

Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И.,
Никитина Е.С., Прохоров Д.А., Нечелюстов Г.Н.,
Ружицкий В.В. (ФГУП «ВИМС»)

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РУД ВЕРШИННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Рассматриваются особенности минерального состава руд месторождения Вершинное. Приводится описание различных фаз урановой и сопутствующей минерализации в осадочных породах, гранитах и базальтах по результатам исследований детальными прецизионными методами. Сделан вывод о специфических условиях формирования руд. **Ключевые слова:** Вершинное месторождение урана, нингиоит, поликомпонентные гели, сероводородно-углекислые растворы.*

Tarkhanova G.A., Dubinchuk V.T., Chistyakova N.I., Nikitina E.S.,
Prokhorov D.A., Nechelustov G.N., Ruzhitskiy V.V. (FSUE «VIMS»)

THE UNIQUE FEATURES OF URANIUM ORES MINERAL COMPOSITION, GENERATION AND ACCUMULATION OF VERSHINNOYE DEPOSIT

*The uranium ores mineral composition of Vershinnoye deposit is described. Various phases of uranium and accompanying components mineralization in sedimentary rocks, granites and basalts is characterized according to results of research by detailed precision methods of analysis. The conclusion about the specific conditions of uranium ores generation and accumulation was made. **Key words:** Vershinnoye uranium deposit, ningyoit, multicomponent gels, sulfurous-carbonated solutions.*

Месторождение Вершинное расположено на южном фланге Амалатского плато базальтов в пределах Хиагдинского рудного поля (Северная часть Забайкалья), месторождения которого относятся к палеодолинному типу и могут отрабатываться методом подземного выщелачивания [2, 3]. Оно приурочено к палеодолине северо-восточного простирания на юго-восточном склоне Байсыханского поднятия. Рудоносная долина имеет один правый и три левых притока. Оруденение установлено как в основной долине, так и в правом широтном наиболее крупном притоке.

Урановое оруденение концентрируется в сероцветных хлидолитах и в песчаниках с линзами алевритов, выполняющих базальные части осадочного разреза неогена, слагающего палеодолины. Перекрываются осадочные отложения мощной толщей базальтов, состоящей из отдельных потоков.

Основная рудная залежь пластовой морфологии тяготеет к тальвеговым участкам палеодолин, вытягиваясь по простиранию более чем на 6 км. В наиболее погруженных частях палеодолин изредка отмечается урановое оруденение в дезинтегрированных гранитах фундамента, которое проникает на глубину 0,5–3,5 м от контакта с оруденелыми осадками. В ряде случаев повышенная гамма-активность установлена в гранитах вне связи с оруденением в осадках и обусловлена урансодержащей редкоземельной минерализацией в виде монацита, ксенотима и циркона. В единичном случае выявлен интервал с повышенной гамма-активностью в базальтах выше оруденения в осадках, вдоль крутопадающей тектонической зоны в верховьях широтного притока.

Оруденение в осадках. Изучение шлифов из рудных интервалов позволило установить, что в составе осадков широтного притока постоянно присутствует вулканический пепел; в осадках основной долины пепел наблюдается только в безрудных интервалах верхов разреза. Установленный факт позволяет говорить о разновозрастности рудовмещающих осадков и отнесении их к различным секциям стратиграфического разреза, с заполнением широтного притока более молодыми вулканогенно-осадочными отложениями.

Рудовмещающие осадки характеризуются крайней несортированностью грубозернистых пород со значительной долей обломков нижележащих гранитов среди достаточно рыхлой песчано-алевритовой, а иногда и чисто глинистой цементирующей массы. Макроскопически в оруденелых породах наблюдаются рассеянные растительные остатки и мельчайшая вкрапленность дисульфидов железа.

При микроскопическом изучении рудовмещающих осадков отчетливо наблюдается разложение растительных остатков с замещением их новообразованным глинистым минералом, который по составу и структуре отвечает маложелезистому монтмориллониту — смектиту. В его составе повсеместно фиксируется повышенное содержание углерода, вероятно, за счет пропитки

гуминовыми соединениями, что определило отнесение данного минерала к органосмектиту. В общем состав глинистой компоненты в рудовмещающих осадках довольно разнообразен, наряду с обычными переотложенными минералами из кор выветривания гранитов (каолинит, гидрослюда и частично монтмориллонит) в рудных образцах определяются смешанно-слоистые образования: каолинит-монтмориллонит и гидрослюда-монтмориллонит, а также галлузит и метагаллузит. Переотложенным минералам свойственен весьма дисперсный характер выделений, а новообразованные минералы формируют волокнистые агрегаты.

В оруденелых породах резко возрастает количество дисульфидов железа, при этом отмечается их приуроченность не к растительному детриту, а к глинистому цементу. Среди дисульфидов железа диагностируются пирит и марказит.

Новообразованные карбонаты не характерны для оруденелых осадков. Выше рудных интервалов в серых осадках карбонаты (сидерит, реже кальцит) обнаруживаются спорадически. Лишь в единичном случае интенсивная сидеритизация выявлена в рудном интервале в основной долине в виде маломощного интервала, где пирит-сидеритовым агрегатом сцементирован оруденелый песчаник. Брекчии с карбонатным цементом встречены в гранитном фундаменте, в безрудных осадках вблизи бортов палеодолин, а также в базальтах, что свидетельствует о тектонической приуроченности проявлений карбонатов в связи с деятельностью напорных углекислых вод, иногда с примесью сероводорода.

