УДК 553.2:553.495:553.4936:553.04:553.078 DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-107-123

Полигенное уран-торий-редкоземельное оруденение Приполярного Урала: история открытия и вопросы генезиса

Карагодин С. С.1*, Карагодин В. С.1, Хасанова Г. Г.1

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия *e-mail: sfen80k@mail.ru

Реферат

Актуальность работы обусловлена необходимостью анализа разнообразных источников и авторских наблюдений для формирования представлений о генезисе весьма своеобразного полигенного уран-торий-редкоземельного оруденения Приполярного Урала, что позволит провести оценку перспектив и направления дальнейшей добычи и переработки. Результаты исследования будут способствовать более рациональному и эффективному направлению дальнейших геологических изысканий. Цель работы— на фоне истории открытия и с использованием данных, полученных при комплексном исследовании уран-торий-редкоземельного оруденения в конгломератах зоны регионального структурно-стратиграфического несогласия, провести интерпретацию результатов, определить черты генезиса оруденения и показать его дальнейшие перспективы.

Результаты. Уточнена геологическая позиция редкометалльных конгломератов, определена их принадлежность не к докембрийской, а к раннепалеозойской эпохе. Рассмотрен вопрос отсутствия генетической связи фиксируемого в зоне структурностратиграфического несогласия золотого оруденения с полигенным уран-торийредкоземельным. В связи с дефицитом редких земель показана промышленная значимость уран-редкоземельных комплексных руд, добыча которых возможна с применением современных технологий кучного выщелачивания.

Выводы. Рассмотрена история исследования уран-торий-редкоземельного оруденения Приполярного Урала, которое, по мнению авторов, имеет полигенный генезис, формируется в последовательные стадии осадочного, метаморфогенного и гидротермального процессов. Предложена гипотеза гидрогенного гидротермального рудообразования в условиях регионального метаморфизма как альтернатива магматогенному происхождению гидротермальных рудных расплавов, что определяет необходимость новых подходов в оценке орудения. Промышленная ценность оруденения определяется наличием метамиктных, гидратированных, легко растворимых минералов — носителей урана и редкоземельных элементов, что предполагает возможность применения современных технологий добычи.

Ключевые слова: конгломераты; структурно-стратиграфическое несогласие; уран; редкие земли; уран-торий-редкоземельное месторождение; кучное выщелачивание; гидрогенное гидротермальное рудообразование; магматогенное рудообразование; металлогения.

Благодарность. Авторы приносят благодарность А. Б. Халезову за предоставленный эскиз, который является наглядной иллюстрацией модели зависимости металлогенической специализации гидрогенного оруденения от особенности состава денудированных кор выветривания, а также выражают признательность геологу А. К. Кутовому и др., внесшим свой вклад в графическое оформление этой модели.

Введение. В настоящее время в связи с возрастающим интересом к внедрению в атомной энергетике мини-АЭС, а также с постоянным дефицитом необходимых в радиоэлектронике, космонавтике и многочисленных других отраслях промышленности редкоземельных металлов возникает потребность в исследова-

нии новых потенциально перспективных территорий, освоение которых могло бы обеспечить прирост требующегося минерального сырья. Одним из таких районов локализации уран-торий-редкоземельного оруденения является горная часть Приполярного Урала, занимаемая гранитоидным массивом Мань-Хамбо.

В предлагаемой статье рассматривается нетривиальная особенность открытия радиоактивного оруденения, учтены итоги геологических, геофизических, минералогических и технологических исследований, изложено современное представление о генезисе уран-торий-редкоземельного оруденения в конгломератах зоны Мань-Хамбо. Авторы предполагают, что результаты их труда будут полезны при планировании и осуществлении дальнейших поисковых и разведочных работ, направленных на расширение горнопромышленных перспектив северного фрагмента Уральского региона.

История открытия оруденения и результаты исследований. К моменту развертывания первичных радиометрических поисков уранового оруденения на Урале, а это было начало второй половины XX века, ранее интенсивно развивавшийся в мире «урановый бум» в СССР уже успешно заканчивался, поскольку открытие на его территории двух урановорудных провинций и трех крупных рудных районов создало базу для обеспечения страны стратегическим урановым сырьем [1].

Начало поисков урановых руд на Урале предпринято Шабровской экспедицией 1-го Главного геологоразведочного управления МГиОН СССР с помощью аэрорадиометрической съемки масштаба 1 : 25 000. В 1954 г. были получены первые сведения о присутствии радиоактивных объектов в зоне восточного экзоконтакта гранитоидного массива Мань-Хамбо, расположенного в горной приосевой части Приполярного Урала. Район рассматривался как перспективный на уран (В. М. Шемелин, 1955).

На участках Турман, Мань-Хамбо и других было выявлено несколько высокоинтенсивных гамма-аномалий в кварцитах хобеинской свиты среднего-верхнего рифея. Их ториевая природа, в соответствии с инструкцией пятидесятых годов двадцатого столетия МГиОН СССР, строго предписывающей при установлении ториевой или смешанной урано-ториевой природы аномалии уходить с объекта, обусловила отрицательную оценку этих участков.

Дальнейшая практики геологоразведочных работ показала, что отсутствие первичной геологической документации и опробования при разбраковке таких аномалий в перспективе привели к потере многих редкометалльных рудопроявлений. Сейчас хорошо известно, что практически все ториевые месторождения и проявления комплексные — ториево-редкометалльные [2, 3].

Проявления комплексной редкометалльно-урано-ториевой (Та, Nb, Zr, Ti, TR, U, Th) минерализации на участках Турман и Мань-Хамбо были выявлены в 1961 г. при наземной проверке аномального аэрогамма-поля, полученного в 1960 г. в результате аэрогамма- и магнитной съемки масштаба 1 : 50 000 Аэромагнитной партией № 12 Ямало-Ненецкой комплексной геологоразведочной экспедиции (А. А. Латыпов).

В 1962–1964 гг. Няйская партия Саранпаульской комплексной геологоразведочной экспедиции (КГРЭ) при геологической съемке масштаба 1 : 50 000 выделила и предварительно изучила в северо-восточном и восточном эндо- и экзоконтактах гранитоидного массива Мань-Хамбо 6 участков с повышенной радиоактивностью: Толья-Щугор, Неизвестный, Парьяур, Северный, Турман, Южный. В 1963 г. Тольинская партия этой экспедиции, продолжая оценку известных радиоактивных аномалий, выявила новые в юго-восточной части массива Мань-Хамбо на участках Мань-Няйс, Хапхартуйтумп, Укъ-Ю, Западный.

В 1964 г. Сейсморазведочная партия Саранпаульской КГРЭ профильной сейсморазведкой на Южном участке определила мощность рыхлых отложений до 40 м.

В 1964–1965 гг. совместно с Тольинской партией Саранпаульской КГРЭ и Южным отрядом Тюменской экспедиции Главного Тюменского производственного геологического управления (ГТПГУ) целенаправленные научно-исследовательские работы провела партия № 41 Свердловского горного института (СГИ – ныне УГГУ) под руководством доцента, впоследствии заведующего кафедрой геологии и разведки месторождений радиоактивных и редких металлов С. С. Щербина. Были выполнены оценочные геолого-радиометрические маршруты масштаба 1: 10 000, проходка и опробование поверхностных горных выработок и двух буровых скважин (Щербин С. С., Ослоповских В. Н., Шалагинов В. Г., Холодков В. В., Коптяев А. Ф., Исакова Н. М. Отчет о поисковых работах на редкие и радиоактивные металлы, проведенные Южной партией и научно-исследовательской партией № 41 СГИ за 1965–67 гг. по двум темам. Тюмень–Свердловск. 1967 ф. Фонды СГИ (УГГУ), № 1061).

