

24. Richard, A. Giant uranium deposits formed from exceptionally uranium-rich acidic brines / A. Richard, C. Rozsypal, J. Mercadier et.al. / Natere 5, 2012. — P. 142–146.

25. Sheahan, C. Combined ingress-egress model for the Kianna unconformity-related uranium deposit, Shea Creek project, Athabasca Basin, Canada / C. Sheahan, M. Fayek, D.A. Quirt // Econ. Geol. 111. — 2016. — P. 225–257.

26. Unconformity-related uranium deposits. Vienna, 2018. Series: IAEA TECDOC, no. 1857.

© Машковцев Г.А., Мигута А.К., Щеточкин В.Н., 2020

Машковцев Григорий Анатольевич // vims@df.ru

Мигута Анатолий Константинович // vims@df.ru

Щеточкин Валерий Николаевич // vims@df.ru

УДК 553.04; 553.41+553.496; 622.342+622.349.5; 622.7'1

**Тарханов А.В., Бугриева Е.П., Колпаков Г.А.,  
Казанцев В.В., Балакина И.Г. (АО «ВНИИХТ»),  
Смагин А.П. (АО «ВНИПИПТ»)**

**НОВЫЙ ТИП УРАН-ЗОЛОТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
В ЛИНЕЙНЫХ КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ДРЕВ-  
НИХ ЩИТАХ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
СЕВЕРНОЕ (АЛДАНСКИЙ ЩИТ, РЕСПУБЛИКА  
САХА (ЯКУТИЯ))**

*На месторождениях Эльконского рудного района, в том числе на месторождении Северное, выше первичных золотоурановых залежей установлена бедная U-Au минерализация, для которой разработана комплексная технология извлечения золота и урана способом кучного выщелачивания (КВ). Выделено два технологических сорта руд: золотосеребряные и золотосеребряные с повышенным содержанием урана. Из обоих сортов золото и серебро извлекаются цианированием, а из второго сорта после нейтрализации штабеля слабым сернокислотным раствором извлекается уран. В результате освоения этих месторождений, добычи руд карьером и переработки руд КВ в Южной Якутии может быть создан крупный золоторудный район с ресурсами около 200 т золота. **Ключевые слова:** Элькон, Северное, золото, уран, технологические сорта, кучное выщелачивание (КВ).*

Tarkhanov A.V., Bugrieva E.P., Kolpakov G.A., Kazantsev V.V., Balakina I.G. (VNIИХТ), Smagin A.P. (VNIPIPT)

**THE NEW TYPE URANIUM-GOLD DEPOSITS IN  
LINEAR CRUSR WETHERING ON OLDER  
SHIELDS FOR EXSAMPLE SEVERNOE DEPOSIT  
(ALDAN SHIELD, REPUBLIC SAKHA (YAKUTIA))**

*The poor U-Au mineralization established over initial ore bodies in deposits of Elkon District. New complex technological method heap leaching of Au and U worked out for*

