

Золотодобыча на Витватерсранде. Фото 1905 г. Фрагмент.  
С сайта <http://www.aditnow.co.uk/photo/Ferreira-Gold-Mine-Archive-Album-Image-42320/>

УДК  
550.41:553.21:576.8:577.37

Маракушев А.А.\*,  
Глазовская Л.И.\*\*,  
Панеях Н.А.\*\*\*,  
Маракушев С.А.\*\*\*\*



А.А. Маракушев



Л.И. Глазовская



Н.А. Панеях



С.А. Маракушев

## Генезис крупнейшего в мире уран-золотого месторождения Витватерсранд (Ю. Африка)<sup>1</sup>

\*Маракушев Алексей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института экспериментальной минералогии РАН, академик РАН, почётный профессор МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: [belova@iem.ac.ru](mailto:belova@iem.ac.ru)

\*\*Глазовская Людмила Ивановна, кандидат геолого-минералогических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, старший научный сотрудник

E-mail: [glazov@geol.msu.ru](mailto:glazov@geol.msu.ru)

\*\*\*Панеях Надежда Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института экспериментальной минералогии РАН

E-mail: [paneyah@yandex.ru](mailto:paneyah@yandex.ru)

\*\*\*\*Маракушев Сергей Алексеевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем химической физики РАН

E-mail: [marak@cat.icp.ac.ru](mailto:marak@cat.icp.ac.ru)

Обосновывается новая модель формирования месторождения, генетически связанного с расслоенным магматическим очагом, развивавшимся под воздействием глубинных трансмагматических флюидов. Для

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-5877.2012.5 и программы фундаментальных исследований № 28 (подпрограмма 1) Президиума РАН.

объяснения концентрации урана и золота в щелочнометалльных кварцевых расплавах выдвинуто новое представление об образовании рудно кремниевых комплексов  $K_3[AuSiO_5]$  и др. В очаге генерировались углеводородные рудоносные кварцевые расплавы. Они периодически выбрасывались на протяжении 400 млн. лет в вулканогенно-осадочную депрессию Витватерсранд, формируя в ней уран-золоторудные рифы, расслоенные на кварциты и уран-золотые руды. В депрессии от ее центрального поднятия Вредефорт развивались дислокации, сформировавшие циркумсинклинальную структуру месторождения.

**Ключевые слова:** золотые и урановые руды, тухолит, углеводороды, магматический очаг, флюидный расплав, жидкостная несмесимость, кратоны, депрессии.

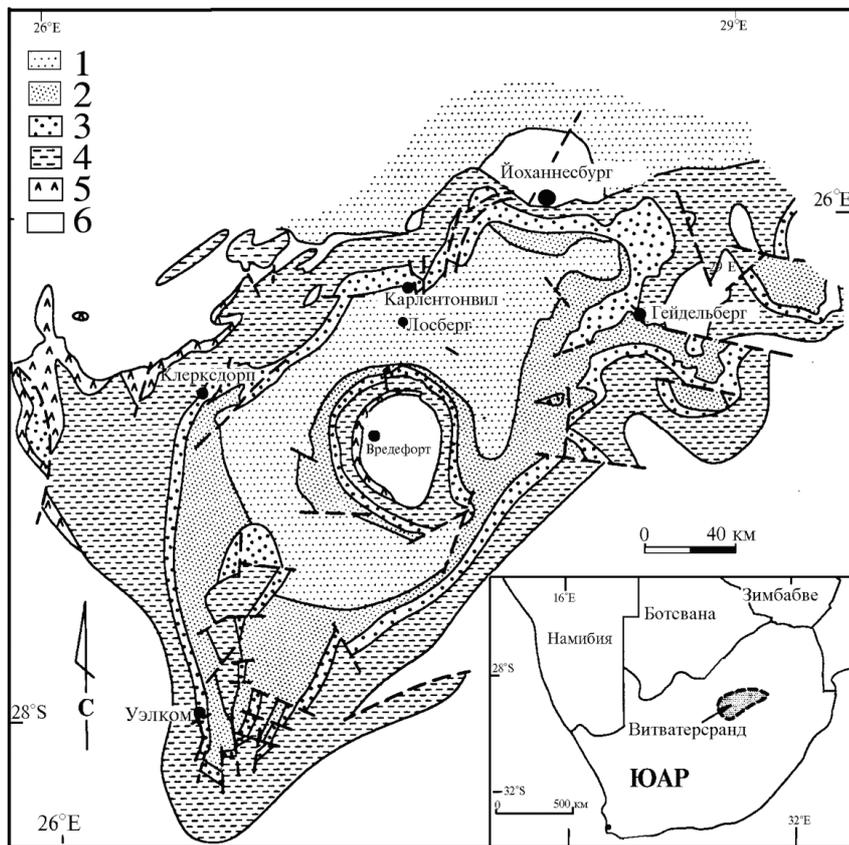


Рис. 1. Схема геологического строения депрессии Витватерсранд<sup>1</sup>. Вулканогенно-осадочные формации (в скобках – их средний возраст, млн. лет): 1 – Трансвааль (2025); 2 – Вентерсдорп (2709); 3–4 – верхний и нижний Витватерсранд (2914); 5 – Доминион (3074); 6 – фундамент (3120). Циркумсинклинальное строение депрессии определяется центральным поднятием Вредефорт.