В результате этих работ впервые была получена новая информация по рудной минералогии и геохимии (Щербаков О. К., Барабашкина Т. М., Аржаникова М. Д. Отчет по теме № 1014/1965 г. «Изучение вещественного состава и обогатимости редкометалльных руд месторождения «Восточное». Уралмеханобр, Свердловск, 1967 ф, 114 с. Фонды СГИ), [4], а также дополнены сведения по геологии, магматизму и стратиграфии изучаемой площади [5, 6]. Определились главные геологические особенности комплексного оруденения зоны Мань-Хамбо. Показано нахождение рудовмещающей терригенной толщи кварцито-конгломератов в зоне классического «несогласия» рифей-дорифейского возраста (R,-Ar?) (Щербин С. С., Ослоповских В. Н., Шалагинов В. Г., Холодков В. В., Коптяев А. Ф., Исакова Н. М. Отчет о поисковых работах...), [6, 7].

Руды залегают в базальных кварцитовидных конгломератах и гравелитах хобеинской свиты среднего-верхнего рифея. Выходы рудных зон на поверхность отмечаются повышенной (до 35-40 мкр/час) и аномально высокой радиоактивностью от 50 до 1500 мкр/час. Природа радиоактивности существенно ториевая (Th/U = 8-16), однако в отдельных пробах – урановая.

Оруденение в зоне докембрийского структурно-стратиграфического несогласия отнесено предположительно к уран-редкометалльной формации, генезис руд осадочно-метаморфогенный. Подчеркнута чрезвычайно важная роль в формировании орудения кор выветривания (Щербин С. С., Ослоповских В. Н., Шалагинов В. Г., Холодков В. В., Коптяев А. Ф., Исакова Н. М. Отчет о поисковых работах...), [8]. Рудная зона прослежена вдоль северо-восточного и восточного контакта массива Мань-Хамбо на 50 км. На участке Турман в зоне протяженностью 14,7 км авторами (Щербин С. С., Ослоповских В. Н., Шалагинов В. Г., Холодков В. В., Коптяев А. Ф., Исакова Н. М. Отчет о поисковых работах...) определены «ориентировочные запасы» ценных металлов, которые можно приравнять к прогнозным ресурсам категории P₁ + P₂. Примечательно, что порядок этих прогнозных ресурсов, предсказанный в 1967 г. без проведения оценочных буровых работ, оказался сравнимым с локализованными по категориям P₁, P₂, P₃ прогнозными ресурсами, которые, как показано далее, выполнены в 2007–2009 гг.

Длительное время, вплоть до 2006 г., когда по инициативе губернатора А. В. Филипенко Департаментом по нефти, газу и минеральным ресурсам ХМАО-Югры был объявлен профинансированный из регионального бюджета конкурс на «Прогнозно-поисковые работы на урановые руды в пределах Верхнетольинской площади (массив Мань-Хамбо) с выполнением детализационных работ на ключевых участках», перспективный район Маньхамбовского блока оставался без должного внимания производственников. Данное конкурсное предложение было реализовано в контракте на выполнение работ в течение 2007–2009 гг., заключенном с Уральской геолого-съемочной экспедицией (ОАО «УГСЭ»).

В процессе геологоразведочных работ (ГРР), выполнявшихся Верхнетольинской партией совместно с научно-исследовательской группой Всеросийского НИИ минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМСа), применялся современный комплекс геолого-геофизических, лабораторных и, что особенно важно, глубинных методов изучения геологического строения площади и характера оруденения.

Показательно, что «табу», прописанное в инструкции двадцатого столетия Министерства геологии и охраны недр СССР, согласно которому следовало немедленно, без изучения, покидать обнаруженный радиоактивный объект в случае его ториевой природы, в практике геологических исследований применялось гораздо шире и включало запрет даже на рассмотрение научной диссертации по ториевой тематике [2]. То есть оставление без внимания установленных в 1954 г. ториевых радиоактивных объектов в восточном экзоконтакте гранито-идного массива Мань-Хамбо не только соответствовало рабочей инструкции, но оправдывалось также и психологически.

Вместе с тем при наличии информации о радиоактивной аномалии в «конгло-мератах» контакт массива Мань-Хамбо был бы вскрыт буровыми скважинами на полвека раньше, как это сделано на аномалии горы Малый Миасс в Челябинской области (Карагодин С. С., Зырянова А. И. и др. Отчет о поисковых работах, проведенных Башкирским отрядом в 1960 г. в грубообломочных отложениях Западного склона Урала. І ГГУ. «Росгеолфонд», 1961 ф).

Выполняемые Верхнетольинской партией на ключевых участках буровые профили обычно располагались друг от друга на расстоянии от 200—400 до 800—1200 м. Пробурена 101 скважина (77 картировочных средней глубиной 66,5 м и 24 поисковых средней глубиной 157,5 м).

Выясненные геологические параметры рассматриваемого оруденения следующие: протяженность локализованных в терригенной толще рудных горизонтов от 300–800 до 1000–4000 м по простиранию и от 75–90 до 200–400 м по падению, при этом они не оконтурены в глубину. Мощность обычно изменяется от 3 до 16 м. Иногда несколько таких параллельных сближенных горизонтов достигают суммарной мощности до 20 м и более. Мощность собственно рудных тел изменяется от 1,0–2,5 до 5–10 м.

Содержание в рудах основных компонентов следующее: урана — от 0.012 до 0.030 %, в среднем 0.01-0.05 %; тория — от 0.30 до 0.60 %, в среднем 0.01-0.25 %; церия — от 0.009 до 0.042 %, в среднем 0.033 %; иттрия — от 0.004 до 0.037 %, в среднем 0.018 %; отмечаются также лантан, диспрозий, редко — гафний, неодим, празеодим.

В результате работ 2007—2009 гг. в прослеженной на Верхнетольинской площади на протяжении 16 км рудной зоне локализованы прогнозные ресурсы урана и тория по категориям P_1 , P_2 , P_3 . Оценка прогнозных ресурсов Ce, Y, Zr, Nb и Та по категориям P_2 и P_3 выполнена в контурах рудных залежей урано-ториевой минерализации.

Суммарные ресурсы урана 18 925 т, в том числе категории P_1 10 924 т, тория 115 548 т, в том числе категории P_1 66 005 т. Ресурсы церия 27 231 т, иттрия 13 966 т, циркония 87 636 т, ниобия 27 254 т, тантала 1 567 т (Мезенов И. А., Евстигнеев А. В., Дидковская Л. П., Вигорова И. Э., Тарасов С. Е., Хасанова Г. Б. и др. Отчет по объекту «Прогнозно-поисковые работы на урановые руды в

пределах Верхнетольинской площади (массив Мань-Хамбо) с выполнением детализационных работ на ключевых участках» за 2007–2009 гг. «Росгеолфонд», 2009).

Полученные по завершении работ сведения позволяют обосновать новые взгляды на генезис и перспективы рудной зоны Мань-Хамбо.

Абсолютный возраст новообразованного в серых гранитах массива Мань-Хамбо акцессорного циркона по определению Л. В. Сумина (ВИМС) равен 0,5 млрд лет, что определяет возраст массива кембрийским. В то же время в ядрах циркона определены различные древние значения возраста в 1,5, 2,5 и 3 млрд лет – явление довольно обычное [9]. «Эти ядра и их возраст – свидетельство участия архейскопротерозойской сиалической коры в формировании гранитоидов Мань-Хамбовского массива: циркон при образовании гранитной магмы был захвачен из субстрата магматической камеры» (Архангельская В. В., Потанин С. Д., Рябцев В. В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по договору подряда № 45-07 «Установить околорудные изменения пород, определить вещественный состав и рудно-формационный тип уранового и редкометалльного оруденения на площади прогнозно-поисковых работ в гранитах массива Мань-Хамбо и в перекрывающих отложениях за 2007–2009 гг.» ВИМС, 2009 / Мезенов и др. «Росгеолфонд». 2009. Кн. 2. Текстовое прил. 2. С. 50-200). Кембрийский возраст массива Мань-Хамбо определен по цирконам и другими исследователями [10–14].