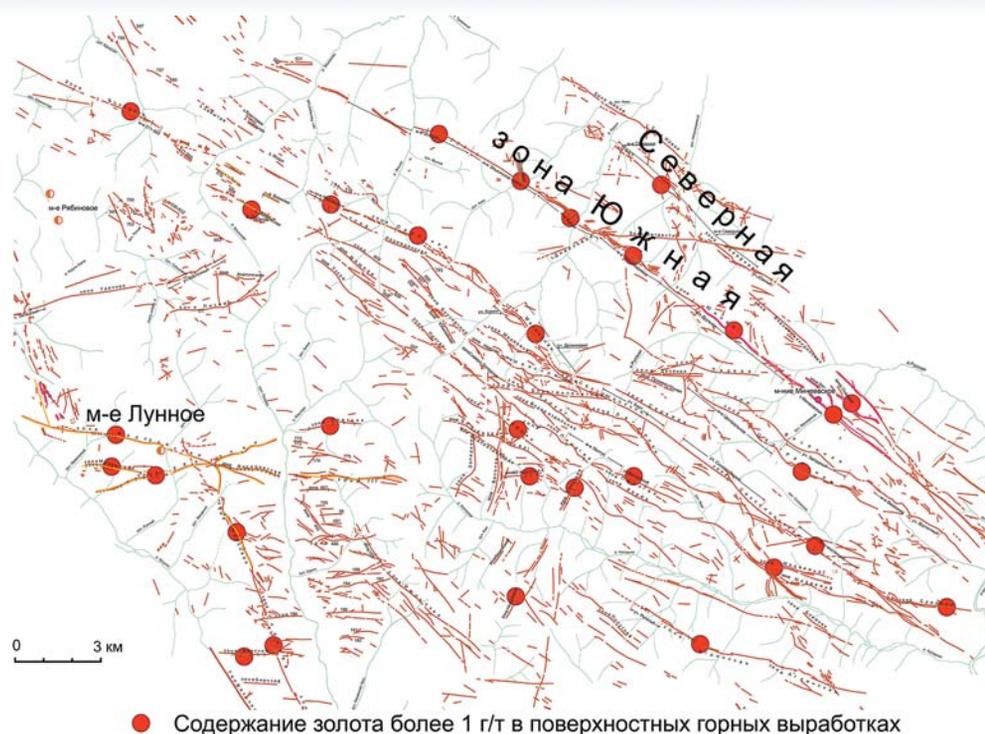
*this mineralization. Two technology sorts of ores revealed in Severnoe deposit: Au-Ag and Au-Ag with increased content of uranium. Au and Ag extracted from both sorts of method cyaniding. The uranium leaching weak sulfuric acid solution. The ore mining of open-pit and processing of heap leaching development of these deposits will create the new large-scale region. **Keywords:** Elkon, Severnoe, gold, uranium, technological sorts, heap leaching (HL).*

Эльконский урановорудный район расположен в крупном докембрийском выступе (горсте) Алданского щита. На площади около 3000 км<sup>2</sup> выявлено более 30 ураноносных тектоно-метасоматических зон (ТМЗ). В 13 из них установлены промышленные золотоурановые месторождения с общими запасами урана 342 тыс. т, средним содержанием урана 0,147 %, запасами золота 188,4 т (среднее содержание 0,8 г/т) и серебра 2448 т (10 г/т). На восточном фланге самой крупной рудной зоны Южная выявлены промышленные концентрации молибдена.

Промышленные урановые руды во всех ТМЗ не доходят до дневной поверхности на 100–300 м, что объясняется выносом урана из коры выветривания при окислении первичных золотоурановых руд. В приповерхностной части ТМЗ фиксируются главным образом забалансовые содержания урана и повышенные содержания золота (более 1 г/т). Распределение рудопроявлений золота, выявленное при опробовании поверхностных горных выработок, показано на рис. 1 [1]. В первичных золотоурановых рудах основным урановым минералом является браннерит, а золото концентрируется в пирите. В зоне окисления уран связан с вторичными минералами и реликтами браннерита, золото в виде наночастиц концентрируется в порообразующих минералах.

Ранее рудопроявления золота в коре выветривания ТМЗ не представляли промышленного интереса, но с применением нового для этого района способа кучного выщелачивания (КВ) они могут стать полноценными промышленными объектами, способными обеспечить создание нового золотопроизводящего центра на юге Якутии.

В 1962 г. при оценке одного из таких рудопроявлений в южной части Эльконского района в тектоно-метасоматической зоне Федоровская было выявлено месторождение Лунное, представленное новым типом золотоуранового оруденения, локализованного в зоне окисления, в котором основным полезным компонентом являлось золото, а уран являлся лишь попутным полезным компонентом. Разведка этого месторождения проводилась в 1969–1972 гг., в 2008 г. было образовано СП ЗАО «Лунное» артелью «Селигдар» и



**Рис. 1. Схема размещения рудопоявлений золота в Эльконском рудном районе**

АО «АРМЗ». Изучением технологии переработки руд занимался АО «ВНИИХТ». Было установлено, что из окисленных руд месторождения золото легко извлекается способом КВ. В 2008 г. СП приступило к опытно-промышленному освоению месторождения и впервые столкнулось с проблемой добычи урана. Лицензия была взята на разведку и добычу урановых руд и сопутствующих твердых полезных ископаемых. Техничко-экономические расчеты показали, что из-за низких содержаний добыча урана нерентабельна и было принято решение оставлять его в штабелях в качестве забалансовых руд.

