УДК 552.4:552.2:553.411’495 (571.56)

А.В.ТЕРЕХОВ, *научный сотрудник*, *terekhov1985@gmail.com*
А.В.МОЛЧАНОВ, *д-р геол.-минерал. наук*, *заведующий отделом*, *anatoly_molchanov@vsegei.com*
В.В.ШАТОВ, *канд. геол.-минерал. наук*, *зам. генерального директора*, *vitaly_shatov@vsegei.ru*
Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского (*ВСЕГЕИ*), *Санкт-Петербург*
Е.В.ТОЛМАЧЕВА, *кандидат геол.-минерал. наук*, *старший научный сотрудник*, *helena.tolmacheva@yandex.ru*
Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук (*ИГГД РАН*), *Москва*

A.V.TEREKHOV, *research assistant*, *terekhov1985@gmail.com*
A.V.MOLCHANOV, *Dr. in geol. & min. sc.*, *head of department*, *anatoly_molchanov@vsegei.com*
V.V.SHATOV, *PhD in geol. & min. sc.*, *deputy director general*, *vitaly_shatov@vsegei.ru*
A.P.Karpinsky Russian Geological Research Institute (*VSEGEI*), *Saint Peterburg*
E.V.TOLMACHEVA, *PhD in geol. & min. sc.*, *senior reseach assistant*, *helena.tolmacheva@yandex.ru*
The Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences (*IPGG RAS*), *Moscow*

ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ФОРМИРОВАНИЯ РУДОНОСНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ ЭЛЬКОНСКОГО ЗОЛОТО-УРАНОВОРУДНОГО УЗЛА

Представлены результаты термобарогеохимических исследований газово-жидких включений в кварце двух типов рудоносных метасоматитов Эльконского золото-урановорудного узла. Показана эволюция флюида в процессе образования щелочных рудовмещающих метасоматитов, а также факторы рудоотложения.

***Ключевые слова*:** флюидный режим, рудоносные метасоматиты, газово-жидкие включения, Эльконский рудный узел, Южная Якутия

FLUID CHARACTERISTIC OF FORMATION ORE-BEARING ALTERATION ROCKS OF ELKON GOLD-URANIUM ORE CLUSTER

The results of thermobarogeochemical studies secondary gas-liquid occlusion in quartz of two types ore-bearing alteration rocks of Elkon gold-uranium ore cluster. The evolution of the fluid in the formation of ore-bearing alkali alteration rocks, and the factor of ore deposition.

***Key words*:** fluid characteristic, ore-bearing alteration rocks, gas-liquid occlusion, Elcon ore cluster, South Yakutiya

Эльконский золото-урановорудный узел расположен на северном фланге Алданского щита Сибирской платформы и входит в состав Центрально-Алданского горнопромышленного района Республики Саха (Якутия). По запасам урана данный узел является крупнейшим в России. В его рудоносных структурах – региональных зонах разрывных нарушений: Южная, Северная, Агдинская, Федоровская и др. – сосредоточено более 300 тыс.т достоверных запасов урана и около 600 тыс.т ресурсов данного металла. Запасы золота только по зоне «Южная», по оценкам разных авторов, варьируют от 140 до 190 т [1, 6].

В геологическом строении узла принимают участие метаморфизованные в гранулитовой фации гнейсы и кристаллические

сланцы архей-раннепротерозойского возраста, интрузии гранитоидов раннепротерозойского возраста, мезозойских щелочных и субщелочных пород, сформированных на этапе мезозойской тектоно-магматической активизации, а также терригенно-карбонатные и терригенные отложения вендкембрийского и юрского возраста.

Одной из характерных черт геологического строения Эльконского золото-урановорудного узла является широкое развитие в его пределах региональных разрывных нарушений северо-западного простирания, глубокого заложения и длительного (PR1 – Mz – Kz) геологического развития, являющихся основными рудоносными структурами региона. В их геологическом строении принимают участие производные динамометаморфизма (милониты и катаклазиты), дайковые тела метадиоритов и субщелочных пород, а также широкий спектр гидротермально-метасоматических пород, в том числе и рудовмещающих, различного петрохимического профиля, возраста, с разными температурами формирования. Со становлением интрузивных щелочных комплексов связано формирование метасоматических пород, которые накладывались и на более ранние образования.