Учитывая наличие глинистой метаморфизованной коры выветривания, которая обнаружена на гранитах массива Мань-Хамбо и перекрывающих его породах, «свиту, перекрывающую граниты массива, вернее всего следует относить к раннему ордовику и считать тельпосской» (Архангельская В. В., Потанин С. Д., Рябцев В. В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по договору подряда...). Несколько ранее отношение свиты, перекрывающей граниты восточной части массива Мань-Хамбо, к тельпосской (ордовикской), а не к хобеинской (рифейской), показали геологи КОМИ НЦ УрО РАН [15].

Следует отметить, что различать хобеинскую и тельпосскую свиты затруднительно ввиду большого сходства их состава и строения. Это естественно для терригенных отложений, которые формируются в начале нового цикла в области стратиграфического несогласия. Подобная особенность вообще наблюдается на границах различных циклов развития Земли. Достаточно вспомнить научные разногласия XVIII века американского геолога-первопроходца, основателя американской стратиграфии палеозоя Эбенезера Эммонса с государственным геологом штата Нью-Йорк по поводу возраста пород системы Таконик в Аппалачах. Руководитель был уверен в их ордовикском возрасте, и Эммонсу, считавшему, что породы кембрийские, пришлось покинуть штат. Однако позже было установлена принадлежность системы к кембрию.

В связи с трудностями в различии свит большое значение приобретают дополнительные сведения, указывающие на характерные особенности их состава и строения. Так, важным аргументом отнесения свиты, включающей уранторий-редкоземельное оруденение, именно к тельпосской, а не к хобеинской, является наличие в хобеинской свите окатанных до совершенно круглых кристаллов, типа футбольного мяча, дальнеприносных цирконов [16]. Хорошо окатанные формы кристаллов циркона совершенно не свойственны тельпосской свите. Минералоги ВИМСа указывают, что присутствующие в базальном горизонте тельпосской свиты «цирконы идиоморфные неокатанные по морфологии и индикаторным торий-урановому и цирконий-гафниевому отношениям такие же, что и в гранитах массива» Мань-Хамбо (Архангельская В. В., Потанин С. Д., Рябцев В. В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по договору подряда...).

Геолог-стратиграф Г. Н. Бороздина, изучавшая по профилям скважин разрез терригенных пород восточного контакта массива Мань-Хамбо, пришла к выводу, что рудовмещающая терригенная толща может быть отнесена к образованиям возрастного аналога тельпосской свиты – саранхопнерской свите [17].

Подводя итоги выполненных Верхнетольинской партией совместно с ВИМСом работ, авторы отчета утверждают: «Впервые на Урале выявлен и установлен на промышленном уровне (по предварительной геолого-экономической оценке) новый геолого-формационный тип полигенного полиметалльного комплексного редкоземельно-урано-ториево-благороднометалльного оруденения типа «несогласий» (Мезенов И. А., Евстигнеев А. В., Дидковская Л. П., Вигорова И. Э., Тарасов С. Е., Хасанова Г. Б. и др. Отчет по объекту «Прогнозно-поисковые работы на урановые руды...).

Однако эта декларация не подтверждается сколько-нибудь убедительными аргументами. Все сводится лишь к упоминаниям присутствия в рудной толще аргентита, прустита, порой значимых концентраций золота, платиноидов, широкого развития ореолов серебра и заканчивается фразами «может быть связано» и «может свидетельствовать о выявлении на Урале нового геолого-формационного типа комплексного полигенного урано-ториевого благороднометалльного оруденения». Вполне очевидно, что этих рассуждений явно недостаточно для обоснования выявления заявленного авторами (Мезенов И. А., Евстигнеев А. В., Дидковская Л. П., Вигорова И. Э., Тарасов С. Е., Хасанова Г. Б. и др.) нового геолого-формационного типа.

Прежде чем подробно рассматривать возможное наличие парагенезиса уранового оруденения в конгломератах Мань-Хамбо с золотом, уместно высказать сожаление, что в отчете Верхнетольинской партии рассматривалась аналогия с масштабными золото-урановыми месторождениями в древних конгломератах мира [18 и др.], но не выполнялось сравнение комплексного оруденения изучаемого объекта с рудами других, более похожих формационных типов: ураноториевым [19], урано-ториево-редкоземельным [2]. Кроме того, авторам представляется некорректным объединение месторождения Карку в Карелии, в какой-то мере аналогичного оруденению зоны Мань-Хамбо, в один металлогенический ряд с типовыми золото-урановыми месторождениями зон несогласий Канады и Австралии (Мезенов И. А., Евстигнеев А. В., Дидковская Л. П., Вигорова И. Э., Тарасов С. Е., Хасанова Г. Б. и др. Отчет по объекту «Прогнозно-поисковые работы на урановые руды..., таблица 7.1).

Данные, свидетельствующие о проявлениях золота в связи с комплексными радиоактивными рудами, известны с момента их детального изучения. Тогда были выявлены «содержание серебра в конгломератах до 6,1 г/т» и золота до 1 г/т (участок Хапхартуйтумп) (Щербин С. С., Ослоповских В. Н., Шалагинов В. Г., Холодков В. В., Коптяев А. Ф., Исакова Н. М. Отчет о поисковых работах...). В. А. Верховцев и В. А. Душин рассматривали возможную аналогию уранторий-редкометалльного оруденения в зоне «несогласия» Мань-Хамбо с классическими золото-урановыми месторождениями докембрия [19]. Присутствие в зоне «несогласия» Мань-Хамбо в комплексе металлов наряду с ураном еще и благородных элементов отмечено и в более поздних публикациях [3, 21, 22].

Следовательно, даже без проведения дополнительных пробирных анализов, наличие золота в спектре рассматриваемого оруденения не вызывает сомнения. Однако генетическая связь урана и золота неоднозначна.

Геохимические исследования Верхнетольинской партии (автор раздела А. В. Евстигнеев), включающие расчет парных коэффициентов корреляции между U и другими элементами в рудной зоне Мань-Хамбо, показал «очень сильные связи

между U и Th, Y, Ce, La, Nd, Та». Коэффициенты корреляции с U для Th, Y, Ce, La, Nd находятся в пределах 0,99–0,90. Данные показатели, несомненно, свидетельствуют «о генетической принадлежности элементов к единому рудному процессу» (Мезенов И. А., Евстигнеев А. В., Дидковская Л. П., Вигорова И. Э., Тарасов С. Е., Хасанова Г. Б. и др. Отчет по объекту «Прогнозно-поисковые работы на урановые руды...). Такое корреляционное единство рудных элементов широко используется в геологической практике поисковых и разведочных работ [23 и др.].