Весьма дисперсный характер урановой минерализации не позволяет изучать рудные минералы непосредственно в шлифах. Это обусловлено не только микронными выделениями уранового минерала, но и его высокой растворимостью. Большинство микрорадиографий к шлифам из проб с содержаниями урана в сотые доли процента даже при экспозиции 30 сут оказываются слабыми с вуалевидной засветкой над глинистым цементом.

Электронно-микроскопическое изучение урановой минерализации в большом количестве рудных образцов из осадков показало, что единственной диагности-

руемой урановой фазой является кальциевый фосфат U^{4+} , который имеет различную степень раскристаллизации: от полностью аморфных до достаточно хорошо раскристаллизованных разновидностей — нингиюита [1, 4]. Морфология выделений также весьма различная: от веретеновидных удлиненных кристаллоподобных выделений до образований без каких-либо кристаллографических очертаний, с которыми связаны повышенные концентрации Ce, Nd, Zr, Sr, Fe и S. Наряду с диагностируемой фазой значительная доля в составе рудной минерализации принадлежит аморфным многокомпонентным гелям, в составе которых присутствуют U, Ca, P, Fe, S, Si, Al, Zr, Sr, Ce, Ti. Во всех случаях в нингиюите и в поликомпонентных гелях установлено существенное количество углерода (рис. 1).

Широким распространением в оруденелых породах пользуются дисперсные ураносодержащие образования, которые не диагностируются электронно-микроскопическим методом. Они приурочены к глинистому, в основном новообразованному смектитовому цементу. При микрондовом исследовании многочисленные точечные определения химического состава глины наряду с высокими содержаниями Al и Si выявляют 1–3 % Fe и от $n \cdot 0,1$ до n % U. Анализы на углерод показали его среднее содержание в глине ~0,8 %, а также наличие гуминовой составляющей. Видимых растительных остатков в глине нет. На микрорадиографиях к шлифам таких пород происходит равномерная засветка пленки над всей глинистой составляющей породы, которая как бы равномерно пропитана ураном. Такая недиагностируемая форма урана, вероятнее всего, является сорбированной.

В глинистом цементе оруденелых пород наблюдается вкрапленность дисульфидов железа (пирит и марказит), а также стронцийсодержащий барит, гипс. Микрондовыми исследованиями зафиксированы достаточно высокие примесные содержания в сульфиде кобальта, никеля и редко мышьяка. Наряду с преобладающим марказитом в ураносодержащей глине выявляются округлые почковидные образования сульфата двухвалентного железа (рис. 2А), в котором определя-

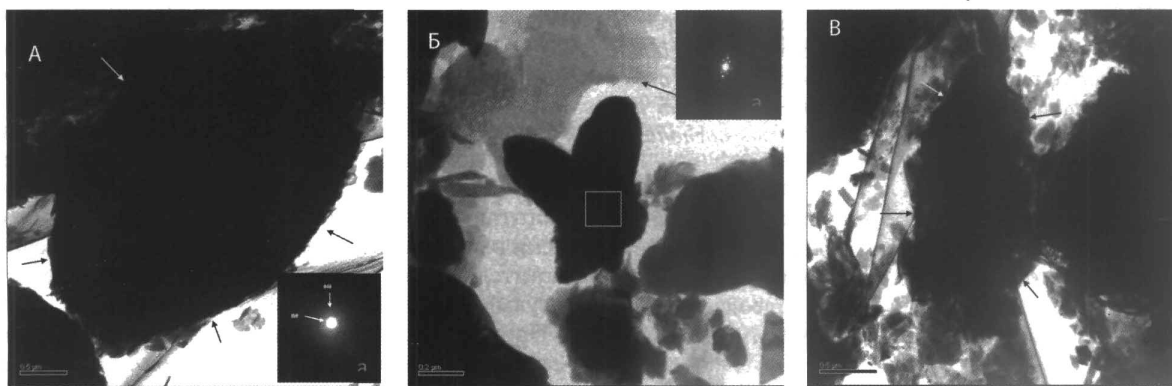


Рис. 1. Формы выделения и различная степень раскристаллизации кальциевого фосфата U^{4+} : А — веретеновидный слабо раскристаллизованный нингиюит с отдельными диффузными максимумами на МДК (а — монокристалльная МДК), с повышенными концентрациями Zr, Sr, Fe, S; Б — сросток веретена нингиюита, (а — монокристалльная МДК), с повышенными содержаниями Zr, Nd, Fe (стрелкой показано углеродистое вещество); В — контрастное аморфное многокомпонентное гелеподобное обособление, обогащенное U, P, Ca, Ce, Nd, Zr, Fe, S, Ti