рассматриваются как гальки конгломератов, а само месторождение, как осадочное (россыпное), несмотря на отсутствие в нем свойственных конгломератам разнообразных галек горных пород. В настоящей статье впервые обосновывается происхождение кварцевых обособлений в сульфидно-кварцевой руде развитием текстуры жидкостной несмесимости расплавов. Тем самым подтверждается генетическая связь золоторудных кварцитов с магматизмом, которая наглядно выражена, например, на одном из месторождений Витватерсранда – Вентерсдорп Контакт, представленном мощным пластом (рифом) кварцевой уран-золотой руды непосредственно перекрытым андезит-базальтовой лавой<sup>2</sup>. В этом примере рудный кварцит занимает позицию кислых дифференциатов, наблюдаемых в непосредственно рудообразующих рудообразовании лавах Кроун. В рудных кварцитах периодически отмечаются калиевый полевой шпат и биогит, свойственные кислым вулканическим породам.

Формация Витватерсранд, содержащая в верхней части горизонты рудных кварцитов (серия Elsburg A), согласна перекрывается вулканогенной формацией Вентерсдорп. За ее формированием следовала складчатость, обрамляющая поднятие Вредефорт, которое окружено глубокой синклинальной структурой, осложненной множеством мелких дислокаций. Эта циркумсинклинальная структура образовалась в результате развития так называемой центро-

В металлогеническом развитии Земли самым грандиозным было образование уран-золоторудного месторождения Витватерсранд (сокращенно Ранд), открытого на юге Африки в 1886 г. Из его громадных запасов золота уже более 50 тыс. т извлечено к настоящему времени. Это самое древнее золоторудное месторождение, формировавшееся на протяжении почти 400 млн. лет (его возраст 3100–2700 млн. лет), в огромной архейской депрессии кратона Каапвааль (рис. 1). С возраста 3,1 млрд. лет депрессия заполнялась осадочными породами, ритмы отложения которых разделялись продуктами вулканических извержений, представленных ассоциацией кислых пород (риолитов) и базальтов (лавы Кроун, группа Доминион). Вверху по разрезу они сменялись горизонтами уран-золоторудных кварцитов, перемежаемость которых с осадочными породами и составляет формацию Витватерсранд (см. рис. 1), представляющую месторождение. Безрудные кварциты в этих горизонтах входят в ассоциацию с рудами, представленными округлыми обособлениями чистого кварца, находящимися в кварцево-сульфидной уран-золоторудной матрице. Со времени открытия месторождения эти кварцевые обособления ошибочно

<sup>1</sup> Gibson R.L. Reimond W. U. Field excursion through the Vredefort impact structure // 62-nd Meeting of the Meteorological Society. Johannesburg, 11–16 July 1999. 88 p.

<sup>2</sup> Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю. Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранд // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. № 6. С. 475–511.

бежной тектоники<sup>1</sup> под действием растягивающих усилий, порожденных эндогенными взрывными процессами. Затем следовали воздымание структуры и эрозия складчатых сооружений, завершивших развитие архейской рудоносной депрессии. Кварцитовые рудные пласты, обнажившиеся в эрозионном срезе синклинали складчатой структуры, залегают на поверхности в выветрелых осадочных породах и образуют гряды, напоминающие скальные обрамления (риффы) береговых окраин морей и океанов. По аналогии с ними рудные кварцитовые горизонты Ранда и получили название рифов. Они широко варьируют по мощности и выдержаны по простиранию.

Строение рифов существенно осложняется наложенными деформациями, развивающимися в общем субсогласно с их расслоенностью. В результате они приобретают сланцеватое сложение, образование которого сопровождается дроблением кварцевых обособлений и матрицы, переотложением кварца и пирита, образующих прожилковые, гнездовые скопления и чередующиеся полосы, вытянутые вдоль сланцеватости. При этих трансформациях в рифах проявляется брекчиевый характер, кварцево-пиритовая матрица становится цементом обломков кварца, проникая в них в виде прожилков. Перемещению и перемешиванию материала в рифах способствуют также послонные деформации. Сланцеватое сложение рифов усиливается с повышением в них содержания вторичных минералов со слоистой структурой – серицита, хлорита, фуксита, – ведущих к образованию так называемых зеленых рифов.

В слабо измененных типах рифов сохраняется первичная текстура сульфидно-кварцевой руды, образующей слои и неправильные выделения в безрудных кварцитах, четко отделяющихся от вмещающих осадочных пород. Сульфидно-кварцевая руда на 70–80% состоит из каплевидных выделений кварца в кварцево-сульфидной матрице. Эта характерная текстура жидкостной несмесимости хорошо видна на рис. 2, представляющем зарисовку шлифа. В этой текстуре отчетливо видны признаки жидкостного разделения первично однородного расплава на кварцевые капли и сульфидно-кварцевую матрицу с небольшими капельками пирита, реже пирротина (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 рудного кварцевого расплава, ритмично извергающегося в депрессию подобно вулканическим извержениям.

Кроме монокристалльных капель, представленных на рис. 2, в рудах Ранда содержатся зернистые кварцевые капли и их зональные типы (зернистые во внутренней части и монокристалльные во внешней), что еще раз подтверждает их расплавленную природу. Каплевидные выделения пирита в матрице вмещаются в кварцевые капли, что отражает их практически одновременное выделение до затвердевания кварцевых капель. Кварц в каплях обычно чистый, не содержит включений других минералов. В матрице кварц чаще преобладает над пиритом. В процессе слияния капель происходит вытеснение кварц-пиритовой рудной матрицы с образованием кварцитов, в которых матрица становится реликтом, сохраняясь только в тонких интерстициях между сливающимися каплями. На микрофотографии (рис. 3) хорошо видна интерстиционная текстура, свойственная сульфидно-кварцевым рудам, а также ее реликты, сохраняющиеся на переходе от этих руд к безрудным кварцитам.