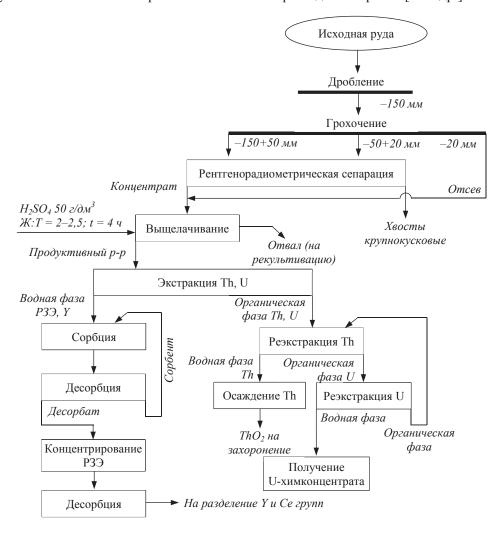


Рисунок 1. Принципиальная технологическая схема переработки редкометалльноуран-ториевых руд массива Мань-Хамбо (по *Архангельская В. В., Потанин С. Д., Рябцев В. В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по договору подряда...* с упрощениями)

Figure 1. Process flow diagram for the processing of Man-Khambo rare-metal-uranium-thorium ore processing (according to *Arkhangelskaia V. V., Potanin S. D., Riabtsev V. V. et al. Records on performance for work under a tender agreement...* with simplifications)

Исследованиями Верхнетольинской партии также выявлено «наложение на комплексные урано-ториевые рудные залежи геохимических ореолов благородных и халькофильных металлов (Ag, Au, Pt, Ir, Os, Ru и др.). По первичным ореолам рассеяния на участке Турман устанавливается тесная генетическая связь между

ураном и Th, As, Se, Ga, Zn, Pb, Y, Ge, Ce и др.» (Мезенов И. А., Евстигнеев А. В., Дидковская Л. П., Вигорова И. Э., Тарасов С. Е., Хасанова Г. Б. и др. Отчет по объекту «Прогнозно-поисковые работы на урановые руды...). Однако корреляционные связи урана, тория и редких элементов с серебром, золотом, иридием, платиной не установлены. Отсутствие корреляционной связи в рассматриваемом спектре элементов, надо полагать, свидетельствует и об отсутствии между ними парагенетической связи.

К тому же возраст рудовмещающей свиты в зоне Мань-Хамбо, как показано ранее, оказался раннепалеозойским. В то же время известно, что все металлоносные конгломераты с промышленными месторождениями урана и золота имеют раннедокембрийский возраст [24].

Таким образом, благороднометалльное оруденение в зоне Мань-Хамбо, скорее всего, самостоятельное, генетически не связанное с урано-ториево-редкометалльным, и его отдельно фиксируемые проявления не являются доказательством принадлежности руд зоны к комплексному «благороднометалльному» типу.

Оруденение в конгломератах зоны Мань-Хамбо, по мнению авторов, принадлежит к уран-торий-редкоземельному формационному типу, широко распространенному в России [2, 22 и др.] и мире [25, 26].

Важнейшим результатом совместных работ Верхнетольинской партии и коллектива ВИМСа является установление промышленной значимости комплексных редкоземельно-уран-торий-редкометалльных руд. В первую очередь – редкоземельных.

Промышленная значимость месторождения обусловлена наличием метамиктных, гидратированных — легкорастворимых, разрушенных форм минераловносителей урана и редкоземельных элементов (РЗЭ), которые были установлены минералогами ВИМСа при изучении руд массива Мань-Хамбо. Технологами ВИМСа разработана схема переработки этих руд методом кучного выщелачивания с получением концентратов извлекаемых элементов, прежде всего урана и редких земель (рис. 1).

Важнейшая роль технологии извлечения рудных элементов, наряду с горнотехническими условиями, определяющей рентабельность промышленной разработки месторождений, вызывает необходимость проведения опережающих исследований. Как, например, это осуществляется на уран-торий-редкоземельном месторождении в конгломератах Италии [26].

При освоении месторождения Мань-Хамбо разработанная сотрудниками ВИМСа технология кучного выщелачивания урана и редких земель предварительно должна пройти проверку на объемной полупромышленной пробе руды.

Экспертная прогнозная ресурсная оценка редкоземельных элементов в конгломератах Лемвинского антиклинория может поставить ресурсы региона в один ряд с перспективной кенорской палеороссыпью [27].

Поскольку некоторые документаторы пробуренных для оценки оруденения скважин описывали рыхлую породу в керне с глубины 200 м как «песок», не исключено, что этот материал является милонитом. Его наличие позволит считать вероятной возможность извлечения рудных компонентов методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Для этого в процессе проектирования ближайших геологоразведочных работ на месторождении целесообразно предусмотреть изучение его гидрогеологических особенностей, чтобы в случае выявления благоприятной обстановки провести опытные работы по СПВ. В случае положительного результата промышленная значимость месторождения окажется вне всякой конкуренции.

Вопросы генезиса. Известно, что генезис древних конгломератов включает признаки как экзогенного, осадочного, так и эндогенного, эпигенетического

(метаморфогенного, гидротермально-метасоматического и др.), реже полигенного, осадочно-гидротермального, рудообразования [28–32, 24]. Особо подчеркнем, что в более чем 20-летней дискуссии о генезисе рудоносных конгломератов Витватерсранда победила «палеодолинная» гипотеза их формирования [31].

По версии первых исследователей процесс рудообразования в зоне Мань-Хамбо осадочно-метаморфогенный. Рудообразование на начальной стадии имело, по-видимому, россыпной характер (Щербин С. С., Ослоповских В. Н., Шалагинов В. Г., Холодков В. В., Коптяев А. Ф., Исакова Н. М. Отчет о поисковых работах...) и связано с процессами корообразования [8]. В последующем в длительном процессе метаморфизма сформировался наблюдаемый минеральный состав оруденения.

В 2007–2009 гг. геологами ВИМСа были выполнены чрезвычайно тщательные и подробные петрографо-минерагенические исследования вмещающих пород и оруденения с применением современных методов оптической и электронной микроскопии с последующим микрозондовым либо рентгенофазовым анализом.

В результате исследований радиоактивного оруденения зоны Мань-Хамбо геологи ВИМСа пришли к выводу, «что процесс минералообразования проходил следующие этапы: россыпной, метаморфогенный, гидротермальный, с которыми в наибольшей степени связано уран-ториевое оруденение и поздняя сульфидная минерализация в кварцевых жилах» (Архангельская В. В., Потанин С. Д., Рябцев В. В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по договору подряда...).

Подробное описание представления геологов ВИМСа о процессах формирования оруденения в зоне Мань-Хамбо выглядит следующим образом:

«Процесс осадконакопления обеспечил повышенные концентрации тяжелых минералов в наиболее грубообломочной части толщи.

Развитие регионального метаморфизма характеризуется регенерацией обломочных зерен кварца, полевого шпата и раскристаллизацией цемента, который преобразуется в серицитовый и хлоритовый, а при более высокой степени метаморфизма – в мусковит-биотитовый или кварц-хлорит-эпидотовый. На этом этапе частично образуются сульфиды, в основном представленные тонковкрапленным пиритом, реже халькопиритом и арсенопиритом, а также происходит частичный вынос урана из ураноторита и циркона.

Дальнейшее прогрессивное развитие метаморфизма обусловило возникновение гидротермальных растворов, которые проникали по ослабленным зонам главным образом по направлению сланцеватости в грубообломочные породы (конгломераты и гравелиты, реже в кварцитовидные песчаники). Взаимодействие этих растворов с вмещающими породами привело к образованию прожилков кварц-мусковитового, иногда кварц-цинвальдит-калиевополевошпатового состава с новообразованными ильменорутилом, колумбитом, ортитом, торогуммитом, торостенструпином, эвксенитом, браннеритом (?), коффинитом (?), карбонатами и фторидами редкоземельных металлов, флюорита. На этом этапе происходит наиболее активное и в разной форме замещение торита, монацита, ильменита, сульфидов, разложение циркона.

Проявления гидротермальной деятельности завершаются образованием кварц-сульфидных жил, секущих ранее образованные породы и состоящих в основном из кварца с вкрапленностью пирита, халькопирита, окислов меди, марганца, железа. Эти минералы концентрируются в основном в зальбандах этих жил, а иногда по мелким трещинам, совпадающим со сланцеватостью, проникают и во вмещающие породы, благодаря чему могут пространственно ассоциировать с редкометалльно-уран-ториевой минерализацией при различных временных интервалах их образования» (Архангельская В. В., Потанин С. Д., Рябцев В. В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по договору подряда...).