Таблица 1

Результаты микрозондовых анализов мелантерита (1-3) и марказита (7) в ураноносной глине (4-6) (см. рис. 2А)

| Номер спектра | Na | Mg | Al | Si | P | S | K | Ca | Ti | Cr | Fe | Ni | U | O | Итого |
|---------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|--------|
| 1 | 0,32 | 0,37 | 6,75 | 7,82 | 0,18 | 9,25 | 0,27 | 0,16 | 0,19 | 0,46 | 10,24 | 0,58 | 0,68 | 34,95 | 75,21 |
| 2 | 0,26 | 5,30 | 0,26 | 0,41 | 0,00 | 17,90 | 0,13 | 0,09 | 0,00 | 0,11 | 16,22 | 1,22 | 0,25 | 36,19 | 78,34 |
| 3 | 0,29 | 6,50 | 0,37 | 0,49 | 0,02 | 18,93 | 0,06 | 0,28 | 0,00 | 0,03 | 16,37 | 1,03 | 0,28 | 38,77 | 83,43 |
| 4 | 0,13 | 0,25 | 12,45 | 14,27 | 0,32 | 0,48 | 0,27 | 0,24 | 0,19 | 0,65 | 2,93 | 0,16 | 0,89 | 30,27 | 63,52 |
| 5 | 0,12 | 0,41 | 10,73 | 12,33 | 0,47 | 0,71 | 0,15 | 0,41 | 0,22 | 0,69 | 2,73 | 0,11 | 1,83 | 27,28 | 58,18 |
| 6 | 0,12 | 0,43 | 13,59 | 15,39 | 0,29 | 0,60 | 0,23 | 0,21 | 0,22 | 0,35 | 3,02 | 0,07 | 0,80 | 32,64 | 67,95 |
| 7 | — | — | 0,91 | 0,95 | — | 53,04 | — | — | — | 0,16 | 43,72 | 0,79 | 0,43 | — | 100,00 |

ются высокие содержания магния (до 6,5 % — табл. 1), реже кальция, а из примесей — Co и Ni.

Взаимоотношения сульфата и сульфида железа однозначно показывают более позднее образование сульфида, в процессе выкристаллизации его из сульфата с потерей магния и некоторым уменьшением содержаний кобальта и никеля (рис. 2Б, табл. 2). Вокруг некоторых округлых сульфатов железа просматривается внешняя кайма, того же состава, но обогащенная U, P, Ca, Al и Si. Кайма явно более поздняя, чем окружающие нераскristализованные многокомпонентные ураноносные гели, вероятно, обусловленная переотложением урана (рис. 2В, табл. 3). Интересно отметить, что подобные шарообразные образования состава сера—железо с магнием и примесями кобальта и никеля установлены нами в измененных базальтах на месторождении Коретконда вдоль зон тектонических нарушений, с которыми связано проявление углекислых кальциево-магниевого восходящих поствулканических растворов.

Особенностью рудоносных осадков месторождения Вершинное является часто обнаруживаемая урановая минерализация в обломках гранитов и в зернах альбитизированных калиевых полевых шпатов. Детальными исследованиями выявлено, что это нингиоит различной степени раскristализации с высокими содержаниями урана, фосфора и кальция и примесями Fe, S, Sr и TR. Нингиоит в виде тончайших просечек и прожилков проникает в обломки. Отдельные крупные обломки гранитов содержат включения акцессорных минералов — монацита, циркона и ксенотима. В участках, где тонкие прожилки нингиоита пересекают скопления акцессорных минералов, в урановом минерале резко повышается содержание Ce, La, Y, Zr или даже возникают смеси с высокими содержаниями этих элементов и урана. Этот факт дает основание утверждать, что примесь редких земель и циркония в нингиоите обусловлена разрушением акцессорных минералов гранитов при взаимодействии их с ураноносным раствором. Именно эти разрушенные минералы характерны и для тяжелого шлиха в оруденелом песчанике.

Сравнение результатов изучения диагностируемой урановой минерализации в глинистом цементе осадков и в обломочной фракции песчаников констатирует их полную идентичность.

Обобщение результатов электронно-микроскопических исследований достаточно обширного количества образцов оруденелых осадков показывает весьма раз-