К важным показателям взрывного (эксплозивного) выброса из глубины в депрессию рудно-кварцевых расплавов относятся мельчайшие (меньше 1 карата) зерна зеленоватого алмаза, систематически входящего в состав золотых кварцевых руд Витватерсранда. Этой алмазоносной пылью фиксируется механизм широкого распространения расплавов, свойственных алмазоносным эндогенным взрывным кольцевым структурам<sup>3</sup>. Расплавы с пылевидным алмазом (зювиты, тагамиты) выбрасывались взрывом на большую высоту и распространялись на огромные площади. Взрывы очень высокого энергетического уровня аналогично обеспечивали в депрессии Витватерсранд наблюдае-

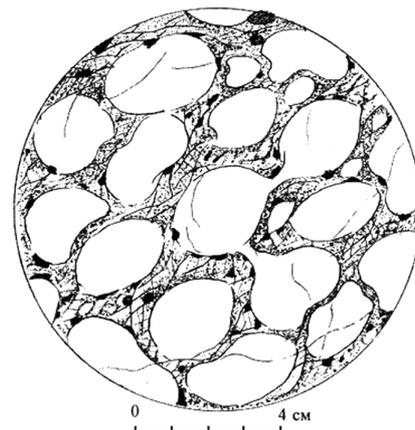


Рис. 2. Схематическая зарисовка шлифа ураново-золотой сульфидно-кварцевой руды<sup>2</sup>, разделяющейся на крупные капли кварца и мелкие капли сульфидов (черное) в кварцево-сульфидной матрице. Выражены взаимное облекание и гантелеобразная форма кварцевых капель и их связанность перемычками.

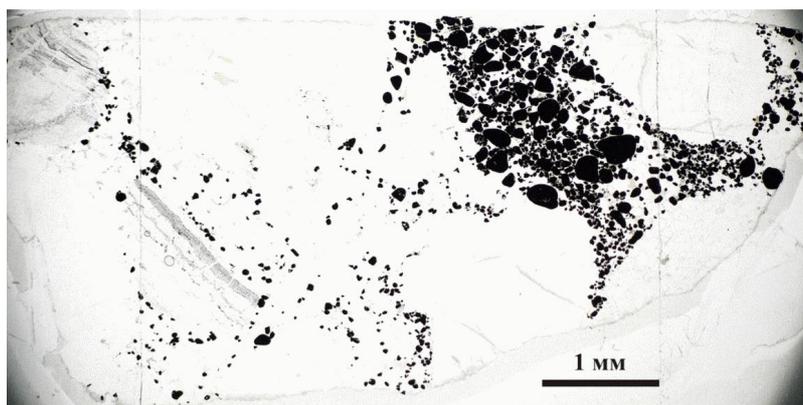


Рис. 3. Кварцит, образовавшийся при слиянии кварцевых капель; в некоторых местах сохранилась интерстиционная текстура кварцево-сульфидной руды и ее реликты.

<sup>1</sup> Baundemont D., Fedorovich J. Structural control of uranium mineralization at the Dominique Peter deposit, Saskatchewan, Canada // *Econ. Geol.* 1996. Vol. 81. No 5. P. 855–874.

<sup>2</sup> Царев Д.И. *Метасоматизм*. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского науч. центра РАН, 2002. 319 с. С. 254.

<sup>3</sup> Маракушев А.А., Панях Н.А. Формирование алмазоносных взрывных кольцевых структур // *Пространство и Время*. 2011. № 2(4). С. 118–124.

мое ритмично повторяющееся образование алмаз-содержащих рифов на огромных площадях в сотни квадратных километров. Никакие другие процессы не способны обеспечить такую их распространенность. Рифы характеризуются выдержанностью их строения и состава.

Таким образом, в сульфидно-кварцевых рудах Ранда отчетливо выражены структуры жидкостной несмешиваемости (liquid immiscibility), определяющие природу рифов, как расплавленную, связанную с развитием глубинного магматического очага.

Руды Ранда характеризуются умеренными средними содержаниями золота (около 10 г/т) и урана (порядка 200 мг/т). Содержания существенно более низкие в сульфидно-кварцевых рудах и несравнимо более высокие в так называемых банкетах, представляющих сочетание сульфидно-кварцевых руд и обычно подстилающих их сложных углеродных веществ (распространенные названия – carbon и/или тухолит (рис. 4)). В углеродном веществе содержание золота, урана (в минералах уранинит, браннерит) и тория (минерал – торианит) может достигать огромных значений. Оно детально исследовано в рифе Вааль. В его состав входят в основном углеводороды, подразделяющиеся на следующие типы: легкие с атомным преобладанием водорода над углеродом ( $C_2H_6$ – $C_4H_{10}$ ) и ( $C_9H_{12}$ – $C_{13}H_{14}$ ), промежуточные с одинаковым их 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 ( $C_{10}H_8$ ) и др. В подчиненном количестве присутствуют соединения углеводородов с кислородом ( $CH_4O$ ,  $C_2H_4O$ ,  $C_3H_6O$ ) и серой ( $C_5H_6S$ ,  $C_{10}H_8S$ ). Затвердевание тухолита и превращение его в битуминозное столбчатое твердое вещество связано с его дегазацией, с миграцией из него водорода, метана и других легких углеводородов.