Появление в тектонических зонах в процессе кремнисто-калиевого метасоматоза урановых минералов с возрастом от 2,75 до 0,3 млрд лет с Ree-Th-Uминерализацией описано как для Урала [28], так и для Кольского региона. После образования уранинита (с неопределенным возрастным интервалом) развивается сульфидная минерализация [33].

Далее рассмотрим взаимодействие факторов метаморфизма и процесса гидрогенного рудообразования.

Один из главных факторов метасоматического метамофизма — присутствие химически активных растворов и газов. Для эффективного функционирования гидротермальных растворов необходимо, кроме температуры и давления, наличие достаточных объемов растворителя, который перемещается и выполняет механическую и химическую работу. Им в рассматриваемом случае будут вадозные воды: прежде всего гравитационные (свободные), инфлюационные, а также конденсационные.

Эти растворы при обогащении рудными элементами и окажутся *гидрогенными гидротермальными* рудными растворами. Их происхождение, таким образом, будет альтернативой привычной для геологов еще с начала XX века гипотезе магматогенного генезиса рудных месторождений В. Эммонса и В. Лингрена.

Возвращаясь к описанному геологами ВИМСа процессу образования оруденения в зоне Мань-Хамбо, повторим: «...прогрессивное развитие метаморфизма обусловило возникновение гидротермальных растворов, которые проникали ... в грубообломочные породы ... с образованием прожилков» (Архангельская В. В., Потанин С. Д., Рябцев В. В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по договору подряда...).

Таким образом, можно констатировать, что этот фактически наблюдаемый процесс рудного минерагенеза иллюстрирует формирование в залегающей в зоне структурно-стратиграфического несогласия Мань-Хамбо терригенной толще гидротермального редкоземельно-урано-ториевого оруденения, которое генерировано без участия магматических флюидов, а под воздействием прогрессивного метаморфизма вмещающих пород, ранее обогащенных рудными минералами. Фактором метаморфизма, обусловившим повышение температуры и создание избыточного давления в вадозных растворах, в этом случае оказался ориентированный стресс, являющийся следствием Уральской коллизии при надвиге осадочной толщи на граниты и вмещающие его породы докембрия.

Конечный процесс образования промышленных руд в зоне Мань-Хамбо является, таким образом, гидрогенным гидротермальным.

Анализ всей изложенной информации позволяет авторам считать гидрогенный гидротермальный генезис оруденения альтернативой магматогенному гидротермальному генезису. Дополнительным аргументом возможности гидрогенного гидротермального генезиса рассматриваемых руд является отсутствие не только в Маньхамбовском блоке, но и во всей структуре Лемвинского антиклинория каких-либо магматических образований с уран-торий-редкометалльной геохимической специализацией, продукты эволюции которых явились бы производными гидротермального рудообразования.

Имеются прецеденты, когда генезис месторождений урана первоначально представлялся гидротермальным, но после получения новой информации был определен как гидрогенный [34]. Например, месторождение Табошар в Средней

Азии, добыча металла на котором в начальной стадии российского уранового проекта покрывала одну треть проектной потребности.

Урановое оруденение на месторождении Табошар залегает в гранодиоритах, интенсивно деформированных системой как дорудных, так и последующих разрывных нарушений. Промышленные руды устанавливаются в некоторых участках отдельных кварцевых и кварцево-баритовых жил. На месторождении хорошо развиты зоны окисления и вторичного сульфидного обогащения, можно сказать, классически соответствующие данным В. Г. Мелкова.

Сверху вниз наблюдается следующая минералогическая зональность: 1) зона развития отенита распространена до глубины 3-5 м от дневной поверхности; 2) зона развития торбернита и цейнерита прослеживается от 3-5 до глубины 30-35 м, область выделения самых крупных кристаллов урановых слюдок находится на глубине 15-20 м от поверхности; 3) зона отсутствия урановых минералов занимает интервал 5-10 м ниже глубины 30-35 м; 4) глубже 35 м располагается зона вторичного обогащения, где развиты уранинит, скрытокристаллическая форма окислов урана, урановые черни, вторичные сульфиды и др. Ниже развиты сульфидные руды с первичным уранинитом.

В соответствии с учением С. С. Смирнова о зонах окисления сульфидных месторождений (1936, 1955), ниже горизонта цементации должны были находиться первичные ураносульфидные руды гидротермального происхождения. Поэтому местные геологи в ожидании непременного обнаружения богатой гидротермальной руды запроектировали вскрытие глубоких горизонтов месторождения. Однако бурение глубже 200 м показало полное отсутствие какого-либо оруденения. Причина заключалась в том, что это была отметка местного базиса эрозии, а генезис Табошарского месторождения оказался гидрогенным [34].

Следует отметить, что представление о гидрогенном рудообразовании появилось в процессе многолетнего изучения урановых месторождений в песчаниках, которые были открыты в начале 1950-х гг. на плато Колорадо в США (Солт-Уош) [35] и в Кызылкумах в СССР (Учкудук) [34]. Научные взгляды на условия и процесс формирования этих месторождений урана и их аналогов, получивший название гидрогенного генезиса, подробно охарактеризованы в трудах советских [36] и российских ученых [37-40].

Процесс и условия формирования промышленных гидрогенных месторождений в речных палеодолинах уральского региона, которые оказались разновидностью месторождений урана типа «несогласия» в фанерозое, подробно охарактеризованы в монографии А. Б. Халезова [41].

Зависимость металлогенической специализации конкретного гидрогенного оруденения от особенности состава денудированных кор выветривания, поставляющих рудные элементы в водную среду, продемонстрирована графической моделью (рис. 2).

Идея определяющей роли верхних горизонтов земной коры в формировании металлогенической специализации планеты описана оригинально, с изложением фактического материала и анализом, заслуженным геологом Российской Федерации с 30-летним стажем в Северо-Казахстанском ураново-рудном районе, где открыто 50 гидротермальных месторождений урана, Ю. Л. Бастриковым.

С учетом ранее изложенного очевидна необходимость нового подхода к металлогеническому анализу с использованием иных, нежели традиционные, принципов и методов прогнозирования. Постепенно первоочередная ориентация на характер металлогенической специализации магматических комплексов,

несомненно, уступит пониманию, что решение вопроса происхождения рудообразующих элементов лежит в области рассмотрения и оценки кларков рудных элементов в горных породах областей пенепленизации и условий их миграции.

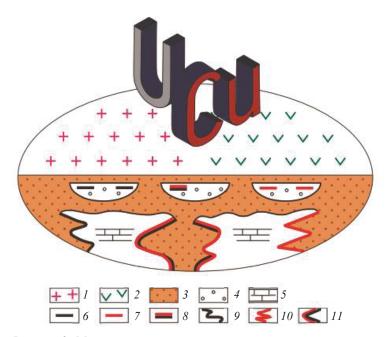


Рисунок 2. Модель зависимости металлогенической специализации гидрогенного оруденения от особенности состава денудированных кор выветривания (рисунок заимствован у А. Б. Халезова, с упрощением):

1-5 — материнские рудоформирующие горные породы: 1 — граниты, 2 – базальты; проницаемые горные породы палеодолин:
3 – песчаники, 4 – рудовмещающие конгломераты и гравелиты; горные породы ложа палеодолин: 5 - известняки и др.; 6-8 - повышенные концентрации рудных элементов в воде (рудоносные растворы): 6 – урана (на площадях дренажа из кор выветривания гранитов), 7 – меди (на площадях дренажа из кор выветривания базальтов), 8 - меди и урана (на площадях совместного дренажа из кор выветривания базальтов и гранитов); *9–11* – рудные тела (роллы): *9* – урана; *10* – меди; *11* – меди и урана Figure 2. Model of the dependence between the hydrogenous mineralization metallogenic specialization and the composition of denuded weathering crusts (the figure courtesy of A. B. Khalezov with simplification): 1-5 – parent ore-forming rocks: 1 – granites, 2 – basalts; permeable paleovalley rocks: 3 – sandstones, 4 – ore-bearing conglomerates and gravelstones; rocks of the bed of paleovalleys: 5 – limestones, etc.; 6–8 – higher concentrations of ore elements in water (ore-bearing solutions): 6 - uranium (in drainage areas from granite weathering crusts), 7 – copper (in drainage areas from basalt weathering crusts), 8 - copper and uranium (in areas of joint drainage from weathering crusts of basalts and granites); 9-11 - ore bodies (rolls): 9 – uranium; 10 – copper; 11 – copper and uranium

Заключение. В результате исследований и обобщения материалов показана принадлежность рудоносных конгломератов зоны Мань-Хамбо к раннепалеозойской, а не к докембрийской эпохе. Установлено отсутствие генетической связи

фиксируемого в зоне структурно-стратиграфического несогласия золотого оруденения с редкоземельно-уран-торий-редкометалльным.