Тематическая группа АО «ВНИИХТ», начиная с 2005 г., проводит исследования на пробах, отобранных из канав и керна буровых скважин, вскрывающих поверхностные рудопоявления золота в ТМЗ Южная, Северная, Надеждинская и др.; наиболее интересные результаты были получены по зоне Северная. Для оценки этой зоны на золото в 2006 г. нами был привлечен Алданский филиал «Якутгеология», который и выявил в приповерхностной части зоны месторождение золота. Разведка и вовлечение в эксплуатацию золотоуранового месторождения Северное будет первым шагом в освоении одного из крупнейших в мире Эльконского рудного района.

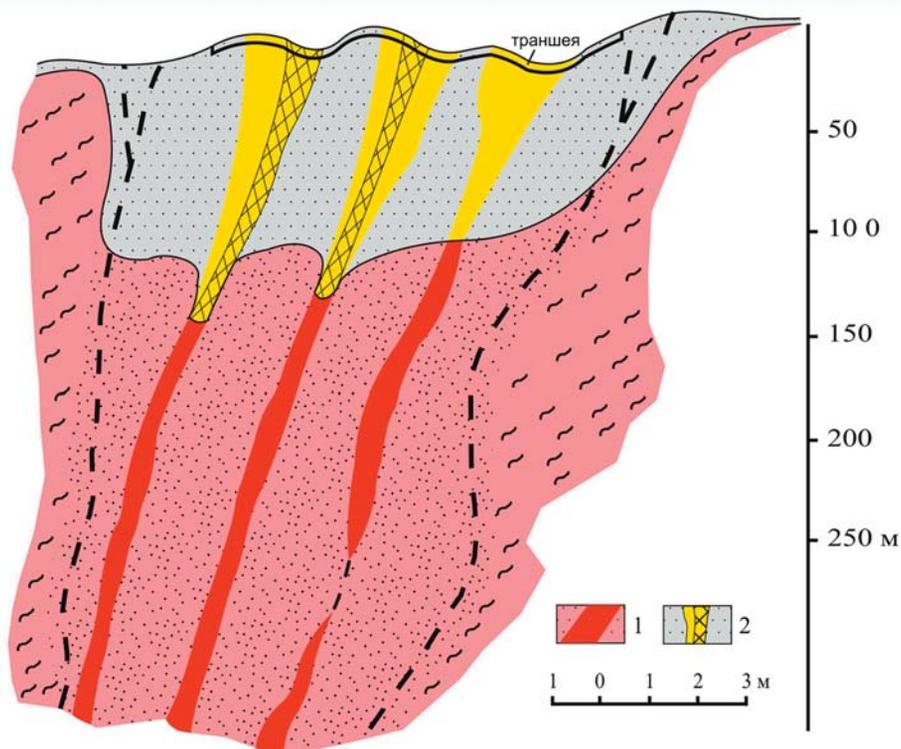
Одной из основных задач разведки месторождения Северное до глубины 150 м от поверхности является установление пространственного и количественного соотношения золота и урана и подсчет запасов

двух технологических типов окисленных руд: золотосеребряных безурановых и золотосеребряных, обогащенных ураном, которые будут обрабатываться по различным технологическим схемам.

Тектоно-метасоматическая зона Северная, вмещающая одноименное месторождение, проходит в 3 км севернее параллельно самой крупной рудной зоне района Южной. Протяженность зоны около 10 км, урановая минерализация установлена на восьмикилометровом интервале. Вмещающие породы: биотит-амфиболитовые гнейсы, мигматиты и лейкократовые граниты.