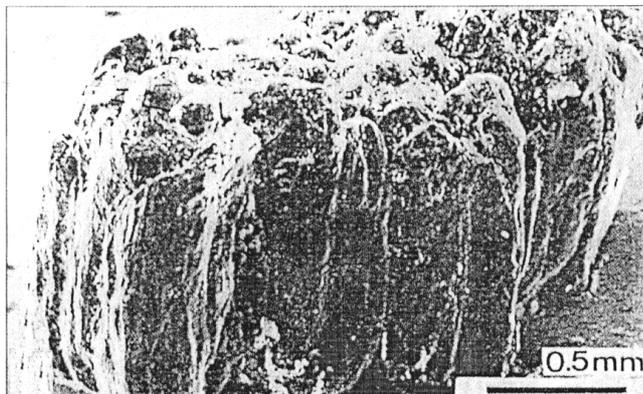
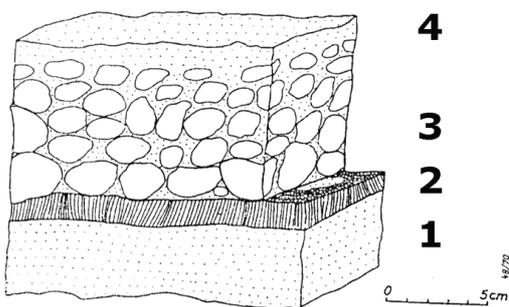


Рис. 4. Блок-диаграмма, иллюстрирующая строение рифа, богатого золотом и ураном, и содержащего прослой тухолита со столбчатой структурой<sup>2</sup>: 1 – кварцит, 2 – тухолит, 3 – сульфидно-кварцевая руда, 4 – кварцит. Внизу фотография образца столбчатого тухолита<sup>3</sup>.

С давних времен распространено представление о биогенной природе тухолита Витватерсранда<sup>4</sup>, что нам кажется ошибочным. В его практически чисто углеводородном составе отсутствуют азот и фосфор, а кислород содержится в ничтожном количестве. Эти элементы существенны в составе любого биогенного вещества. Без них невозможна даже геохимическая (абиогенная) эволюция органического вещества<sup>5</sup>, в которой выделяются, по крайней мере, 6 ступеней развития, предшествующих биохимическому развитию. 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. Предполагавшееся участие в развитии золотоносности Ранда диагенеза цианобактериальных матов противоречит возрастным соотношениям, т.к. формирование цианобактерий (возникновение окислительного фотосинтеза и появление кислорода в гидросфере и атмосфере) датируется возрастом около 2,2–2,4 млрд. лет<sup>6</sup>, тогда как золото-углеродные ассоциации Ранда имеют архейский возраст, т.е. более 2,7 млрд. лет.

Приобретение углеводородной специфики в рудообразовании по нашим представлениям связано с появлением щелочного уклона в развитии магматизма в его материнском глубинном очаге. В рудах Ранда это прослеживается по парагенезисам рудных минералов. На месторождении установлено «более 70 минеральных видов»<sup>7</sup>. Даже далеко не полный обзор парагенезисов этих минералов убеж-

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Schidlowski M. Untersuchungen zur metallogenese in Sud-Westlichen Witwatersrand – Becken (Oranje – Freistaat – Goldfeld, Sudafrika) // Beihefte zum Geolog. Jahrbuch. 1970. Heft 85. 74 p.; 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.

<sup>3</sup> 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. Heft 2. P. 477–491.

<sup>4</sup> Hallbauer D.K., vanWarmelo J. Fossilized plants in tucholite from Precambrian rocks of the Witwatersrand, South Africa // Precambrian Res. 1974. Vol. 1. Pp. 199–212; Hallbauer D.K., Jahns H.M., Beltmann H.A. Op. cit.; Mossman D.J., Minter W.E.L., Dutkiewicz A. et al. The indigenous origin of Witwatersrand carbon // Precambrian Res. 2008. Vol. 164. Pp. 173–186.

<sup>5</sup> Маракушев А.А., Маракушев С.А. // Геохимические основы теории происхождения жизни // ДАН. 2008. Т. 420. №1. С. 97–103; Маракушев А.А., Маракушев С.А. Происхождение и флюидная эволюция Земли // Пространство и Время. 2010. № 1. С. 98–118.

<sup>6</sup> Маракушев С.А. Микробиологическая трансформация золота в биогеохимическом цикле элементов // Успехи совр. биол. 2005. Т. 125, № 3. С. 291–309; Holland H.D. The oxygenation of the atmosphere and oceans // Philos. Trans. R. Soc. Lond. Biol. Sci. 2006. Vol. 361. P. 903–915.

<sup>7</sup> Марфуниин А.С. История золота. М.: Наука, 1987. 245 с. С. 100.

дает в комплексном характере руд, что прослеживается по слагающим руды металлам, которые разделяются на металлы нормальной и повышенной щелочности (табл. 1).

Таблица 1

Систематика химических элементов  
на основе их атомных орбитальных радиусов

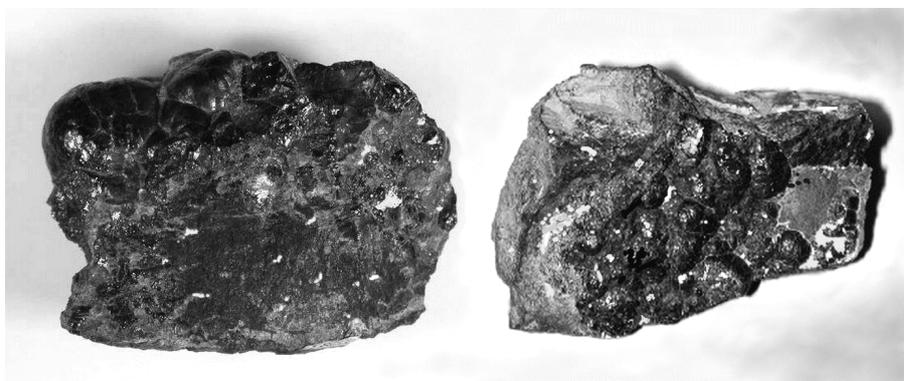
Нечетные элементы

Четные элементы

Щелочность ↑	3	11	18	37	55	87	Щелочные металлы
		Li	Na	Kr	Rb	Cs	Fr
						57	89
						La	Ac
						59	91
						Pr	Pa
						81	93
						Pm	Np
						83	95
						Eu	Am
					85	97	
					Tb	Bk	
					87	99	
					Ho	Eg	
					89	101	
					Tm	Md	
		21	39	71	103		
		Sc	Y	Lu	Lr		
		23	41	73	105		
		V	Nb	Ta	Db		
		26	43	76	107		
		Mn	Tc	Re	Bh		
		27	45	77	109		
		Co	Rh	Ir	Mt		
		29	47	79	111		
		Cu	Ag	Au			
	5	13	31	49	81	113	
	B	Al	Ga	In	Te		
	7	15	33	51	83	115	
	N	P	As	Sb	Bi		
	9	17	35	53	85	117	
	H	F	Cl	Br	I	At	
	I	II	III	IV	V	VI	
						Периоды	