Одной из основных задач исследования являлось определение физико-химических условий формирования щелочных рудоносных метасоматитов – гумбеитов. В пределах узла наблюдаются два типа гумбеитов – «эльконского» и «рябинового» типов. Гумбеиты «эльконского» типа (кварц-анкерит-ортоклазовые и кварц-альбит-хлоритовые с пиритом и браннеритом) являются рудовмещающими для золото-уранового оруденения и локализованы в осевых частях долгоживущих разломов. Гумбеиты «рябинового» типа (анкерит-серицит-мусковит-ортоклазовые и кварц-мусковит-анкерит-альбитовые со свободным золотом, связанным с вкрапленностью пирита, халькопиритом и блеклыми рудами) контролируют размещение золото-медного оруденения и связаны со становлением щелочных мезозойских интрузий.

Флюидный режим формирования гумбеитов «эльконского» и «рябинового» типов (36 образцов) изучался поэтапно на специально изготовленных из образцов метасоматитов двусторонне полированных пластинках толщиной 0,3-0,5 мм. Кроме того, исследовались петрографические особенности рудоносных гидротермально-метасоматических образований, включая последовательность образования минералов.

Первый этап заключался в визуальном изучении включений в минералах (в кварце, калишпате, адуляре, цеолитах и флюорите) под микроскопом (при увеличениях 250-1000), определении их генетического типа (первичного или вторичного) и фазового состава, отражающего типы минералообразующих сред. К первичным отнесены включения, равномерно распределенные во всем объеме минерала или приуроченные к зонам его роста. Они позволяют получить информацию об условиях кристаллизации включающих их минералов. Вторичные включения расположены в залеченных трещинках, секущих минералы, и, следовательно, несут информацию о наиболее поздних стадиях метасоматических процессов. На этом этапе определялось количество генераций минералов и намечались реперные включения для определения *PT*-условий разных стадий минералообразования.

На втором этапе определялись *PT*-условия захвата реперных включений. Для температур – методом гомогенизации включений с использованием термокамер фирмы «Leica»: низкотемпературной (до 350 °С) и высокотемпературной (до 1350 °С). Давления захвата включений минералообразующих сред рассчитывались двумя методами. В основном для определения давления использовались *PT*-диаграммы CO_2 с изолиниями плотности CO_2 [2]. Давление рассчитывалось по плотности CO_2, определяемой по температуре гомогенизации газа и жидкости и температуре полной гомогенизации водных газово-жидких включений, сингенетичных с углекислотными включениями. Дополнительно использовался метод определения давления по водно-солевым газово-жидким включениям, с концентрацией

Физико-химические условия формирования рудоносных гумбеитов «эльконского» и «рябинового» типов Эльконского золото-урановорудного узла

Гумбеиты	Породообразующие минералы				
	Ранний кварц (трещиноватый)	Поздний кварц (друзы и прожилки)	Калиевой полевой шпат	Сульфиды	Адуляр, гидрогетит, карбонат, флюорит, цеолиты
«Эльконского» типа	$\frac{410 - 300}{0,7 - 1,2}$	$\frac{290 - 200}{0,5 - 1}$	$\frac{245 - 120}{0,5 - 0,6}$	$\frac{175 – 162}{0,4 – 0,5}$	$\frac{135 - 140}{0,2 - 0,3}$ (адуляр), $\frac{85 - 110}{0,1}$ (цеолиты, гидрогенит), $\frac{95}{0,1}$ (флюорит)
«Рябинового» типа	$\frac{425 - 275}{0,9 - 2,5}$	$\frac{292 - 220}{0,8 - 0,9}$	$\frac{275 - 200}{0,3 - 0,6}$		$\frac{185 - 110}{0,3(< 0,6)}$

Примечание. В числителе – температура, °С, в знаменателе – давление, кбар.

NaCl более 25 % [3]. В зависимости от типов включений в минералах в ряде случаев определялись концентрации солей в гидротермальных растворах. Результаты исследований помещены в таблицу.