ТМЗ Северная представляет собой полосу северо-западного простирания шириной 10–20 м, в пределах которой проходит серия параллельных, сочленяющихся и ветвящихся разломов, сложенных древними blastokataklazitami. Часть этих разломов подновлена в мезозойское время и представлена катаклазитами и брекчиями, замещаемыми рудными пирит-карбонат-калишпатовыми метасоматитами. Выделено пять золотоурановых залежей, сложенных жильобразными рудными телами, приуроченных к отдельным тектоническим швам. Их мощность — от десятков сантиметров до 5–7 м. По вертикали рудные залежи прослежены более чем на 1500 м от поверхности. Промышленные рудные тела не доходят до дневной поверхности на 100–300 м, что объясняется выносом урана при окислении первичных золотоурановых руд. Зона окисления имеет сложное строение. По отдельным, хорошо проницаемым тектоническим швам, процесс окисления проникает до больших глубин (300–500 м), но наиболее интенсивно он развит до глубин 100–150 м, где охватывает по ширине всю ТМЗ (рис. 2).

На поверхности по бортовому содержанию золота 0,6 г/т оконтурена протяженная золоторудная залежь мощностью от первых до 14 м, в пределах которой фиксируются узкие жильобразные тела и линзы забалансовых урановых руд. К балансовым они не относятся из-за малой мощности (менее 2 м), содержание урана в них колеблется от 0,02 до 0,1 %. На восточном фланге месторождения на поверхности отсутствуют



**Рис. 2. Схематический разрез ТМЗ Северная:** 1 — первичные сульфидно-браннеритовые руды в рудной зоне; 2 — окисленные золото-урановые руды в зоне окисления

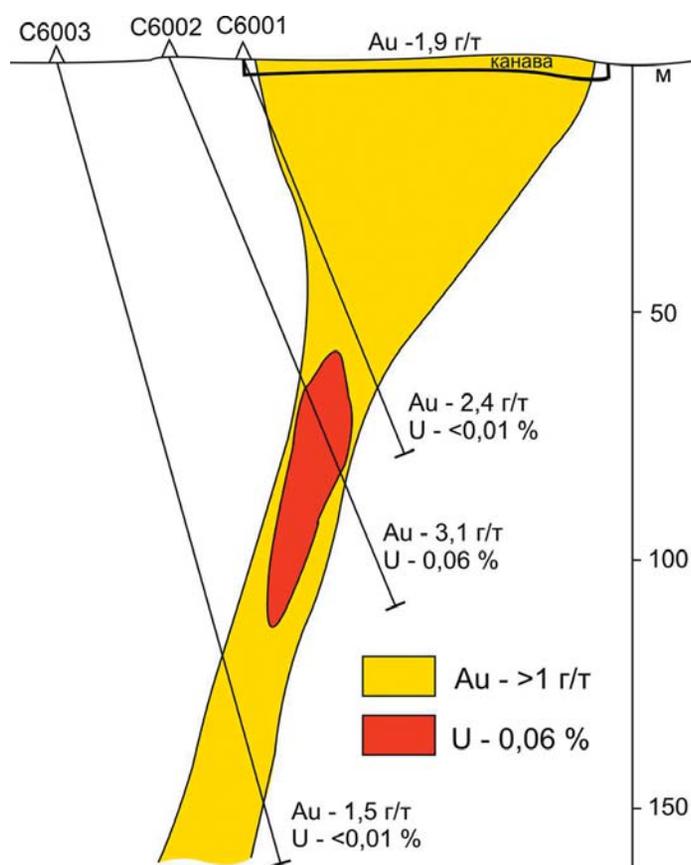
обогащенные ураном зонки, но скважины вскрывают линзы с содержанием 0,05–0,07 % урана (рис. 3).

На западном фланге, на отрезке ТМЗ протяженностью 500 м, в борздовых пробах из канав содержание урана достигает 0,07 %. В отдельных групповых пробах из керна буровых скважин содержание урана превышает 0,03 %. Среднее содержание урана по девяти пробам — 0,034 %, в четырех пробах более 0,06 %. Все эти данные свидетельствуют о возможности выявления крупных по размерам участков, обогащенных ураном, которые можно обрабатывать самостоятельно. На объединенной пробе с таких участков были проведены исследования по радиометрическому обогащению. Исходя из выходов продуктов обогащения, содержаний в них урана и золота, степени извлечения золота при цианировании и урана при кислотном выщелачивании, можно рассчитать объемы золота и урана, полученные при переработке 1 млн т каждого технологического типа руды (рис. 4).