Щелочность ↑	4	12	20	38	68	88	Щелочноземельные металлы
		Be	Mg	Ca	Sr	Ba	Ra
						68	90
						Ce	Th
						80	82
						Nd	U
						82	84
						Sm	Pu
						84	86
						Gd	Cm
					86	88	
					Dy	Cf	
					88	90	
					Er	Fm	
					90	92	
					Yb	No	
		22	40	72	104		
		Ti	Zr	Hf	Rf		
		24	42	74	106		
		Cr	Mo	W	Sg		
		26	44	76	108		
		Fe	Ru	Os	Hs		
		28	46	78	110		
		Ni	Pd	Pt			
		30	48	80	112		
		Zn	Cd	Hg			
	8	14	32	50	82	114	
	C	Si	Ge	Sn	Pb		
	8	16	34	52	84	116	
	O	S	Se	Te	Po		
	2	10	18	36	54	86	
	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	
	I	II	III	IV	V	VI	
						Периоды	

Это разделение определяется величинами их атомных орбитальных радиусов, которые в каждом периоде монотонно уменьшаются с повышением их порядковых номеров и соответствующим нарастанием кислотных свойств металлов. Сопоставлять металлы по этому признаку можно только при их одинаковой валентности. Например, согласно таблице, уран – более основной металл по сравнению с золотом, соответственно кислота  $\text{HAuO}_2$  более сильная по сравнению с  $\text{HUrO}_2$ . В восстановительных условиях золото переходит в одновалентное состояние и теряет кислотные свойства. Это стабилизирует соединение  $\text{AuUO}_2$ , пределяющее парагенезис золота с ураном. «Срастания ярких золотинок с бархатисто-черным уранинитом ( $\text{UO}_2$ ) – это минералогический символ Витватерсранда»<sup>1</sup>. Металлогенетическая специфика Ранда состоит в сочетании в его рудах металлов, свойственных нормальному и щелочному магматизму. Показательно в связи с этим сочетание сульфидов меди и халькофильных металлов с фосфатами редких земель (монацитом и др.). Магматизм нормальной щелочности развивается в режиме растяжения депрессионных структур, когда восходящие флюиды, определяющие его развитие, теряют водород и приобретают кислотный характер. Включения водно-углекислых флюидов ( $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{CO}_3$  и др.) обычны в ми-



Витватерсранд. Образцы золотосодержащей уранинитовой руды

<sup>1</sup> Там же. С. 105.

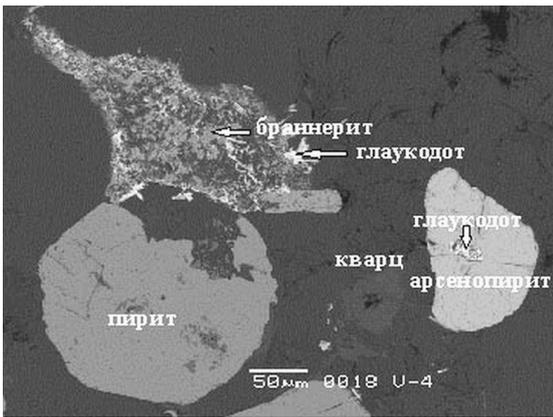


Рис. 5. Интерстиция между каплями кварца сложена кварц-браннеритовым агрегатом (с глаукоцитом) в контакте с каплей пирита, частично замещенной кварцем с незначительной примесью браннерита. Масштаб 50 мкм.

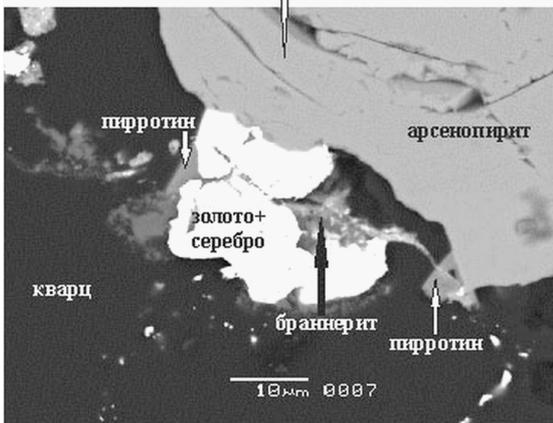
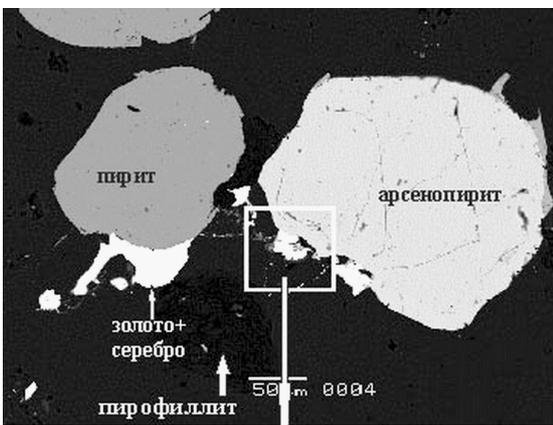


Рис. 6. Причудливые формы выделения золота (910 проба) на зернах пирита и арсенопирита в ассоциации с браннеритом и уранинитом. Масштаб верхней микрофотографии 50 мкм, нижней – 10 мкм.