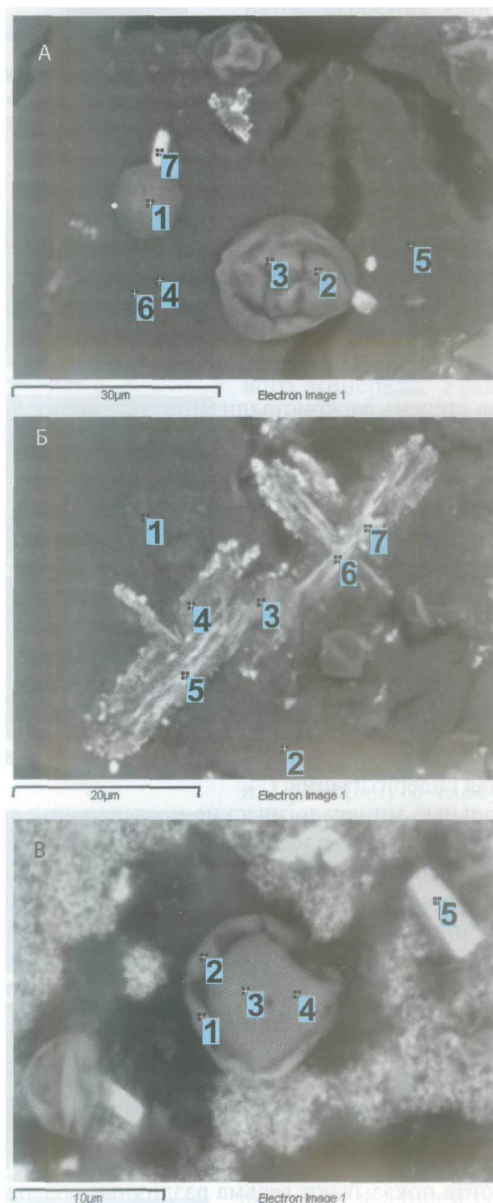


Рис. 2. Выделения магниевого сульфата железа — мелантерита (светло-серое) и марказита (белое) в ураноносной глине (темное) (изображение в обратно-рассеянных электронах): А — очковидные выделения сульфата железа и кристаллы марказита; Б — выкристаллизация марказита из сульфата железа; В — ураноносная кайма сульфата железа в глине с ураноносными гелями

Таблица 2

Результаты микрозондовых анализов урансодержащей глины (1-2), мелантерита (3-4) и марказита (5-7) (см. рис. 2Б)

| Номер спектра | Mg | Al | Si | P | S | K | Ca | Ti | Cr | Mn | Fe | U | O | Итого |
|---------------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|
| 1 | 0,28 | 11,25 | 11,56 | 0,49 | 0,78 | 0,15 | 0,31 | 0,40 | 2,46 | 0,04 | 3,35 | 1,70 | 27,92 | 60,69 |
| 2 | 0,28 | 8,71 | 10,48 | 0,66 | 0,78 | 0,24 | 0,45 | 0,18 | 0,45 | 0,00 | 3,39 | 2,30 | 23,73 | 51,65 |
| | O | Mg | Al | Si | S | Ca | Ti | V | Cr | Fe | Co | Ni | U | |
| 3 | 29,50 | 1,57 | 2,45 | 3,01 | 21,28 | 0,20 | 0,04 | 0,14 | 1,12 | 23,32 | 0,61 | 0,82 | 0,59 | 84,64 |
| 4 | 13,70 | 0,63 | 1,93 | 2,40 | 24,41 | 0,21 | 0,06 | 0,26 | 0,87 | 27,80 | 0,79 | 0,70 | 0,59 | 74,34 |
| 5 | 7,90 | 0,14 | 1,58 | 1,93 | 35,65 | 0,12 | 0,05 | 0,11 | 0,45 | 33,14 | 0,48 | 0,45 | 0,57 | 82,55 |
| 6 | 13,23 | 0,15 | 0,92 | 1,07 | 42,91 | 0,09 | 0,00 | 0,03 | 0,40 | 38,99 | 0,44 | 0,38 | 0,20 | 98,81 |
| 7 | 9,76 | 0,00 | 1,21 | 0,80 | 43,18 | 0,23 | 0,00 | 0,02 | 0,60 | 37,07 | 0,47 | 0,31 | 0,00 | 93,66 |

Таблица 3

Результаты микрозондовых анализов урансодержащей каймы у мелантерита (1, 2), мелантерита (3, 4) и марказита (5) (см. рис. 2В)

| Номер спектра | O | Mg | Al | Si | P | S | Ca | Cr | Fe | Co | Ni | U | Итого |
|---------------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|--------|
| 1 | 27,20 | 2,83 | 1,28 | 1,79 | 0,75 | 6,77 | 0,37 | 0,63 | 7,19 | 0,26 | 0,25 | 4,46 | 53,77 |
| 2 | 20,20 | 1,96 | 1,77 | 2,45 | 0,99 | 6,39 | 0,36 | 0,94 | 6,22 | 0,12 | 0,07 | 5,42 | 46,90 |
| 3 | 29,93 | 3,98 | 0,34 | 0,43 | 0,08 | 13,60 | 0,15 | 1,97 | 13,99 | 0,31 | 0,45 | 1,13 | 66,35 |
| 4 | 24,07 | 3,21 | 0,24 | 0,39 | 0,13 | 14,36 | 0,17 | 0,63 | 13,76 | 0,21 | 0,53 | 0,82 | 58,52 |
| 5 | 11,77 | 0,48 | 0,22 | 0,26 | 0,00 | 50,93 | 0,05 | 0,29 | 42,37 | 0,64 | 0,70 | 0,46 | 108,17 |

личную степень раскристаллизации основного уранового минерала — нингиюита. При этом установлено, что чем выше содержание урана в пробе, тем большее разнообразие структурного состояния нингиюита.

Наиболее слабобораскристаллизованные разности нингиюита с присутствием большого количества аморфных многокомпонентных гелей обнаруживаются в верховьях широтного притока в более молодой вулканогенно-осадочной пачке. Наиболее раскристаллизованные разности нингиюита, для которого характерны монокристалльная микродифракционная картина и кристаллографические формы выделения (рис. 1Б), установлены в образце, где проявлена интенсивная построудная сидеритизация.