Технико-экономические расчеты, проведенные ВНИПИпромтехнологии, построены на нескольких допущениях. Согласно проекту «Росатома», в год будет перерабатываться 2 млн т руды. Можно допустить — по 1 млн т каждого технологического сорта. Всего руды 17,9 млн т, среднее содержание золота 1,2 г/т, всего золота 20 707 кг. Содержание урана на обогащенных участках — 0,047 %. Извлечение урана — 75 %, золота — 85 %. Цена золота —

41,8 долл. США/г, урана — около 70 долл. США/кг. При существующем мировом дефиците природного урана цена на уран в ближайшие два года, по мнению российских и зарубежных экспертов, превысит 100 долл. США за 1 кг урана.

Общая выручка за золото и уран при отработке всего месторождения за 10 лет составит 65 млрд руб., эксплуатационные затраты — 43,5 млрд руб. Балансовая прибыль — 21,5 млрд руб., при этом выручка от урана составит 29,2 % от общей выручки. В результате детальной разведки в 2017 г. запасы золота на участке детализации протяженностью 350 м (между профилями 83–80) до глубины 150 м оценены в 1600 т, урана — 300 т. Стоимость урана составляет 31 % от общей стоимости золота и урана на участке детализации. Окупаемость



**Рис. 3. Схематический разрез по профилю 64 месторождения Северное**

всех затрат — 4–5 лет, рентабельность — 18,8 %. При годовой отработке штабеля обогащенных ураном руд, выручка от урана составит 44 % от общей выручки за золото и уран.

Приведенные данные по извлечению золота и урана являются ориентировочными, так как получены исходя из ряда предположений, однако они однозначно свидетельствуют о необходимости проведения при оценке месторождения минералого-технологического картирования с оконтуриванием двух технологических сортов руд.

Месторождение Северное разведывалось в 1979–1983 гг. Запасы урана утверждены Межведомственным совещанием по кат. С<sub>2</sub> в количестве 58,6 тыс. т при среднем содержании 0,149 %, золота — 29 т (0,7 г/т), серебра — 2447 т (10 г/т). Уран, как и на других месторождениях района, в первичных рудах связан с браннеритом, а золото — с пиритом. Месторождение золота выявлено в приповерхностной части месторождения Алданским филиалом «Якутгеология». Ресурсы золота по кат. Р<sub>1</sub> — 9597 кг, по кат. Р<sub>2</sub> — 42022 кг. Лабораторные технологические работы проводились АО «ВНИИХТ» и подтвердили высокое извлечение золота в режиме кучного выщелачивания.

В 2010–2014 гг. разведку центральной части месторождения проводило ЗАО «Русбурмаш» при участии АО «ВНИИХТ», в задачи которого входило изучение вещественного состава руд, проведение лабораторных работ по извлечению золота, серебра и урана и выделение технологических типов и сортов руд. В результате разведки в приповерхностной части месторождения было выделено семь подсчетных блоков с общи-

**Таблица 1**  
**Химический состав первичных и окисленных руд**

Компонент	Содержание, %	
	Первичные руды	Окисленные руды
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6	14,6
MgO	3,1	0,2
CaO	10,3	0,8
Na <sub>2</sub> O	0,5	0,6
K <sub>2</sub> O	6,6	10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	3,0	5,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +CaO+MgO	44	94

ми ресурсами по кат. Р<sub>1</sub> — 19 т золота при среднем содержании 1,1 г/т и 125 т серебра (7,1 г/т). В проекте ГК «Росатом» приведены уточненные данные: всего руды 17 937 тыс. т, золота 20 707 кг при среднем содержании 1,2 г/т.

