10}H_8S$).

Углеводородная фаза — сложное углеводородное вещество в смеси с уранинитом (тухолит), образующее в кварцевых рифах прослойки столбчатого строения (рис. 2), с давних времен его происхождение связывали с развитием цианобактериальных матов. Нам такое представление кажется ошибочным, так как в его практически чисто углеводородном составе отсутствуют азот и фосфор, а кислород содержится в ничтожном количестве. Без этих элементов невозможно даже геохимическая (абиогенная) эволюция органического вещества [Маракушев, Маракушев, 2010], в которой выделяются по крайней мере 6 ступеней развития, предшествующих биохимическому развитию (рис. 15).

Почти чисто углеводородный состав тухолита отвечает самой низкой ступени абиогенного развития (I). Границы между ступенями фиксируются реакциями углеводородов с водой, азотом, цианистой (HCN) и фосфорной (H_3PO_4) кислотами. Вообще происхождение цианобактерий (оксигенный фотосинтез) датируется возрастом около 2,4 млрд лет [Маракушев, 2005; Holland, 2006], тогда как золото-тухолитовые ассоциации Ранда имеют архейский возраст.

Таким образом, тухолитовые прослойки в рифах имеют эндогенную природу, как и сами рифы,

ПРОТОКЛЕТКИ	
VI	$= C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3(ATP) + 3H_2O$
V	$C_{10}H_{13}N_5O_4(A) + 3H_3PO_4 =$ $= C_{10}H_{13}N_5O_4(A) + H_2O$
IV	$\frac{5HCN + C_5H_{10}O_5 =}{= C_5H_{10}O_5(Rib)}$ $\frac{5C + 5H_2O =}{= C_5H_{10}O_4(dRib)}$
III	$\frac{C_5H_2 + 4H_2O =}{= C_3H_7NO_2(Ala)}$ $\frac{2C_4H_2 + (HCN + 2H_2O)}{= C_6H_{14}N_4O_2(Arg) = C_4H_5N_3O(Cyt)}$
II	$C_2H_6 + (3HCN + 2H_2O)C + (3HCN + H_2O) =$ $= CHN = [CHN]_5(Ade)$
I	$\frac{CH + 0,5N_2 = 5CH + 2,5N_2 =}{= CH + H_2O = C + H_2O}$ $\frac{1,5H_2 + CO = H_2 + CO =$

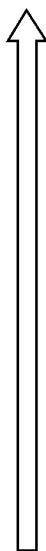


Рис. 15. Ступени геохимической эволюции органического вещества (показана стрелкой), предшествующие его биохимическому развитию (протоклетки): А — аденозин, Ade — аденин, Ala — аланин, Arg — аргинин, ATP — аденозинтрифосфат, Cyt — цитозин, Rib — рибоза, dRib — дезоксирибоза

генетически связанные с углеводородно-флюидным уран-золотым рудообразованием. Прямым доказательством этого служат и газоидные включения в кварце. Их состав варьирует от водно-углекислого до углеводородного. Кварц самых ранних каплевидных выделений содержит водно-углекислые флюидные включения, а в кварце сульфидно-кварцевой матрицы и жил содержатся водно-углекислые, метановые и другие углеводородные флюиды [Сафонов, Прокофьев, 2006, с. 501]. Содержащие нефть (oil bearing) флюидные включения описаны в кварце рифов Вааль и Стейн [Mossman et al., 2008].

Заключение. В металлогеническом отношении к самым интересным геологическим структурам, наиболее богатым рудными месторождениями, относятся срединные массивы и кратоны [Щеглов, 1976; Сидоров, Волков, 2011]. Они представляют собой древнейшие блоки континентальной земной коры, залегающие в окружении более молодой складчатости. Образование депрессий на кратонах, к которым относится и депрессия Витватерсранд, определяется разрушением (выщелачиванием) гранитного слоя земной коры восходящими потоками флюидов [Маракушев, 2004], которое сопровождается встречным вздыманием мантии, обусловленным восходящим развитием гипербазит-базитового магматизма. В результате создается так называемая обращенность рельефа мантии. Этот процесс и породил расслоенный магматический очаг, материнский для месторождения.

Ритмичность его развития, обусловленная сочетанием растяжения и сжатия депрессии, создала совмещение в месторождении рудных сульфидно-

кварцевой и углеводородной формаций. Углеводородная специфика и длительность развития по существу и сформировали грандиозное месторождение Витватерсранд. Поэтому интересна его параллелизация с нефтеносными провинциями, которые генетически связаны с аналогичными осадочными депрессиями обращенного рельефа мантии, как это показано в работе [Herzig et al., 1993] на примере бассейна Паренти на юго-восточной окраине Бискайского залива.