Детальные минералогические исследования свидетельствуют о наличии нескольких разновидностей выделений урансодержащего вещества в осадках: а) недиагностируемая форма урана в виде пропитки глины, обогащенной углеродом; б) обособления в глине многокомпонентного урансодержащего геля; в) минеральная — с фазами урана различной степени раскристаллизации, представленная кальциевым фосфатом U^{4+} .

Переходы от «расплывчатых» выделений урансодержащих гелей к кристаллографически сформированным урановым минералам наблюдаются при микрозондовых исследованиях. Определение химического состава гелеобразных урансодержащих обособлений, а также нингиюита показывают весьма различные содержания в них как основных элементов — U, Ca и P, так и элементов-примесей. В преимущественном большинстве анализов нингиюита количества определяемого кальция и урана, пересчитанные на атомные проценты, показывают преобладание кальция над ураном с соотношениями Ca:U от 1,1:1 до 1,6:1. В составе нингиюита

постоянно присутствуют Ce, Sr, Fe и S, иногда отмечаются La, Zr, Ti. Содержания перечисленных элементов в нингиюите наиболее значительно варьируют при анализах образцов оруденелых пород из различных частей рудной залежи, что, вероятнее всего, обусловлено первичной неоднородностью рудомещающих осадков.

Оруденение в гранитах. Оруденелые дезинтегрированные граниты содержат в поровом пространстве плечные выделения уранового минерала. В одном из изученных образцов на поверхности вертикальной трещины под биноклем видна обильная вкрапленность округлых глобулярных урановых минералов.

Детальные прецизионные методы исследования уранового минерала показали, что он наблюдается в виде округлых стяжений (рис. 3А) на поверхности полевых шпатов и, согласно полученным энергетическим спектрам (РЭМ), в составе минерала выявляются высокие содержания U, P и Ca, а также Ce и Nd. При исследовании в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) на основании расшифровки микродифракционных картин определяется нингиюит разной степени раскристаллизации — от полностью аморфного до слабобораскристаллизованного (рис. 3Б). Наряду с нингиюитом на плоскости трещины обнаруживаются обособления полупрозрачного углеродистого вещества, очень слабо раскристаллизованного или аморфного, в котором в ряде случаев устанавливаются сростки, на МДК с которых проявлены диффузные точечные и точечно-кольцевые отражения нингиюита. Полученные спектры выделений углеродистого вещества с нингиюитом характеризуются постоянным присутствием повышенных содержаний U, P, Ca, Sr, Fe, S, Zr, Ce, Nd.

Микрозондовыми исследованиями оруденелой трещины с округлыми выделениями уранового минерала

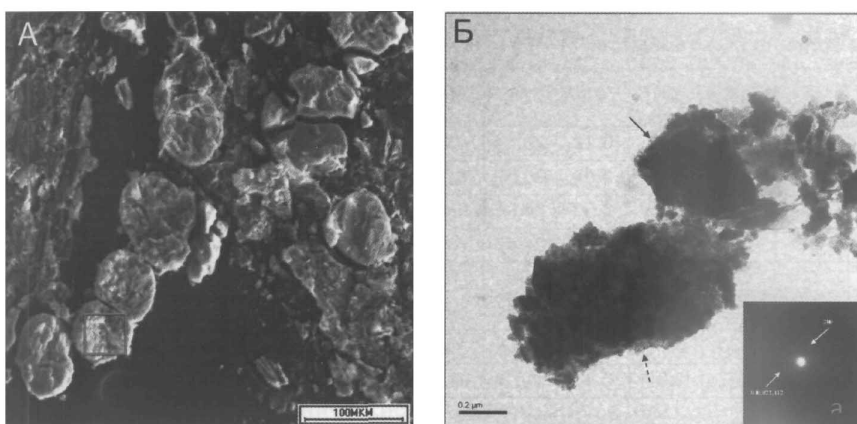


Рис. 3. Округлые почки нингиюита: А — полиэлементные почки в суспензионном препарате (РЭМ) (квадрат — поле определения состава); Б — агрегат выделений слабокристаллизованного нингиюита (стрелка), на МДК (а) которого проявлены диффузные точечно-кольцевые и кольцевые отражения, и аморфного кальциевого фосфата U^{4+} (пунктирная стрелка) (ПЭМ)

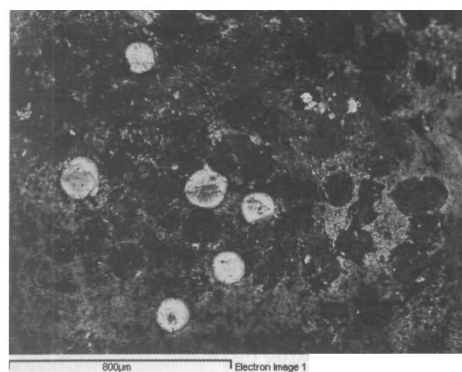


Рис. 4. Округлые стяжения нингиюита на плоскости трещины в граните (изображение в обратно-рассеянных электронах) и поля распределения элементов, полученные в характеристическом рентгеновском излучении