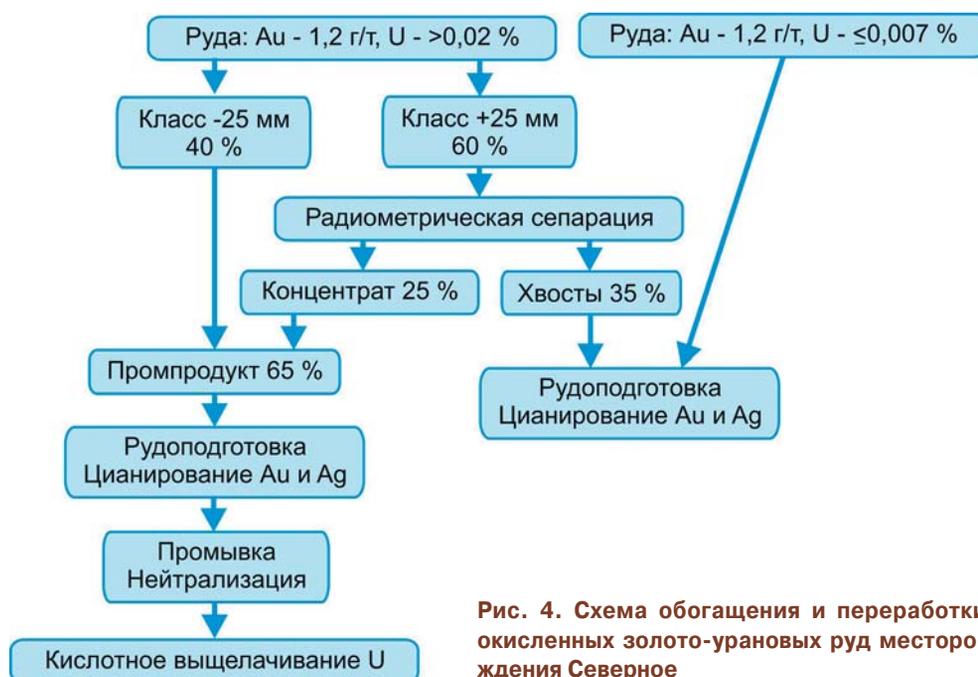
В первичных рудах основным урановым минералом является метамиктизированный браннерит, эпизодически в небольших количествах встречаются настуран и коффинит. Золото в первичных рудах концентрируется в коллоидно-дисперсных включениях в пирите.

В зоне окисления изменяются химический и минеральный состав руд, что приводит к изменению их технологических свойств. В результате окисления из руд выносятся оксиды кальция и магния (табл. 1), резко увеличивается отношение закисного железа к окисному, почти полностью исчезает сульфидная сера, увеличивается относительное содержание оксида алюминия, определяемое по формуле

$$\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3+CaO+MgO}$$

В первичных рудах этот показатель равен 40–50, а в окисленных 80–95. В окисленных рудах уменьшается количество карбонатов, пирита, хлорита и увеличивается количество глинистых минералов, гидрослюд и гидроксидов железа (табл. 2).

В зоне окисления сохраняются реликты браннерита, при его разрушении образуются анатаз и лейкоксен, отенит, ураноцирцит, тьюмунит, уранофан и урансодержащий лимонит. Пирит разлагается с образованием гидроксидов



**Рис. 4. Схема обогащения и переработки окисленных золото-урановых руд месторождения Северное**

Таблица 3

Результаты рационального (фазового) анализа на золото и серебро (данные Е.В. Овчаренко)

Форма нахождения благородных металлов	Окисленная руда				Полуокисленная руда			
	Au		Ag		Au		Ag	
	г/т	%	г/т	%	г/т	%	г/т	%
Свободная, легко цианируемая	1,79	85,2	7,2	42,6	0,56	70,9	3,11	36,0
Связанная с сульфидами	0,18	8,6	0,7	4,1	0,13	16,4	0,72	8,3
Связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца	0,03	1,4	0,5	3,0	<0,01	—	0,21	2,4
Связанная с силикатной матрицей	0,1	4,8	8,5	50,3	0,1	12,7	4,6	53,3
Всего в пробах	2,1	100	16,9	100	0,79	100	8,64	100