На основе полученных данных изучения вторичных включений в кварце из гумбеитов «эльконского» типа было установлено, что их формирование происходило в результате функционирования флюидной углекислотно-водно-солевой системы в постоянно изменяющихся физико-химических условиях. Судя по составу флюидных включений (рис.1), в начале процесса при $T = 400 \div 250$ °С их образование происходило в условиях кислотного флюида и сопровождалось интенсивным растворением кварца. Дальнейшее развитие процесса в температурном интервале от 250 до 150 °С привело к резкой смене условий на щелочные и, вероятно, восстановительные. Далее, по мере снижения температуры среда минералообразования становилась слабощелочной, вплоть до нейтральной и окислительной. Уменьшение температуры происходило на фоне снижающегося давления от 1,0-1,2 до 0,2-0,3 кбар. Рудные минералы кристаллизовались из раствора, по-видимому, в результате проявления двух разных процессов – отделения газовой фазы CO_2 от углекислотно-водно-солевого флюида при снижении давления и преобразовании гелей кремнезема, насыщенных рудными компонентами, в истинные растворы при охлаждении. Полученные выводы подтверждаются данными [5], установленными по вторичным включениям в кварцах гумбеитов месторождения Дружного (зона Южная), формирование которых происходило из калиево-натриевого-карбонатного флюида в среднетемпературных условиях. Как видно из диаграммы (рис.2), гумбеиты «эльконского» типа развивались в условиях закрытой или полузакрытой гидротермальной системы. Это может свидетельствовать о преобладающей роли дегазации флюида путем отделения углекислоты (с повышением pH) и, вероятно, удаления сероводорода, что приводило к распаду золотосодержащих гидросульфидных комплексов [4].

Для гумбеитов «рябинового» типа характерно брекчирование при температуре 310-370 °С в условиях активного воздействия флюидного потока, что вызвало разную ориентировку мелких обломков, дезинтеграцию и «окатывание» зерен минералов (признаки туффизитов). Флюид высококонцентрированный, щелочной, кипящий вследствие декомпрессии (рис.3). По мере выщелачивания флюид обогащался кремнеземом с другими компонентами и становился насыщенным, а затем «разгружался» в близповерхностных условиях. Поскольку насыщение флюида рудными компонентами обычно происходит раньше, чем кремнеземом, в порах и трещинах сначала отлагаются