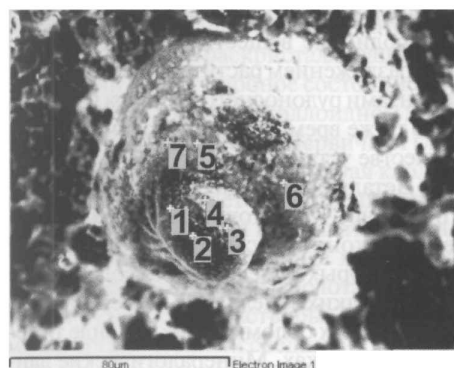
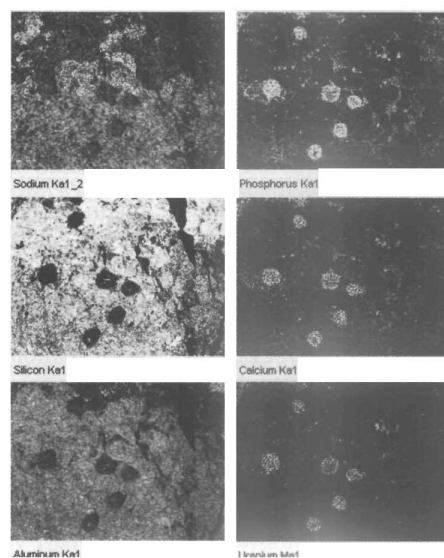
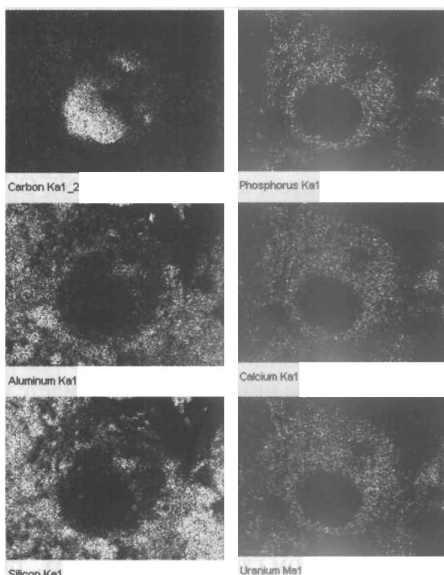


Рис. 5. Почка углеродистого вещества внутри глобулы нингиюита (изображение в обратно-рассеянных электронах) и поля распределения элементов, полученные в характеристическом рентгеновском излучении



при изучении площадного распределения элементов было выявлено полное совпадение полей распределения урана, фосфора и кальция (рис. 4), что подтверждало отнесение минерала к кальциевому фосфату урана, а не к его оксиду, хотя именно для последнего характерна глобулярная форма выделений.

При большем увеличении обнаруживается скорлуповатое строение глобуль с внешней корочкой, обогащенной углеродистым веществом (рис. 5, табл. 4). В ряде случаев округлые обособления минерала сложены агрегатом тесно прилегающих друг к другу мелких глобуль с внешней углеродсодержащей зоной. Обособления углерода округлой формы обнаруживаются и внутри глобуль уранового минерала. Урановый минерал как бы обволакивает углеродистую почку. Точечное определение химического состава уранового минерала — нингиюита — показало наличие в нем высоких содержаний редких земель и стронция. В составе углеродистого вещества обнаруживается присутствие цинка, при минимальных содержаниях серы (табл. 4), и низкие содержания Si, Al и U. Наряду с глобулами нингиюита по плоскости трещины наблюдаются и пленочные выделения уранового минерала. Определение химического состава пленок показало полную аналогию с нингиюитом. Вне анализируемой трещины в поровом пространстве гранитов также установлен пленочный аналогичный по составу нингиюит.

Полученные данные о форме выделения и составе минералов свидетельствуют о том, что урановая минерализация в гранитах формировалась растворами, просачивающимися из вышележащих осадков,

Таблица 4

Результаты микрозондовых анализов углеродистого вещества (1-4) и нингиоита (5-7) (см. рис. 5)

| Номер спектра | Mg | Al | Si | P | S | K | Ca | Fe | Zn | U | O | - | - | - | - | Итого |
|---------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,00 | 1,56 | 1,92 | 0,25 | 0,08 | 0,19 | 0,11 | 0,14 | 28,64 | 0,32 | 11,21 | - | - | - | - | 44,43 |
| 2 | 0,00 | 0,32 | 0,34 | 0,00 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 25,67 | 0,29 | 7,10 | - | - | - | - | 33,89 |
| 3 | 0,09 | 0,31 | 0,34 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,05 | 0,00 | 24,96 | 0,11 | 7,01 | - | - | - | - | 33,00 |
| 4 | 0,00 | 0,78 | 1,00 | 0,14 | 0,09 | 0,02 | 0,08 | 0,06 | 24,49 | 0,42 | 8,25 | - | - | - | - | 35,33 |
| | Mg | Al | Si | P | S | Ca | Fe | Zn | Sr | La | Ce | Pr | Nd | U | O | |
| 5 | 0,24 | 0,44 | 0,53 | 12,29 | 0,20 | 9,22 | 0,08 | 0,34 | 1,78 | 1,51 | 4,04 | 0,48 | 1,96 | 29,30 | 26,75 | 89,17 |
| 6 | 0,45 | 0,92 | 1,06 | 12,83 | 0,14 | 9,30 | 0,24 | 0,12 | 1,82 | 1,29 | 3,80 | 0,16 | 1,33 | 30,91 | 28,53 | 92,91 |
| 7 | 0,34 | 1,16 | 1,51 | 12,09 | 0,13 | 8,87 | 0,07 | 0,18 | 1,72 | 1,62 | 4,03 | 0,25 | 1,57 | 27,92 | 27,72 | 89,17 |