Таблица 4

Извлечение золота и урана из различных технологических типов и сортов руд способом КВ

Технологический тип	Сорта руд	Извлечение способом КВ, %	
		Au	U
I — первичные	Золото-урановые неокисленные	10–18	5–14
II — окисленные	1. Золото-урановый окисленный	90,6–96,8	75–85
	2. Золото-урановый полуокисленный	54–76	54–75
	3. Золотой окисленный	90–97	—
	4. Золотой полуокисленный	55–80	—

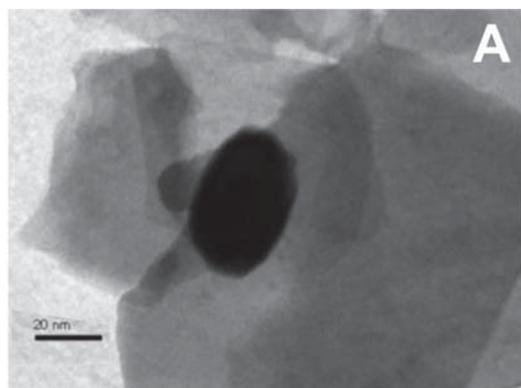
железа, самородное золото переотлагается в виде мельчайших включений в породообразующих минералах. В 2013 г. В.Т. Дубинчук (ФГБУ «ВИМС») в предоставленных ему образцах под просвечивающим электронным микроскопом выявил несколько частиц самородного золота. Микродифференциальным анализом (прибор BS-301 с микрозондовой приставкой) показал, что золото находится в виде частиц овально-эллипсоидной формы размером 10–20 нм (рис. 5).

Е.В. Овчаренко (АО «ВНИИХТ») на пробах из окисленных и полуокисленных руд показал, что в окисленных рудах 85,2 % золота находится в легко

цианируемой форме, а в полуокисленных — 70,9 % (табл. 3). Хорошую извлекаемость золота из окисленных руд показали и результаты исследований около двух десятков проб, отобранных из канав и керна буровых скважин. Исследования проводились в колонне диаметром 10 см при высоте слоя 80 см.

Капельный режим орошения материала крупностью 10 мм осуществлялся ежедневно с интенсивностью 0,5–0,6 л/сут. При цианировании опыты приостанавливали при снижении концентрации золота в продуктивных растворах до 0,1 мг/л. Время опыта — 28–30 сут. Расход NaCN — 1,2–1,5 мг/л, Ж:Т — 0,8–1,2. Извлечение золота из окисленных руд составило 90,6–96,8 %, из полуокисленных — 54–76 %.

На втором этапе рудный материал промывали и обезвреживали раствором гипохлорита натрия и подвергали выщелачиванию урана раствором серной кислоты с исходной концентрацией 20–10 г/л. За 20 суток проведения эксперимента (Ж:Т=1,3) извлечение урана



Б

Element	Weight%	Atomic%
Au	87.77 +/- 0.80	43.67
C	2.87 +/- 0.16	23.40
O	2.95 +/- 0.15	18.06
Fe	3.01 +/- 0.15	5.29
Si	1.27 +/- 0.10	4.44
Al	0.80 +/- 0.09	2.92
Mg	0.27 +/- 0.07	1.09
Ca	0.24 +/- 0.07	0.58
Ag	0.22 +/- 0.24	0.20
Totals	100.00	100.00

Рис. 5. Выделения частиц золота по результатам электронно-микроскопических исследований: А — фото частицы, Б — результаты энергодисперсионного анализа

в раствор из окисленных руд составило 75–87 % при расходе серной кислоты 16,2 кг/т, а из полуокисленных руд — 70 % при расходе серной кислоты 32 кг/т.

Проведенные исследования минерального и химического состава приповерхностных руд, а также лабораторные исследования по извлечению золота и урана способом КВ позволяют выделить два технологических типа руд: I — первичные, II — окисленные, а среди окисленных — четыре сорта руд по степени окисленности и содержанию урана (табл. 4).