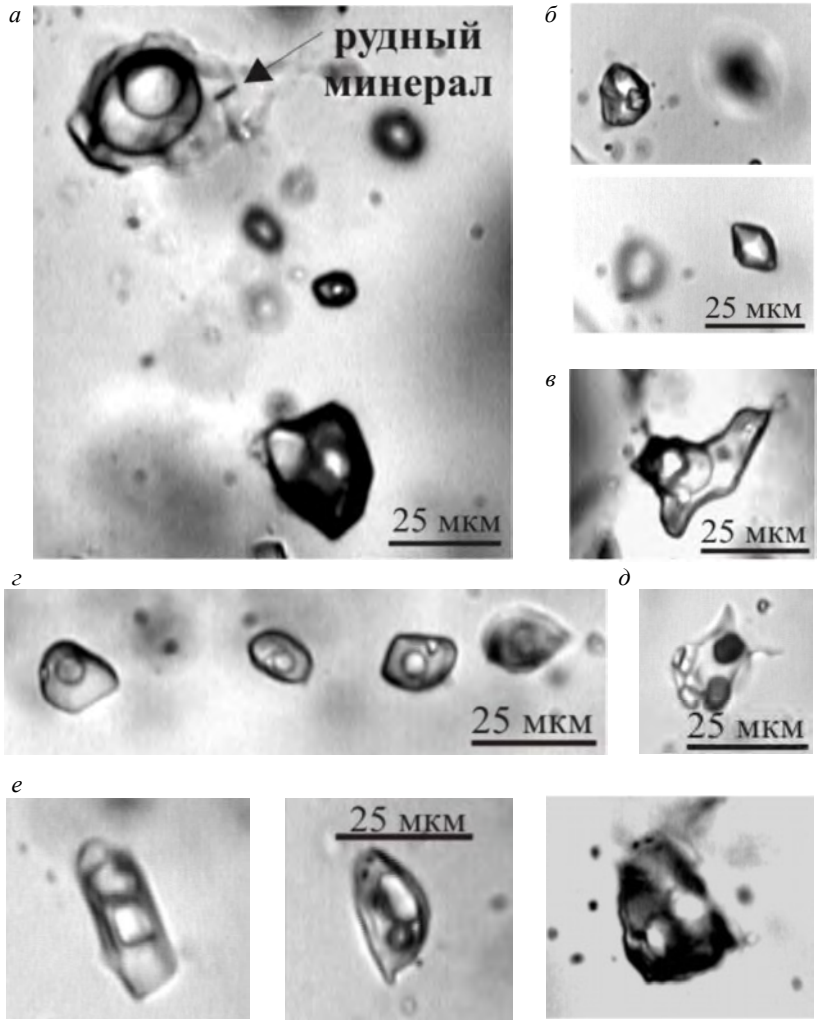


Рис.1. Флюидные включения в кварце гумбеитов «эльконского» типа: *а*, *б* – гетерогенный флюид, состоящий из сингенетичных включений высококонцентрированного водно-солевого флюида и включений газово-жидкой углекислоты (ув.1000); *в* и *г* – углекислотные газово-жидкие включения с кристаллическими фазами (ув.1000); *д* –вторичные водные, высококонцентрированные включения в кварце (ув.1000); *е* – первичное высококонцентрированное углекислотно-водно-солевое включение (ув.1000)

рудные компоненты в интервале температур 220-280 °С и давлении 0,8-0,9 кбар. Наиболее поздние образования представлены безрудным кварцем, образующимся при температуре около 160 °С, и флюоритом. Для гумбеитов «рябинового» типа характерны более широкие вариации условий формирования от закрытых гидротермальных систем к открытым (см. рис.2). Исходя из этого основным минерало- и рудообразующим фактором мог служить резкий перепад давления в процессе эволюции флюида под действием высокой тектонической активности.

Комплексное изучение рудоносных гумбеитов «эльконского» и «рябинового» типов позволило наметить общие закономерности их стадийного формирования в ходе единого гидротермального процесса.

Первая стадия образования начинается с мощного окварцевания (кристаллизации раннего кварца) при участии углекислотно-водного высококонцентрированного флюида (соли NaCl и KCl) в относительно нейтральных условиях при температурах 300-380 °С и давлении 1,5-1,0 кбар. По мере кристаллизации крупных зерен кварца растет щелочность флюида и концентрация солей может достигать 60-65 % объема включений в эквиваленте NaCl. На этой стадии CO_2 часто представлена двумя фазами: жидкой и газовой. Отсутствие железа во флюиде объясняется связанностью хлора с NaCl и KCl.

Вторая стадия связана с резкой декомпрессией и переходом всей CO_2 в газовую фазу. Этот процесс сопровождается кипением флюида и его разделением на существенно углекислотный газовый и существенно высококонцентрированный водный флюид. Соли во флюиде также представлены преимущественно NaCl и KCl. Расширение флюида при переходе всей CO_2 в газовую фазу сопровождалось трещиноватостью раннего кварца и кристаллизацией второй генерации кварца в трещинах и межзерновых пространствах в температурном интервале 230-280 °С и при давлении 0,7-1,0 кбар. На этой стадии образуется пористая текстура породы.

Третья стадия – это стадия кристаллизации полевого шпата. В результате увеличения щелочности флюида при дегазации

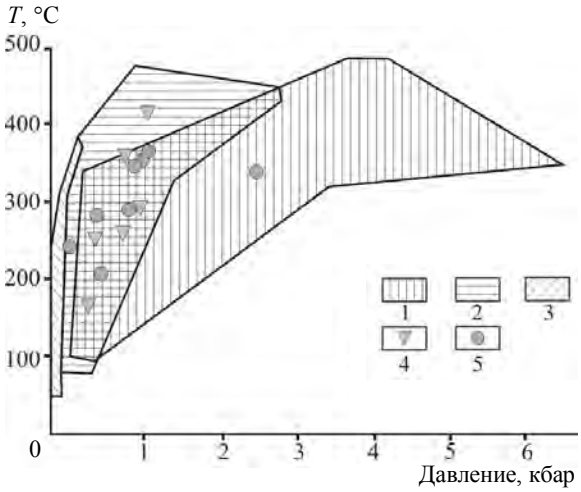


Рис.2. Положение гумбеитов различных типов на диаграмме полей существования гидротермальных систем [4]