Возможность использования технологии добычи уран-редкоземельной руды методами кучного выщелачивания определила промышленную значимость Приполярных месторождений. В период, непосредственно предшествующий решению о начале разработки месторождения, рекомендуется произвести конкретные экономические расчеты, определяющие рентабельность его разработки с учетом общеэкономической ситуации в стране и мире, цен на извлекаемые компоненты и привлекаемые ресурсы, ставки банковского процента.

Представлена гипотеза *гидрогенного гидротермального рудообразования* как альтернатива магматогенному происхождению гидротермальных рудных растворов.

Накопленный за последние годы фактический материал по гидрогенному рудообразованию однозначно свидетельствует о необходимости нового подхода к металлогеническому анализу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Пятов Е. А. Стране был нужен уран. История геологоразведочных работ на уран в СССР. М.: ВИМС, 2005 с. 246 с.
- 2. Котова В. М. Кое-что о работах по геологии тория // Как искали и добывали уран // Сб. статей-воспоминаний ветеранов атомной промышленности. М.: ГЕОС. 2002. С. 72–84.
- 3. Душин В. А., Трутнев А. К., Жуклин Е. А., Прокопчук Д. И., Демина Л. А. Металлогения Маньхамбовского блока (Приполярный Урал) // ГИАБ. 2021. № 11-1. С. 130–145.
- 4. Коптяев А. Ф. Минералогия и геохимические особенности редкометалльных конгломератов Мань-Хамбо (Приполярный Урал): автореф. дис. . . . канд. геол.-минерал. наук. Свердловск, 1969. 34 с.
- 5. Ослоповских В. Н. Древние конгломераты района Мань-Хамбо (Приполярный Урал) и их рудоносность: автореф, дис. . . . канд. геол.-минерал. наук. 1970. 25 с.
- 6. Щербин С. С., Коптяев А. Ф., Челноков В. П. О составе гранитов Мань-Хамбо, условиях и истории их формирования (Приполярный Урал) // Магматические формации, метаморфизм, металлогения Урала: тр. II Уральского петрографического совещания. Т. IV. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1971. С. 306–317.
- 7. Щербин С. С. Геологические условия формирования и локализации радиоактивноредкометалльного оруденения в древних конгломератах // Геология и вопросы генезиса эндогенных урановых месторождений. М: Наука, 1968. С. 50–64.
- 8. Щербин С. С. Древние коры выветривания и их значение в формировании редкометалльных конгломератов // Геология и поиски месторождений редких и цветных металлов. 1971. Вып. 81. С. 3–7.
- 9. Gee D. G., Behakova L., Pease V., Larionov A., Dovshikova L. New, Single Zircon (Pb-Evaporation). Ages from Vendian Intrusions in the Basement beneath the Pechora Basin, Northeastern Baltica // Polarforschung, 1998. No. 68: P. 161–170.
- 10. McKezzow W. S., Scotese C. R., Brogier M. D. Early Cambrian continental reconstructions // Journal of the Geological Society. 1992. Vol. 149. Pt. 4. P. 589–606.
- 11. Водолазская В. П., Шергина Ю. П., Котов К. Н. Возраст и генезис гранитоидов Приполярного Урала // Отечественная геология. 1999. № 5. С. 48-55.
- 12. Удоратина О. В. Соболева А. А., Кузенков А. А. Возраст гранитоидов Мань-Хамбовского и Ильяизского массивов (Северный Урал): U-Pb данные // Доклады РАН. 2006. Т. 406. № 6. С. 810–815.
- 13. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1 : 200 000. Изд. второе. Сер. Северо-Уральская. Лист P-40VI (г. Тельпос-Из). Объяснительная записка / Душин В. А., Сердюкова А. П., Малюгин А. А., Козьмин В. С. и др. СПб: Картография ВСЕГЕИ, 2018. 216 с.
- 14. Холоднов В. В., Шардакова Г. Ю., Душин В. А., Коровко А. В., Шагалов Е. С. Рифей-венд-кембрийский магматизм Маньхамбовского блока (Приполярный Урал): геохимическая типизация, корректировка геодинамических представлений, роль плюм-литосферного взаимодействия // Петрология. 2022. Т. 30. № 4. С. 404—431.
- 15. Удоратина О. В., Калинин Е. П., Никулова Н. Ю. Зона контакта гранитоидов Ыджыдлягского массива и кварцитов тельпосской свиты (Северный Урал) // Труды Коми НЦ УрО РАН. 2007. Вып. 121. 100 с.
- 16. Пыстина Ю. И. Использование морфологических особенностей акцессорного циркона при расчленении и корреляции метаморфизованных отложений Верхнекожимского и Вангырского районов (Приполярный Урал) // Труды Коми фил. АН СССР. 1988. Вып. 65. С. 59–73.
- 17. Бороздина Г. Н. О корреляции стратотипа хобеинской свиты и отложений в восточном контакте гранитного массива Мань-Хамбо // Труды ИГГ УрО РАН. 2009. Вып. 156. С. 57–59.
- 18. Genesis of Uranium- and Gold-Bearing Precambrian Conglomerates // Proceedings of Workshop, October 13–15, 1975, Golden, Colorado. DOI: 10. 1016/0016-7037(58)90115-7