Граница между окисленными и первичными рудами не является горизонтальной. Она, то узкими карманами опускается вдоль рудных тел до 200–300 м, то в виде диапиров воздымается почти до дневной поверхности. Точное ее положение можно определить по результатам технологического картирования и экспрессных лабораторных работ по извлечению золота из рудных проб в режиме КВ. Такая методика была опробована в АО «ВНИИХТ» при изучении месторождения Лунное. Для ускорения процесса цианирования пробы измельчаются до аналитической крупности, и пульпа активно перемешивается, что позволяет время анализа сократить до одних суток. Условные границы между первичными, полуокисленными и окисленными рудами устанавливаются по степени извлечения золота. Ориентировочно к окисленным рудам можно отнести пробы с извлечением золота более 80 %, к полуокисленным — 50–80 %. Эти значения уточняются при статистическом анализе всех результатов экспрессного анализа.

Результаты минералого-технологического картирования технологических типов и сортов руд и степени извлечения золота из рудных проб экспрессным анализом позволяют получить исходные данные к подсчету запасов золота, извлекаемого способом КВ, а оконтуривание частей рудных залежей, обогащенных ураном, определить запасы извлекаемого урана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов, В.Е. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) / В.Е. Бойцов, Г.Н. Пилипенко // Геология рудных месторождений. — 1998. — № 4. — С. 354–365.
2. Тарханов, А.В. Оценка потенциальной золотоносности линейных кор выветривания золотоурановых месторождений Эльконского урановорудного района / А.В. Тарханов, И.С. Постников, В.В. Казанцев, А.С. Салтыков, Г.И. Авдонин, А.А. Данилов // Уран: геология, ресурсы, производство: Тезисы третьего междунар. симпозиума — М., 2013. — С. 152–153.

© Коллектив авторов, 2020

Тарханов Алексей Владимирович  
Бугриева Елена Павловна // otdel-a@vniiht.ru  
Колпаков Геннадий Аркадьевич // kolpakgen@mail.ru  
Балакина Ирина Геннадьевна // lavrentievav@vniiht.ru  
Смагин Анатолий Петрович

**Широкова В.А. (Государственный университет по землеустройству, Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН)**

#### ХИМИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В МИНЕРАЛОГИИ И ВАСИЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ СЕВЕРГИН

*«Минералы — остатки тех химических реакций, которые происходили в разных точках земного шара; эти реакции идут согласно законам, нам известным, но которые, как мы можем думать, находятся в тесной связи с общими изменениями, какие претерпевает Земля как звезда».*

Из письма В.И. Вернадского жене (1888) [цит. по: 1].

*Статья посвящена научной деятельности русского минералога и химика, академика Императорской российской академии наук (с 1793 г.) В.М. Севергина — одного из основателей химического направления в минералогии. Его работы были весьма прогрессивными и в основном посвящены минералогии, неорганической химии, металлургии. Он впервые сформулировал (1798) понятие о парагенезисе («смежности минералов»). В научной деятельности продолжатель трудов М.В. Ломоносова видел в изучении минеральных сообществ не только путь к выяснению условий образования минералов, но и основу для научных поисковых прогнозов. **Ключевые слова:** В.М. Севергин, химическое направление, минералогия, химия, минеральные воды, минералогия природных вод.*

Shirokova V.A. (State University of Land Use Planning, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of Russian Academy of Sciences)

#### CHEMICAL DIRECTION IN MINERALOGY AND VASILY MIKHAILOVICH SEVERGIN

*The article is devoted to the scientific activity of the Russian mineralogist and chemist, academician of the Imperial Russian Academy of Sciences (since 1793) V.M. Severgin — one of the founders of the chemical field in mineralogy. His work was very progressive and mainly devoted to mineralogy, inorganic chemistry, metallurgy. First formulated (1798) the concept of paragenesis («adjacency of minerals»). In scientific activity, the successor of M.V. Lomonosov, seeing in the study of mineral communities not only a way to elucidate the conditions for the formation of minerals, but also the basis for scientific search forecasts. **Keywords:** V.M. Severgin, chemical field, mineralogy, chemistry, mineral waters, mineralogy of natural waters.*