и сопровождалась отложением нингиоита. В процессе рудоотложения раствор, по-видимому, имел коллоидный характер и содержал значительные количества углеродистого вещества. Важно отметить, что непосредственно в выделениях углеродистого вещества уран не концентрируется, а формируется его самостоятельная минеральная фаза. В ряде случаев в оруденелой трещине определен дисульфид железа с повышенными содержаниями Co и Ni.

Оруденение в базальтах. В верховьях широтного потока скважиной вскрыты два интервала с повышенной гамма-активностью, приуроченной к вертикальным трещинам в оливин-пироксеновых базальтах. Плоскости трещин выполнены грязно-зеленовато-серыми глинистыми минералами. По данным рентгенофазового анализа они представлены галлуазитом, метагаллуазитом, монтмориллонитом и их смешанно-слоистыми образованиями. В составе глины присутствуют сульфиды и сульфаты железа и гипс. Макроскопически вдоль трещины прослеживается полоса мощностью до 0,5 см осветления базальта до почти белого цвета с отдельными горизонтальными белыми тонкими полосками в сторону осветленного до серого цвета базальта. При удалении от трещины на 2,5–3 см базальты не измененные, черного цвета. Белые базальты представляют собой изотропную глинистую массу с отдельными реликтами лейст плагиоклаза и включениями оксидов титана, сульфидов и сульфатов железа и барита. В промежуточной серой зоне отмечается обилие выделений сидерита и кальцита и смена глинистой массы на изотропное вулканическое стекло.

Гамма-активность приурочена к зоне измененных базальтов. Описанная зональность явно тяготеет к тектоническому нарушению и отражает последовательность выделения новообразованных минералов: сидерит + кальцит → глинистые минералы + сульфаты и сульфиды железа + барит. Электронно-микроскопическим методом в измененных базальтах обнаружены слабобаскристаллизованные нингиоиты и полностью аморфные поликомпонентные гели. В составе нингиоита и гелей выявляются примеси Fe, S, Ce и C, а также Ti, Cr и Mg — элементы базальтовых пород. В породе определены апатит, анатаз и пирротин. Микрозондовое исследование подтвердило кальций-фосфор-урановый состав рудного минерала. Основная масса урансодержащего вещества распределена в межзерновом глини-

стом пространстве измененного базальта; оно термонеустойчиво, интенсивно горит под электронным лучом.

В единичных случаях урансодержащее вещество располагается на кристаллах анатаза, основная же масса определяемого нингиоита находится в тесной пространственной связи с сульфидом железа в глинистой массе. Сульфид железа обогащен кобальтом и никелем и диагностирован как пирротин. Связи с новообразованными карбонатами не просматривается. Проявление же сульфидов железа, обогащенных Co и Ni, не сопровождающихся повышением гамма-активности, обусловлено поствулканическим углекисло-сероводородным процессом, следы которого установлены в гранитах, осадках и базальтах. Тектоническое нарушение, вскрываемое скважиной, контролирует новообразования этого процесса, и, вероятнее всего, проходя через оруденелые осадочные породы, растворы переоткладывают урановую минерализацию на незначительное расстояние вверх в базальты, которые интенсивно обелены и содержат новообразованные глинистые минералы, карбонаты и сульфиды железа.

Таким образом, суммируя все полученные данные по детальному изучению минералогии рудных образцов из керна скважин, включая основной песчаный рудоносный горизонт и оруденение в гранитах фундамента и перекрывающих базальтах, можно констатировать, что рудоносный раствор в месте отложения урана содержал растворимые углеродистые вещества, возникновение которых связано с разложением растительной органики. Основными элементами рудоносного раствора являлись U, P, Ca, Fe и S. В то же время в руде в незначительном примесном количестве установлены Sr, Ce, La, Y, Zr, а также Ni, Co, Zn. Детальными минералогическими исследованиями показано, что источником редкоземельных элементов и циркония служили разрушающиеся граниты, в составе которых отмечены урансодержащие цирконы и фосфаты редких земель. Эти минералы присутствуют как в гранитных обломках, так и в виде тяжелого шлиха в рыхлых осадках. Минералогические данные свидетельствуют, что рудоносный раствор обладает способностью частично разлагать эти аксессуарные минералы и переводить в раствор слагающие их элементы.