- 19. Кренделев Ф. П. Металлоносные конгломераты мира. Новосибирск: Наука, 1974. 240 с.
- 20. Верховцев В. А., Душин В. А. О перспективах обнаружения комплексных урановых месторождений «типа несогласия» на севере Урала // Известия УГГГА. 2000. № 10. С. 108–115.
- 21. Душин В. А., Фауст А. В. Рифейский гранитный магматизм и металлогения Маньхамбовского блока // Региональная геология и металлогения. 2018. Вып. 35. С. 25–33.
- 22. Душин В. А., Козьмин В. С., Никулина И. А., Сердюкова О. П., Колганов Е. Р. Геология и комплексное редкометалльно-уран-ториевое оруденение Маньхамбовского блока (Приполярный Урал) // Литосфера. 2012. № 2. С. 166—172.
- 23. Соловьев Е. С. Анализ корреляционных связей золота и элементов-спутников для прослеживания рудных зон // Успехи современного естествознания. 2004. № 7. С. 89–90.
- 24. Миронов Ю. Б., Макарьев Л. Б., Румянцев Н. Н., Михайлов В. А. Перспективы промышленной рудоносности древних конгломератов России // Разведка и охрана недр. 2010. № 1. С. 19–25.
- 25. Pawan Kumar Yadav, Manorama Das. Gold, uranium and thorium mineralization in Paleoproterozoic quartz-pebble conglomerate of Dhanjori Group, Singhbhum Craton, India // Indian Journal of Geosciences. 2018. No. 72(2). 139–150.
- 26. Geraldo Capanesi, Alberto Rosada, Maurizio Manigrasso, Pasquale Avino. Rare earth elements, thorium and uranium in the ores of North-Latium (Italy) // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2012. Vol. 291. P. 163–168.
- 27. Ткачев А. В., Рундквист Д. В., Вишневская Н. А. Основные черты исторической металлогении редкоземельных элементов // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. \mathbb{N} 3. С. 209–246.
- 28. Ronkin Y. L., Ferreiza M., Povtuqa L., Lepikhina O. P. Isotope geology of the Urals // Russia: K-Ar, Rb-Sr, Sr-Nd and U-Pb systematics: Abstract Volume of South-Amezican Symposium on Isotope Geology. Sao-Paulo, Brazil, 1977. P. 189–203.
- 29. Armstrong F. Genesis of uranium and gold-bearing Precambrian quartz pebble conglomerates. Reston, VA (USA): Geological Survey, 1982. 431 p.
- 30. Щеглов А. Д. О металлогении Южно-Африканской республики, генезисе золоторудных месторождений Витватерсранда и проблеме открытия их аналогов в России. СПб: ВСЕГЕИ, 1994. 44 с.
- 31. Константинов М. М., Шаров Г. Н. Геологическое строение и поисковые признаки месторождений золота в основных геотектонических обстановках. Атлас. Книга 1. М.-Кемерово: Геокон, 2002. 264 с.
- 32. Елисеев В. И. О происхождении золоторудного месторождения Витватерсранд (ЮАР) // Бюллютень МОИП. Отд. геол. 2006. Т. 81. Вып. 1. С. 66–73.
- 33. Каулина Т. В., Лялина Л. М., Ильченко В. Л. Последовательность образования Ree-Th-U-минералов в Лицевском урано-рудном районе Кольского региона // Вестник Мурманского государственного технического университета. Геология и геофизика. 2019. Т. 22. Вып. 1.
- 34. Евсеева Л. С. Как искали и добывали уран // Сб. статей-воспоминаний ветеранов атомной промышленности. М.: ГЕОС, 2002. С. 9–20.
- 35. Томм Дж. К., Адамс С. С. Геологичесекие особенности и поисковые критерии песчаниковых урановых месторождений типа Солт-Уош провинции плато Колорадо (Окончательный отчет, 1981 г.) // Материалы по геологии урановых месторождений зарубежных стран / ВИМС. 1984. Вып. 31. С. 189–275.
- 36. Евсеева Л. С., Перельман А. И., Йванов К. Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М.: Атомиздат, 1974. 280 с.
- 37. Кисляков Я. М., Щеточкин В. Н. Гидрогенное рудообразование. М.: Геоинформмарк, 2000. 608 с.
 - 38. Печенкин И. Г., Печенкин В. Г. Эволюция осадочного рудообразования. М.: ВИМС, 2008. 76 с.
- 39. Машковцев Г. А., Константинов А. К., Мигута А. К., Шумилин М. В., Шумилин М. В., Щеточкин В. Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
- 40. Афанасьев Г. В., Миронов Ю. Б., Пинский Э. М. Новые аспекты формирования урановых месторождений песчаникового типа // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 89–96.
- 41. Халезов А. Б. Месторождения урана в речных палеодолинах уральского региона. Разновидности месторождений урана типа «несогласия» в фанерозое // Минеральное сырье. 2017. № 34. 194 с.

Поступила в редакцию 15 декабря 2022 года

Сведения об авторах:

Карагодин Сфен Степанович – кандидат геолого-минералогических наук, ветеран Уральского государственного горного университета. E-mail: sfen80k@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5882-821x

Карагодин Владимир Сфенович — кандидат философских наук, доцент кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: karagodindec@yandex.ru Хасанова Гульнара Габдулбариевна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: fgg.gpr@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-107-123

Polygenic uranium-thorium-rare earth mineralization of the Nether-Polar Urals: discovery history and genesis

Sfen S. Karagodin ¹, Vladimir S. Karagodin ¹, Gulnara G. Khasanova ¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

The research relevance is determined by the need to analyze various sources and author's observations to form ideas about the genesis of an unusual polygenic uranium-thorium-rare earth mineralization of the Nether-Polar Urals to assess the prospects and directions for subsequent mining and processing. The research results will aid in a more rational and efficient geological research.

The research objective is to interpret the results, determine mineralization genesis features and show its future prospects against the background of the discovery history and using data from a complex analysis of uranium-thorium-rare-earth mineralization in conglomerates of the regional structural-stratigraphic unconformity zone.

Results. The geological position of rare-metal conglomerates has been clarified, their belonging not to the Precambrian, but to the Early Paleozoic era has been determined. The absence is considered of a genetic connection between the gold mineralization recorded in the zone of structural-stratigraphic unconformity and polygenic uranium-thorium-rare earth mineralization. The shortage of rare earth elements determines the industrial significance of uranium-rare-earth complex ores, the extraction of which is possible using modern heap leaching technologies.

Conclusions. The history of the study of uranium-thorium-rare-earth mineralization of the Nether-Polar Urals is considered. According to the authors, it has a polygenic genesis and forms into the successive stages of sedimentary, metamorphogenic and hydrothermal processes. A hypothesis of hydrogenous hydrothermal ore formation under regional metamorphism is proposed as an alternative to the magmatogenic origin of hydrothermal ore melts. It determines the need for new approaches to mineralization assessment. The industrial value of mineralization lies in the presence of metamict, hydrated, easily soluble minerals, carriers of uranium and rare earth elements, which implies the possibility of using modern mining technologies.

Keywords: conglomerates; structural-stratigraphic unconformity; uranium; rare earth elements; uranium-thorium-rare earth deposit; heap leaching; hydrogenic hydrothermal ore formation; magmatogenic ore formation; metallogeny.

Acknowledgements. The authors are grateful to A. B. Khalezov for the sketch, which is a clear illustration of the model of dependence between hydrogenous mineralization metallogenic specialization and the denuded weathering crusts composition character. The authors also express their gratitude to A. K. Kutov, geologist, and others who contributed to the graphic design of this models.

REFERENCES

- 1. Piatov E. A. *The country needed uranium. The history of geological exploration for uranium in the USSR*. Moscow: VIMS Publishing; 2005. (In Russ.)
- 2. Kotova V. M. A few things about the research on thorium geology. In: *The way uranium was prospected and produced: collected memoirs by nuclear industry veterans*. Moscow: GEOS Publishing; 2002. p. 72–84. (In Russ.)
- 3. Dushin V. A., Trutnev A. K., Zhuklin E. A., Prokopchuk D. I., Demina L. A. Metallogeny of Mankhambo block in subpolar Urals. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 11-1: 130–145. (In Russ.)
- 4. Koptiaev A. F. Mineralogy and geochemical characteristics of rare metal conglomerates of Man-Khambo (Nether-Polar Ural): PhD in Geology and Mineralogy abstr. of diss. Sverdlovsk; 1969. (In Russ.)
- 5. Oslopovskikh V. N. Ancient conglomerates of the Man-Khambo region (Nether-Polar Ural) and their ore content: PhD in Geology and Mineralogy abstr. of diss. 1970. (In Russ.)
- 6. Shcherbin S. S., Koptiaev A. F., Chelnokov V. P. On the composition of Man-Khambo granite, its conditions and formation history (Nether-Polar Ural). In: *Magmatic formations, metamorphism, and metallogeny of the Urals: Proceedings of the 2nd Ural petrographic meeting.* Vol. 4. Sverdlovsk: USC AS USSR Publishing; 1971. p. 306–317. (In Russ.)