Выделения золота имеют особенно причудливые формы в столбчатом тухолите, в котором они вписываются в его колломорфную структуру. В сульфидно-кварцевой руде золото или образует отдельные зерна в матрице или тесные ассоциации с сульфидами (включения и срастания и нарастания на них). На фотографии (рис. 6) золото 910 пробы (Au 84,3; Ag 15,7) нарастает на пирит и арсенопирит в виде зерен причудливой кон-

нералах изверженных пород нормальной щелочности. Сменяющий эту обстановку режим сжатия препятствует миграции водорода, давление которого возрастает, придавая магматизму взрывной характер и щелочной уклон, обусловленный разложением кислотных компонентов флюидов с появлением углеводородов:  $2\text{H}_2\text{CO}_3 + 7\text{H}_2 = 6\text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_6$  и др.<sup>1</sup>. Углеводороды могут также дополнительно генерироваться за счет привноса CO из более глубоких зон:  $5\text{H}_2 + 2\text{CO} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_6$ . Углеводородная специфика несомненно влияла на развитие рудоносного кварцевого расплава, повышая его химическое сродство к урану и золоту. Углеводородные рудоносные кварцевые расплавы, генетически связанные с повышением водородного давления в магматическом очаге, на различных ступенях своего металлогенического развития взрывно выбрасывались в депрессию, формируя в ней рифы различной мощности и громадной протяженности. Можно полагать, что, благодаря углеводородной специфике, в кварцевых расплавах контрастно проявилась кварцево-рудная несмесимость. Она привела к отделению нижних безрудных кварцитов (см. рис. 4) и обособлению в рудных расплавах безрудных кварцевых капель (см. рис. 2). С их отделением связано превышение в рудном расплаве концентрации рудных металлов, серы и углеводородов. Жидкое состояние рудного расплава доказывается наличием в руде ранних капель тугоплавкого пирротина, которые захватываются каплями более легкоплавкого пирита, выделяющимися позднее в рудном расплаве. Повышение в рудном расплаве содержания углеводорода и его утяжеление вследствие дегазации водорода приводили к его отделению от рудного расплава с захватом большей части золота, урана, тория. Результатом этого и было образование продуктивного тухолитового слоя в основании сульфидно-кварцевой руды (см. рис. 4). Консолидация углеводородного слоя сопровождалась отделением от него водно-углеводородных флюидов, под их воздействием которых происходили метасоматические преобразования залегающих выше кварцево-сульфидных руд, например, замещение браннеритом ( $\text{UTi}_2\text{O}_6$ ) кварцево-сульфидной руды в интерстициях между каплями кварца (рис. 5).

При разделении матричных расплавов на рудные и чисто кварцевые углеводороды концентрировались в рудных расплавах. Соответственно кварц каплевидных выделений в руде содержит водно-углекислые флюидные включения, а в кварце сульфидно-кварцевой матрицы и жил содержатся включения углеводородных флюидов, что и подтверждается в работе<sup>2</sup>. Содержащие нефть (oil bearing) флюидные включения описаны в кварце рифов Вааль и Стейн<sup>3</sup>.

Природа рудоносных кварцитовых рифов Ранда в наибольшей мере раскрывается наличием в рудах платиновых металлов (масс %): Os 40, Ir 30, Ru 15, Pt 14, Rh 1. На это обратил внимание еще П.А. Вагнер<sup>4</sup>. Он связал их нахождение со спецификой глубинного магматического очага, материнского по отношению к месторождению, полагая его аналогичным платиноносным плутонам, которые в апикальной части сложены гранитами, а в основании гипербазитами. Соответственно с этим гранитная и гипербазитовая линии минералообразования находят отражение и в специфике золота Ранда.

<sup>1</sup> Маракушев А.А., Маракушев С.А. Окислительно-восстановительные фации углеводородов и образование нефти // ДАН. 2007. Т. 414. № 1. С. 83–89.

<sup>2</sup> Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю. Указ. соч. С. 501.

<sup>3</sup> Mossman D.J., Minter W.E.L., Dutkiewicz A. et al. Op. cit.

<sup>4</sup> Вагнер П.А. Месторождения платины и рудники Южной Африки. М.: Цветметиздат, 1932. 279 с.

фигурации. В сульфидно-кварцевых рудах золото входит в ассоциацию большей частью с пиритом, но также и с множеством других минералов: сфалеритом, халькопиритом, молибденитом, кобальтином, глаукодитом, герсдорфитом, бравоитом и др. Это разнообразие его ассоциаций – надежный признак эндогенного происхождения золота. Оно очень богато элементами-примесями – индикаторами его гетерогенности, как «ультрабазитовой, так и гранитной серий»<sup>1</sup>. Это отражает связь золота с гранитами апикальной части расслоенного магматического очага, развивающегося под воздействием восходящих трансмагматических флюидов, фильтрующихся через его глубинную гипербазитовую зону. Она и придает кварцево-рудной формации свою металлогеническую специфику. С этим связано и нахождение в рудах Ранда платиновых металлов, хромита и примеси никеля в золоте и сульфидах. Самое важное в этом процессе состоит в том, что восходящие трансмагматические флюиды приносят в апикальные гранитные магмы не только рудные, но и петрогенные основные химические компоненты, придающие эволюции гранитного магматизма антидромную диоритовую направленность с отделением щелочнометалльного кварцевого расплава: гранитная магма + (Ca + Mg + Fe) = диоритовая магма + (Si + K + Na). Этот процесс наглядно выражен на петрохимической диаграмме, рис. 7. Месторождения кварцево-рудной формации возникают на различных ступенях смещения выше упомянутой реакции вправо, что фиксируется повышением основности гранитов (антидромным развитием гранитного магматизма). Витватерсранд отвечает полному смещению реакции вправо, когда кислые (гранитные) магмы вытесняются ассоциацией средних (или основных магм) и щелочнометалльных кварцевых расплавов. Этим и определяются эксплозивные извержения более флюидных кварцевых расплавов, формирующих кварцитовые рифы. Встречаются и их ассоциации с андезито-базальтами.