1-3 – системы: 1 – открытые, 2 – полузакрытые, 3 – закрытые; 4, 5 – гумбеиты: 4 – «эльконского» типа, 5 – «рябинового» типа

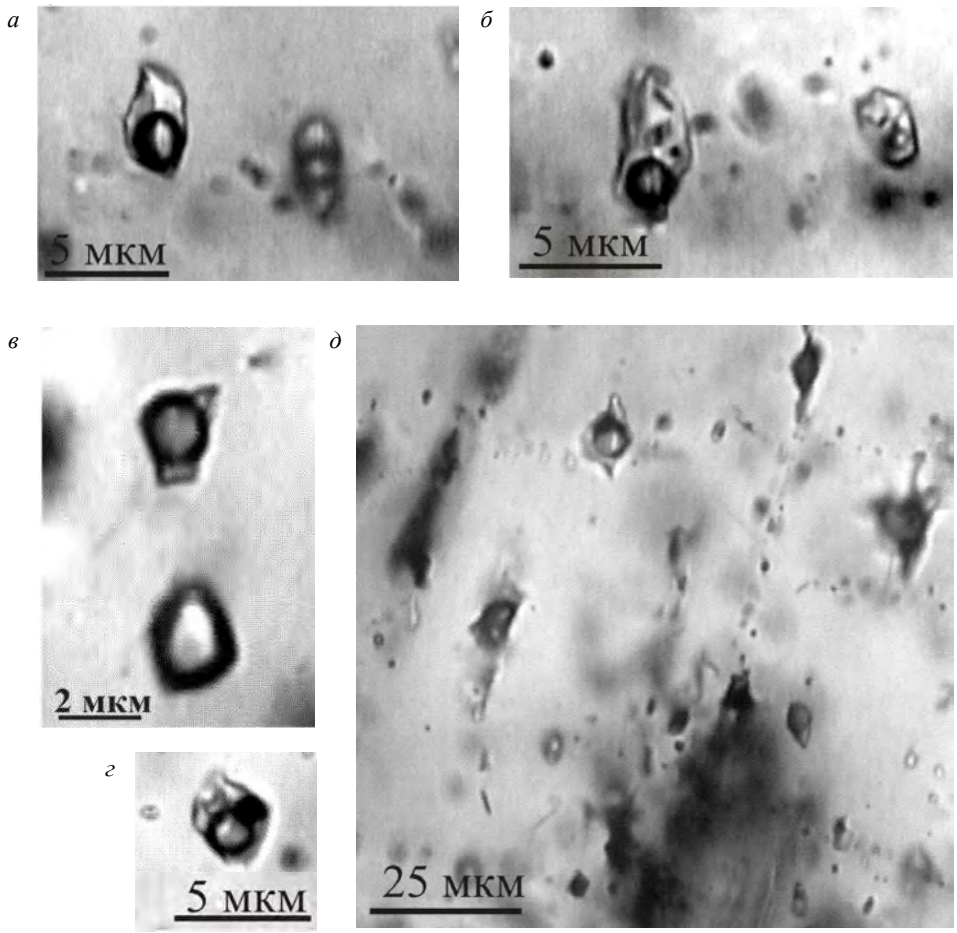


Рис.3. Флюидные включения в кварце гумбеитов «рябинового» типа: *а-г* – флюидные включения углекислотно-водно-солевого флюида, расслоенного в результате вскипания (ув.1000); *д* – проникновение флюида, формирующего гумбеиты, в более ранний кварц по трещинам (ув. 500)

(и концентрации хлоридов щелочей) кристаллизуется полевой шпат (адуляр?) в виде крупных зерен. Этот процесс может быть описан формулой

$$(NaCl + 0{,}5H_2O + 3SiO_2 + 0{,}5Al_2O_3)_{фл} =$$

$$= NaAlSi_3O_8 + HCl_{(фл)}.$$

Осаждение в твердые фазы калия и натрия в виде полевых шпатов вызывает повышение во флюиде концентрации HCl (повышению кислотности флюида), что, в свою очередь, приводит к разложению темноцветных минералов и насыщению флюида Ca, Mg, Fe. Таким образом, кристаллизация полевого шпата приводит к изменению кислотно-щелочных свойств флюида. Двуокись углерода на этой стадии представлена исключительно газовой фазой. Одновременно с кристаллизацией полевых шпатов также происходит выщелачивание кварца первой и второй генераций по межзерновым пространствам и по трещинам. Температурный интервал протекания третьей стадии исключительно широк: 150-280 °С и 0,4-0,7 кбар.