Благодаря металлогенической комплексности и необыкновенной длительности формирования месторождение Витватерсранд — лидер среди докембрийских месторождений золота, в том числе гигантских (Калгурли в Австралии, Хоумстейк в Северной Америке и др.). «Как известно, докембрийские золоторудные месторождения — крупнейшие в мире» [Сидоров, Волков, 2011, с. 322], так как только они формировались очень длительное время.

Фанерозойские депрессии со свойственным им более ограниченным возрастным диапазоном развития менее продуктивны, в том числе и в отношении золотонности месторождений рудно-кварцевой формации. Однако по механизму их формирования они аналогичны докембрийским месторождениям, в том числе гигантским. Геохимически это прослеживается по вхождению в их кварцевые руды платиновых металлов, по составу которых кварцевые золотые руды подразделяются [Маракушев и др., 2008] на иридий-осмиевые (Витватерсранд (мас.%): Os 40, Ir 30, Ru 15, Pt 14, Rh 1), палладий-платиновые (Ветренское на Северо-Востоке России: Pt 84,4; Pd 15,6) и палладиевые (Мурунтау в Узбекистане: Pd 63,8; Ru 19,4; Pt 13,87; Os 2,77; Ir 0,11). Указанное служит признаком их генетической связи с кислыми дифференциатами расслоенных гипербазит-базитовых платиноносных магматических очагов. Гранитный магматизм в такой геологической позиции наиболее продуктивен, так как только ему свойственно антидромное развитие, порождающее месторождения кварцево-рудных формаций. Месторождение Витватерсранд уникально еще в том отношении, что в его сульфидно-кварцевых рудах текстурно фиксируется процесс разделения расплавов на кварцево-рудные и безрудные (рис. 3). Это вообще присуще формированию месторождений кварцево-рудной формации, для которой обычно разделение кварцевых жил на рудоносные и безрудные (чисто кварцевые).

Таким образом, все особенности вещественного состава и структуры пород, описанные выше, а также условия залегания уран-золотых руд Витватерсранда свидетельствуют об их эндогенной первично расплавленной природе. Представленная в статье оригинальная модель формирования месторождения охватывает все его главные особенности. К ним относится ритмичность размещения и громадная распространенность ураново-золоторудных рифов в архейской депрессии кратона Каапвааль, наличие в рудах алмаза, платиновых и хромовых минералов, а также объединение

в рудах трех рудных формаций — двух сульфидно-кварцевых (нормальной и повышенной щелочности) и одной углеводородной.

В рудах присутствуют текстуры жидкостной несмесимости, определившие их разделение на кварцево-сульфидную матрицу и кварцевые капли (70–80%) с характерными для них структурами взаимного облекания и слияния с образованием гантелеобразных форм.

Генетически руды связаны с эволюцией глубинного расслоенного магматического очага, кислые дифференциаты которого развивались антидромно и порождали щелочнометалльные кварцевые расплавы, эффективно экстрагировавшие золото (KAuO_2) из трансмагматических флюидов и периодически извергавшиеся на поверхность. Рудоносность депрессии определялась ритмами повышения водородного давления, что приводило к разложению кислотных компонентов флюидов, развитию в магматизме щелочного уклона и генерации углеводородов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вагнер П.А. Месторождения платины и рудники Южной Африки. М.: Цветметиздат, 1932. 279 с.

Зарайский Г.П. Эксперимент в решении проблем метасоматизма. М.: ГЕОС, 2007. 36 с.

Маракушев А.А. Новая модель формирования платформенных депрессий и приуроченных к ним стратиформных рудных месторождений // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 11–25.

Маракушев А.А., Маракушев С.А. Происхождение и флюидная эволюция Земли // Пространство и время. 2010. № 1. С. 98–118.

Маракушев А.А., Панеях Н.А., Зотов И.А. Новые представления о происхождении месторождений благородных металлов кварцево-рудной формации // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии: Мат-лы науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения акад. Ф.В. Чухрова. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 136–139.

Маракушев А.А., Панеях Н.А., Русинов В.Л. и др. Парагенезисы рудных металлов углеводородной специфики (часть 1) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2007. № 6. С. 33–40.

Маракушев А.А., Панеях Н.А., Русинов В.Л. и др. Парагенезисы рудных металлов углеводородной специфики (часть 2) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2008. № 1. С. 15–23.

Маракушев А.А., Панеях Н.А. Формирование алмазных взрывных кольцевых структур // Пространство и время. 2011. № 2(4). С. 118–124.

Маракушев С.А. Микробиологическая трансформация золота в биогеохимическом цикле элементов // Успехи совр. биол. 2005. Т. 125, № 3. С. 291–309.