Флюидами из глубины приносилось больше железа, чем требовалось реакцией гранит → диорит. Избыточное приносимое железо подвергалось флюидной сульфуризации с приносом меди и халькофильных металлов, что и создавало сульфидную специализацию кварцевого расплава. Железо приносилось в двухвалентном состоянии, так что его дисульфидная сульфуризация сопровождалась освобождением водорода ( $FeO + 2H_2S = FeS_2 + H_2O + H_2$ ). При наличии углерода это генерировало углеводороды ( $H_2CO_3 + 2,5H_2 = 3H_2O + CH_4$ ), усиливая тем самым углеводородную специализацию Ранда. Щелочнометалльный характер кварцевого расплава стимулировал концентрацию в нем золота в результате образования рудно-кремниевых комплексов:  $[AuSi_2O_6]^-$ ,  $[AuSiO_5]^{3-}$  и др., подобных алюмокремниевым комплексам силикатов:  $[AlSi_3O_8]^-$ ,  $[AlSi_2O_6]^-$  в соединениях со щелочными металлами. Образующиеся в результате щелочные комплексы золота –  $K_3[AuSiO_5]$ ,  $K_5[AuSiO_6]$  и др. – представляют главные формы концентрации рудных металлов в кварцевых расплавах. Они легко разлагаются при флюидном воздействии, вызывающем миграцию щелочных металлов в виде  $K(OH)$ , создавая парагенезис золота с кварцем:  $K_3[AuSiO_5] + 1,5H_2 = Au + SiO_2 + 3K(OH)$ ;  $K_5[AuSiO_6] + H_2O + 1,5H_2 = Au + SiO_2 + 5K(OH)$  и др. Открытие щелочнометалльного эффекта концентрации золота (и других рудных металлов) в кварцевых расплавах<sup>2</sup> имеет общее значение, позволяя понять золотоносность не только Ранда, но и почти чисто кварцевых жил, нередко создающих коренные и россыпные месторождения золота. Этот эффект определяется практическим отсутствием алюминия в щелочнометалльных кварцевых расплавах. Он обусловлен контрастным разделением алюминия и щелочных металлов между силикатной магмой и отделяющимся от нее кварцевым расплавом. Под воздействием щелочных металлов в кварцевых расплавах образуются рудно-кремниевые комплексы – эффективные концентраторы рудных металлов, создающие при разложении рудоносность кварцевых жил, например  $K[AuSi_2O_6] + 1,5H_2 = Au + 2SiO_2 + (H_2O + K(OH))$ .

Древнейшим депрессиям архейских кратонов свойственно распространение золоторудных кварцевых формаций. По рудно-кварцевому отношению с месторождением Витватерсранд вполне сопоставимы, например, «четыре тысячи архейских золоторудных жил кратона Зимбабве»<sup>3</sup>, смежного с кратоном Каапвааль. Хотя эти объекты различаются по продуктивности, но сходны по возрасту (Архей), приуроченности к депрессиям на древних кратонах и огромному размаху проявления золото-кварцевой формации.

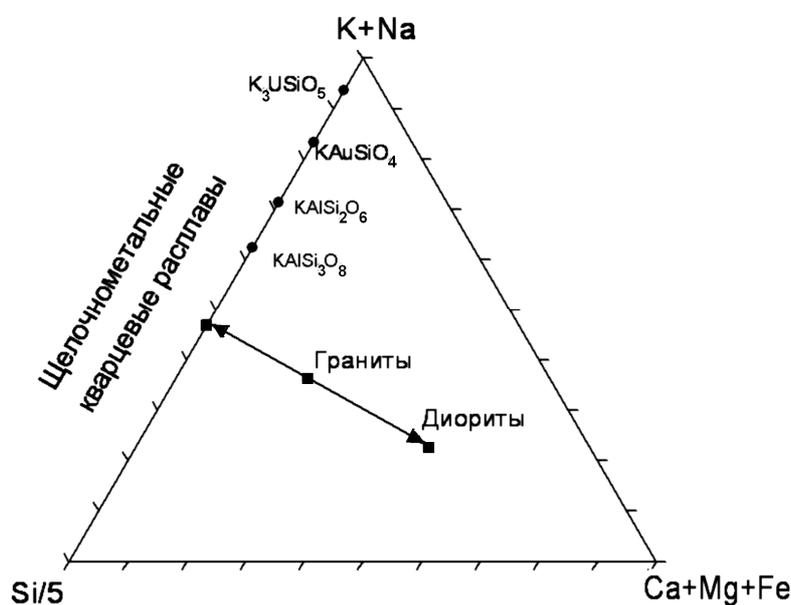


Рис. 7. Схема расщепления гранитных магм на ассоциацию диоритовых и щелочнометалльно-кварцитовых расплавов. Показаны соединения калия с алюмокремниевыми и руднокремниевыми комплексами.

<sup>1</sup> Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю. Указ. соч. С. 498

<sup>2</sup> Маракушев А.А. Генезис месторождений кварцево-рудной формации // Смирновский сборник. М: МГУ. 2012.