Источник халькофильных и сидерофильных элементов (Co, Ni, Zn, а также As), по-видимому, иной и связан с пострудным вулканизмом. Как в перекрывающих базальтах, так и в новообразованиях поствулканиче-

ских процессов устанавливаются повышенные концентрации этих элементов. На Вершинном месторождении эти элементы обнаруживаются в руде не только в сульфидов, но и в магнезиевых сульфатах железа типа мелантерита, которые формировались раньше сульфидов. Учитывая, что выпадение сульфатов возможно лишь при высокой кислотности растворов, можно предполагать, что такие условия и создавались при разложении органических остатков, сопровождающемся образованием гуминовых или других органических кислот. Процесс разложения растительных остатков отчетливо наблюдался нами в шлифах. В эту обстановку (высокая кислотность и низкий окислительный потенциал), вероятно, поступали поствулканические сероводородно-углекислые восходящие растворы с повышенными содержаниями Fe, Mg, Ca, а также S, Co, Ni, Zn, As. Принимая во внимание значительное количество органического углерода во вмещающих породах для создания восстановительной обстановки, постепенно возникали условия для перехода сульфатов в сульфиды — пирит и марказит. А в базальтах появляется пирротин, обогащенный кобальтом и никелем, обнаруженный в измененных базальтах и в безрудных участках.

Кислая обстановка в рудовмещающих осадках не обеспечила условий для отложения карбонатов, в связи с чем рудные интервалы почти повсеместно бескарбонатные, хотя в окружающих породах, особенно в вышележащих песчаниках, выделения сидерита обычны, хотя и не обильны.

Детальные минералогические наблюдения позволяют достаточно однозначно прийти к заключению, что новообразования поствулканического процесса осаждаются в породы, где глинистая составляющая осадков уже пропитана органическими кислотами и ураном. Этот уран попадал в осадки на начальных этапах рудообразования и привносился кислородными грунтовыми водами, поступающими преимущественно с бортов долин, в меньшей степени с верховьев, из кор выветривания высококларковых по урану гранитов. Вначале уран сорбировался на поверхности обогащенной углеродистым веществом глины, а когда адсорбировалось достаточное количество урана, происходила последовательная раскristаллизация вещества. Форма выделений и гелеподобное состояние первичных накоплений урана говорит о коллоидном характере раствора в местах рудоотложения. Первичная глинистая составляющая осадков, представленная каолинитом и гидростлюдой, претерпевает существенное преобразование, в ее составе появляются галлуазит, метагаллуазит и монтмориллонит — характерные минералы кислых почв, богатых органическими кислотами.

Эти рудоносные растворы, богатые воднорастворимыми органическими соединениями и ураном, проникали и в нижележащие трещиноватые граниты, и в обломки гранитов в рудоносных осадках. Учитывая, что условия среды при рудоотложении были достаточно кислыми, отложение урана в оксидной форме едва ли могло происходить. По-видимому, не было и условий для полного восстановления урана до четырехвалентного состояния на начальном этапе отложения нераскristализованных гелей, и только постепенно при

раскristаллизации в восстановительной среде мог образовываться сложный урановый минерал с U^{4+} и анионной фосфатной составляющей. Формирование коффинита также маловероятно в связи с отсутствием миграции кремния в кислой обстановке.

Источник фосфора для нингиоита, вероятно, иной чем источник урана (высококларковые граниты). Можно отметить, что повышенное количество фосфора устанавливается в растительных остатках, в том числе и на безрудных участках.

Описанные предположения об условиях формирования специфических урановых руд месторождения Вершинное, вероятно, всего, отвечают условиям низинных болот, развитых вдоль тальвегов распадков (долин) и содержащих многочисленные обломки гранитов с достаточной крутизны бортов. В эти заболоченные участки с застойным характером вод поступали кислородные грунтовые урансодержащие растворы. Поствулканические термальные растворы способствовали раскristаллизации урансодержащих многокомпонентных гелей и обогащали руды сульфатами и сульфидами железа с повышенными содержаниями Co, Ni, Zn, As. Вдоль открытых трещин эти напорные сероводородно-углекислые растворы, заимствуя уран из оруденелых осадков, отлагали его в измененных осветленных базальтах на незначительном удалении вверх по разрезу от основных рудных залежей в осадках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дойникова О.А. Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза. — М.: Физматлит, 2012.
2. Ильичев А.В. Некоторые особенности уранового оруденения Витимского плоскогорья (Забайкалье) // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. — 1982. — Вып. 73. — С. 130–137.
3. Лучинин И.И., Пешков П.А., Дементьев П.К. и др. Месторождения урана в палеодолинах Зауралья и Забайкалья // Разведка и охрана недр. — 1992 — № 5. — С. 12–15.
4. Митрофанов Е.А., Рогова В.П., Аввакумов В.В. и др. Минералогическо-геохимические особенности неогенового уранового месторождения Источное (Амалатское плато базальтов) // Изв. Иркутского гос. ин-та. Сер. наука о земле. — 2010. — Т. 3. — № 2. — С. 126–137.

© Коллектив авторов, 2014

Тарханова Галина Александровна // baskam@bk.ru
Дубинчук Виктор Тимофеевич // vicdubinчук@mail.ru
Чистякова Наталья Ильинична // chist3000@mail.ru
Никитина Екатерина Сергеевна // nikitina@vims-geo.ru
Прохоров Данила Артемович // prokhorov@vims-geo.ru
Нечелюстов Георгий Николаевич // nachelyustov@yandex.ru
Ружицкий Владимир Васильевич // ruzhvl@yandex.ru