Марфуниин А.С. История золота. М.: Наука, 1987. 245 с.

Онопrienко В.И. Золото Колымы: прогноз Ю.А. Билибина и реалии промышленного освоения // Смирновский сборник. М.: РАЕН, 2007. С. 85–103.

Парк Ч.Ф., Мак-Дормид Р.Ф. Рудные месторождения. М.: Мир, 1966. 555 с.

Перчук Л.Л., Токарев Д.А., Ринен Д.Д. ван и др. Динамическая и термальная история взрывной структуры Вреде-

($3\text{H}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{CH}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ и др.). Утяжеление углеводородов в результате дегазации приводило к образованию в рифах тухолитовых прослоев, эффективно концентрирующих уран и золото (AuUO_2).

Периоды повышения водородного давления завершались взрывными выбросами в депрессию формирующихся на глубине рудоносных флюидных кварцевых расплавов на протяжении более 400 млн лет. Длительностью развития и углеводородной специализацией определена грандиозность месторождения. Воздымание в центре депрессии ее кристаллического фундамента сопровождалось развитием центробежной тектоники, создавшей циркумсинклинальную структуру месторождения.

Авторы признательны проф. В.К. Гаранину, предоставившему для исследования образцы руд месторождения Витватерсранд и чл.-корр. РАН Ю.Г. Сафонову, критические замечания которого учтены при подготовке статьи.

форт в кратоне Каапвааль, Южная Африка // Петрология. 2002. Т. 10, № 5. С. 451–492.

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

Сидоров А.А., Волков А.В. Острова сокровищ // Вестн. РАН. 2011. Т. 81, № 4. С. 316–324.

Толковый словарь геологических английских терминов. М.: Мир, 1979. Т. 3. С. 327.

Царев Д.И. Метасоматизм. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ РАН, 2002. 319 с.

Шило Н.А. Витватерсранд и проблема рудообразования // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 5. С. 101–111.

Шило Н.А., Сахарова М.С. Природа пиритовых образований отложений Витватерсранда // Геология руд. месторождений. 1986. № 2. С. 85–89.

Школьник Э.Л., Жегалло Е.А., Герасименко Л.М. и др. Углеродистые породы и золото в них бассейна Витватерсранд, ЮАР: исследование с помощью электронного микроскопа. М.: Эслан, 2005. 120 с.

Шеглов А.Д. Металлогения срединных массивов // Тектоника срединных массивов. М.: Наука, 1976. С. 100–118.

Baundemont D., Fedorovich J. Structural control of uranium mineralization at the Dominique Peter deposit, Saskatchewan, Canada // Econ. Geol. 1996. Vol. 81, N 5. P. 855–874.

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

Groves D.I., Barret F.M., Binns R.A. et al. Spinel phases associated with metamorphosed volcanic-tipe Iron-Nickel sulfide ores from Western Australia // Econ. Geol. 1977. Vol. 72. P. 1224–1244.

Hallbauer D.K., Jahns H.M., Beltmann H.A. Morphological and anatomical observations on same Precambrian plants from the Witwatersrand South Africa // Geol. Rundschau. 1981. Vol. 66, Hf 2. S. 477–491.

Herzig P.M., Hannington M.D., Fouquet Y. et al. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau Back Arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems

of the southwest Pacific // *Econ. Geol.* 1993. Vol. 88, N 8. P. 2182–2209.

Holland H.D. The oxygenation of the atmosphere and oceans // *Philos. Trans. R. Soc. London. Biol. Sci.* 2006. Vol. 361. P. 903–915.

Mossman D.J., Minter W.E.L., Dutkiewicz A. et al. The indigenous origin of Witwatersrand carbon // *Precamb. Res.* 2008. Vol. 164. P. 173–186.

Schidlowski M. Untersuchungen zur metallogenese in Süd-Westlichen Witwatersrand—Becken (Oranje — Freistaat — Goldfeld, Sudafrika) // *Beihefte zum Geolog. Jarb.* 1970. Hf 85. 74 s.

Schidlowski M. Uraniferous constituents of the Witwatersrand conglomerates: ore-microscopic observations and implications for the Witwatersrand metallogeny. Genesis of uranium and gold-bearing Precambrian quartz-pebble conglomerates // *Geol. Surv. Prof. Pap.* 1981. P. 1–29.

Zumberge J.E., Nagy B., Nagy L.A. Some aspects of the development of the Vaal Reef uranium-gold carbon seams, Witwatersrand sequence: organic geochemical and microbiological considerations // *Miner. Sci. Eng.* 1978. Vol. 10. P. 223–246.

Поступила в редакцию
25.10.2011.