<sup>3</sup> Марфунин А.С. Указ. соч. С. 115–116.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вагнер П.А. Месторождения платины и рудники Южной Африки. М.: Цветметиздат, 1932. 279 с.  
Vagner P.A. (1932). Mestorozhdeniya platiny i rudniki Yuzhnoi Afriki. Tsvetmetizdat. Moskva. 279 p.
2. Маракушев А.А. Генезис месторождений кварцево-рудной формации. Смирновский сборник. М: МГУ. 2012.  
Marakushev A.A. (2012). Genezis mestorozhdenii kvartsevo-rudnoi formatsii. Smirnovskii sbornik. MGU. Moskva.
3. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Окислительно-восстановительные фации углеводородов и образование нефти // ДАН. 2007. Т. 414. № 1. С. 83–89. На англ.яз.: Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2007). Redox facies of hydrocarbons and the formation of oil. Dokl. Earth Sci. Vol. 414. N. 4. Pp. 561–566.  
Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2007). Okislitel'no-vosstanovitel'nye fatsii uglevodorodov i obrazovanie nefiti. DAN. T. 414. N 1. С. 83–89. In Engl.: Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2007). Redox facies of hydrocarbons and the formation of oil. Dokl. Earth Sci. Vol. 414. No. 4. Pp. 561–566.
4. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Геохимические основы теории происхождения жизни // ДАН. 2008. Т. 420. № 1. С. 97–103. На англ. яз.: Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2008). Geochemical basis of the theory of origin of life. Dokl. Earth Sci. Vol. 420. N. 4. Pp. 602–607.  
Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2008). Geokhimicheskie osnovy teorii proiskhozhdeniya zhizni. DAN. T. 420. N 1. Pp. 97–103. In Engl.: Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2008). Geochemical basis of the theory of origin of life. Dokl. Earth Sci. Vol. 420. N. 4. Pp. 602–607.
5. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Происхождение и флюидная эволюция Земли // Пространство и Время. 2010. № 1. С. 98–118. На англ. яз.: Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2010). Origin and fluid evolution of the Earth. Prostranstvo i Vremya. N 2(4). Pp. 153–158.  
Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2010). Proiskhozhdenie i flyuidnaya evolyutsiya Zemli. Prostranstvo i Vremya. N 1. Pp. 98–118. In Engl.: Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2010). Origin and fluid evolution of the Earth. Prostranstvo i Vremya. N 2(4). Pp. 153–158.
6. Маракушев А.А., Панеях Н.А. Формирование алмазоносных взрывных кольцевых структур // Пространство и Время. 2011. № 2(4). С. 118–124. На англ. яз.: Marakushev A.A., Paneyakh N.A. (2011). Formation of diamond-bearing explosive ring structures. Prostranstvo i Vremya. N 2(4). Pp. 118–124.  
Marakushev A.A., Paneyakh N.A. (2011). Formirovanie almazonosnykh vzryvnykh kol'tsevykh struktur. Prostranstvo i Vremya. N 2(4). Pp. 118–124. In Engl.: Marakushev A.A., Paneyakh N.A. (2011). Formation of diamond-bearing explosive ring structures. Prostranstvo i Vremya. N 2(4). Pp. 118–124.
7. Маракушев С.А. Микробиологическая трансформация золота в биогеохимическом цикле элементов // Успехи совр. биол. 2005. Т. 125. № 3. С. 291–309.  
Marakushev S.A. (2005). Mikrobiologicheskaya transformatsiya zolota v biogeoхимическом tsikle elementov. Uspekhi covr. biol. T. 125. N 3. Pp. 291–309.
8. Марфунин А.С. История золота. М.: Наука, 1987. 245 с.  
Marfunin A.S. (1987). Istoriya zolota. Nauka. Moskva 245 p.
9. Оноприенко В.И. Золото Колымы: прогноз Ю.А. Билибина и реалии промышленного освоения // Смирновский сборник. М.: РАЕН. 2007. С. 85–103.  
Onoprienko V.I. (2007). Zoloto Kolymy: prognoz Yu.A. Bilibina i realii promyshlennogo osvoeniya. Smirnovskii sbornik. RAEN. Moskva. Pp. 85–103.
10. Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю. Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранд // Геология рудн. месторождений. 2006. Т. 48. № 6. С. 475–511.  
Safonov Yu.G., Prokof'ev V.Yu. (2006). Model' konsedimentatsionnogo gidrotermal'nogo obrazovaniya zoloto-nosnykh rifov basseina Vitvatersrand. Geologiya rudn. mestorozhdenii. T. 48. N. 6. Pp. 475–511.
11. Царев Д.И. Метасоматизм. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского науч. центра РАН, 2002. 319 с.  
Tsarev D.I. (2002). Metasomatizm. Izd-vo Buryatskogo nauch. tsentra RAN. Ulan-Ude. 319 p.
12. Baundemont D., Fedorovich J. Structural control of uranium mineralization at the Dominique Peter deposit, Saskatchewan, Canada. Econ. Geol. 1996. Vol. 81. N 5. Pp. 855–874.
13. Gibson R.L., Reimond W.U. Field excursion through the Vredefort impact structure. 62-nd Meeting of the Meteorological Society. Johannesburg, 11–16 July 1999. 88 p.
14. Hallbauer D.K., van Warmelo J. Fossilized plants in thucholite from Precambrian rocks of the Witwatersrand, South Africa. Precambrian Res. 1974. Vol. 1. Pp. 199–212.
15. 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. Heft 2. P. 477–491.
16. Holland H.D. The oxygenation of the atmosphere and oceans. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Biol. Sci. 2006. Vol. 361. Pp. 903–915.
17. Mossman D.J., Minter W.E.L., Dutkiewicz A. et al. The indigenous origin of Witwatersrand carbon. Precambrian Res. 2008. Vol. 164. P. 173–186.
18. Schidlowski M. Untersuchungen zur metallogenese in Sud-Westlichen Witwatersrand – Becken (Oranje – Freistaat – Goldfeld, Sudafrika). Beihefte zum Geolog. Jahrbuch. 1970. Heft 85. 74 p.
19. 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. Pp. 1–29.
20. 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. Pp. 223–246.