Четвертая стадия – это стадия отложения рудных минералов. Из флюида, насыщенного Ca, Mg, Fe, в трещинах и порах при относительно более высоких температурах и резком снижении давления происходит отложение рудных минералов (преимущественно сульфидов), а при понижении температур – и карбонатов в виде наложенной более поздней карбонатизации. Температурный интервал ее протекания 120-220 °С и $P < 0{,}4$ кбар. Флюид кислотный. Солевые фазы в нем – рудные минералы и карбонаты.

Пятая стадия проявлена в случаях, когда остаточный флюид еще содержит кремнезем и железо и из него кристаллизуется наиболее поздний низкотемпературный ($T \le 150$ °С) кварц (мелкозернистый, гранулированный) в порах, трещинах и межзерновых пространствах и гидроксиды железа. Флюид низкоконцентрированный, водный.

Исследования выполнены в рамках работ, проводимых совместно с ГУ ГГП РС (Я) «Якутскгеология» и корпорацией «САМЕСО» в пределах Эльконского золото-урановорудного узла в 2008-2012 годах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бойцов В.Е.* Оценка общей рудоносности Эльконского рудного узла и Центрально-Алданского рудного района в целом / В.Е.Бойцов, Г.Н.Пилипенко // Уран: ресурсы и производство: Тезисы Второго международного симпозиума / ВИМС. М., 2008. 136 с.

2. *Гончаров В.И.* Гидротермальное рудообразование в краевых вулканогенных поясах. М.: Наука, 1983. 215 с.

3. *Клевцов П.В.* Определение минимального давления образования кварца на примере кристаллов с Памира / П.В.Клевцов, Г.Г.Леммлейн // Зап. Всес. минерал. о-ва. 1959. Т.88. Вып.6. С.661-666.

4. *Мельников Ф.П.* Термобарогеохимия / Ф.П.Мельников, В.Ю.Прокофьев, Н.Н.Шатагин. М.: Академический проект, 2008. 224 с.

5. *Хитаров Д.Н.* Характер рудообразующих растворов месторождения Дружное (Эльконский урановорудный район на Алданском щите) по данным изучения флюидных включений в кварцах / Д.Н.Хитаров, А.К.Мигута // Геология рудных месторождений. 2003. Т.45, № 5. С.474-480.

6. *Шаталов В.В.* Новая концепция освоения резервных месторождений Эльконкого ураново-рудного района в Республике Саха (Якутия) / В.В.Шаталов, А.В.Тарханов, А.Л.Никольский // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2006. Вып.5. С.43-49.

REFERENCES

1. *Boicov V.E.*, *Pilipenko G.N.* Estimate of the total ore mineralization of Elkon ore cluster and Central Aldan ore district as a whole // Uranium: Resources and Production: Abstracts of the Second International Symposium / VIMS. Moscow, 2008. 136 p.

2. *Goncharov V.I.* Hydrothermal mineralization in the marginal volcanic belts. Moscow: Nauka, 1983. 215 p.

3. *Klevcov P.V.*, *Lemmlein G.G.* Determination of the minimum pressure on the example of the formation of quartz crystals from the Pamirs // Proceedings of the All-Union mineralogical Society. 1959. V.88. Iss.6. P.661-666.

4. *Melnikov F.P.*, *Prokof'ev V.U.*, *Shatagin N.N.* Thermobarogeochemistry. Moscow: Academ. Proect, 2008. 224 p.

5. *Khitarov D.N.*, *Miguta A.K.* Character of Ore-Forming Solutions in the Druzhnoe Deposit (the El'kon Uranium District in the Aldan Shield) Determined from Data of Fluid Inclusions in Quartz // Geology of Ore Deposits. 2003. V.45. № 5. P.474-480.

6. *Shatalov V.V.*, *Tarkhanov A.V.*, *Nikolsky A.L.* A new concept of developing stand by deposits in the Elkon uranium-ore region, the Republic of Sakha (Yakutia) // Mineral Resource of Russia. Economic and Management. 2006. Iss.5. P.43-49.