- 7. Shcherbin S. S. Geological conditions of radioactive rare metal mineralization in ancient conglomerates. In: *Geology and the issues of endogenous uranium deposits genesis*. Moscow: Nauka Publishing; 1968. p. 50–64. (In Russ.)
- 8. Shcherbin S. S. Ancient crusts of weathering and their significance in rare metal conglomerates formation. In: *Geology and prospecting for the deposits of rare and nonferrous metals*. 1971. Iss. 81. p. 3–7. (In Russ.)
- 9. Gee D. G., Behakova L., Pease V., Larionov A., Dovshikova L. New, Single Zircon (Pb-Evaporation). Ages from Vendian Intrusions in the Basement beneath the Pechora Basin, Northeastern Baltica. *Polarforschung.* 1998; 68: 161–170.
- 10. McKezzow W. S., Scotese C. R., Brogier M. D. Early Cambrian continental reconstructions. *Journal of the Geological Society*. 1992; 149(4): 589–606.
- 11. Vodolazskaia V. P., Shergina Iu. P., Kotov K. N. Age and genesis of the Nether-Polar Urals granitoids. *Otechestvennaia geologiia = National Geology*. 1999; 5: 48–55. (In Russ.)
- 12. Udoratina O. V. Soboleva A. A., Kuzenkov A. A. Age of granitoids in the Mankhambo and Ilyaiz plutons, the northern Urals: U-Pb data. *Doklady Akademii Nauk*. 2006; 406(6): 810–815. (In Russ.)
- 13. Dushin V. A., Serdiukova A. P., Maliugin A. A., Kozmin V. S. et al. *State geological map of the RF, scale 1 : 200,000. 2nd edition. Ser. North Urals. Page P-40VI (mount Telpos-Iz). Report.* St. Petersburg: Cartography VSEGEI Publishing; 2018. (In Russ.)
- 14. Kholodnov V. V., Shardakova G. Iu., Dushin V. A., Korovko A. V., Shagalov E. S. Riphean-vendian-cambrian magmatism of the Mankhambo block (Subpolar Urals): geochemical typification, correction of geodynamic imaginations, the role of plume-lithospheric interaction. *Petrologiia = Petrology*. 2022; 30(4): 404–431. (In Russ.)
- 15. Udoratina Ó. V., Kalinin E. P., Nikulova N. Iu. Contact surface of Ydzhydliagskii mass granitoids and quartzites of the Telpos series (the Northern Urals). *Trudy Komi NTs UrO RAN = Proceedings of the Komi SC UB RAS*. 2007; 121: 100.
- 16. Pystina Iu. I. Using the morphological features of accessory zircon when dissicating and carrying our correlation of the metamorphized formations the Verkhnekozhimsky and Vangyrsky regions (Nether-Polar Urals). *Trudy Komi fil. AN SSSR = Proceedings of the Komi branch of AS USSR*. 1988; 65: 59–73. (In Russ.)
- 17. Borozdina G. N. On the correlation of the khobeinsky series and formation stratotype in the eastern contact of the Man-Khambo granite mass. *Trudy IGG UrO RAN* = *Proceedings of the IGG UB RAS*. 2009; 156: 57–59. (In Russ.)
- 18. Genesis of Uranium- and Gold-Bearing Precambrian Conglomerates. *Proceedings of Workshop, October 13–15, 1975, Golden, Colorado*. Available from: doi: 10. 1016/0016-7037(58)90115-7
- 19. Krendelev F. P. Metal-bearing conglomerates of the world. Novosibirsk: Nauka Publishing; 1974. (In Russ.)
- 20. Verkhovtsev V. A., Dushin V. A. On the prospects of detecting complex uranium deposits of the unconformity type on the north of the Urals. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* = *News of the Ural State Mining University*. 2000; 10: 108–115. (In Russ.)
- 21. Dushin V. A., Faust A. V. The Riphean granitic magmatism and the metallogeny of the Mankhambo block. *Regionalnaia geologiia i metallogeniia = Regional Geology and Metallogeny*. 2018; 35: 25–33. (In Russ.)
- 22. Dushin V. A., Kozmin V. S., Nikulina I. A., Serdiukova O. P., Kolganov E. R. Geology and rare-metal-uranium-thorium compound mineralization of Manhambo block (Subpolar Urals). *Litosfera = Lithosphere*. 2012; 2: 166–172. (In Russ.)
- 23. Solovev E. S. Analysing the correlation relationship between gold and pathfinder elements for ore zones tracing. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia = Success of the Modern Natural Science.* 2004; 7: 89–90. (In Russ.)
- 24. Mironov Iu. B., Makariev L. B., Rumiantsev N. N., Mikhailov V. A. Prospects for commercial ore potential of ancient conglomerates in Russia. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2010; 1: 19–25. (In Russ.)
- 25. Pawan Kumar Yadav, Manorama Das. Gold, uranium and thorium mineralization in Paleoproterozoic quartz-pebble conglomerate of Dhanjori Group, Singhbhum Craton, India. *Indian Journal of Geosciences*. 2018; 72(2): 139–150.
- 26. Geraldo Capanesi, Alberto Rosada, Maurizio Manigrasso, Pasquale Avino. Rare earth elements, thorium and uranium in the ores of North-Latium (Italy). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012; 291: 163–168.
- 27. Tkachev A. V., Rundkvist D. V., Vishnevskaia N. A. The main features of the historic metallogeny of rare-earth elements. *Geologiia rudnykh mestorozhdenii* = *Geology of Ore Fields*. 2022; 64(3): 209–246. (In Russ.)
- 28. Ronkin Y. L., Ferreiza M., Povtuqa L., Lepikhina O. P. Isotope geology of the Urals. In: *Russia: K-Ar, Rb-Sr, Sr-Nd and U-Pb systematics: Abstract Volume of South-Amezican Symposium on Isotope Geology.* Sao-Paulo, Brazil; 1977. p. 189–203.
- 29. Armstrong F. Genesis of uranium and gold-bearing Precambrian quartz pebble conglomerates. Reston, VA (USA): Geological Survey, 1982.

- 30. Shcheglov A. D. On the metallogeny of South Africa, genesis of Witwatersrand gold fields and the problem of discovering their analogues in Russia. St. Petersburg: VSEGEI Publishing; 1994. (In Russ.)
- 31. Konstantinov M. M., Sharov G. N. Geological structure and prospecting indicators of gold fields in the main geotectonic conditions. Atlas. Book 1. Moscow, Kemerovo: Geokon Publishing; 2002. (In Russ.)
- 32. Eliseev V. I. On the origin of gold-uranium Witwatersrand deposit (South Africa). *Bulletin of MOIP. Geological Department*. 2006; 81(1): 66–73. (In Russ.)
- 33. Kaulina T. V., Lialina L. M., Ilchenko V. L. Sequence of Ree-Th-U minerals in the Litsa uranium ore area (the Kola region). *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Geologiia i geofizika = Scientific Journal of Murmansk State Technical University. Geology and Geophysics.* 2019; 22(1). (In Russ.)
- 34. Evseeva L. S. *The way uranium was prospected and produced: collected memoirs by nuclear industry veterans.* Moscow: GEOS Publishing; 2002. p. 9–20. (In Russ.)
- 35. Thamm J. K., Adams S. S. Geology and recognition criteria for sandstone uranium deposits of the Salt Wash type, Colorado Plateau province (Final report, 1981). In: *Materials on the geology of foreign uranium deposits*. 1984. Iss. 31. p. 189–275. (In Russ.)
- 36. Evseeva L. S., Perelman A. I., Ivanov K. E. *Geochemistry of uranium in the zone of hypergenesis*. Moscow: Atomizdat Publishing, 1974. (In Russ.)
- 37. Kisliakov Ia. M., Shchetochkin V. N. *Hydrogenous ore formation*. Moscow: Geoinformmark Publishing, 2000. (In Russ.)
- 38. Pechenkin I. G., Pechenkin V. G. The evolution of sedimentary ore formation. Moscow: VIMS Publishing; 2008. (In Russ.)
- 39. Mashkovtsev G. A., Konstantinov A. K., Miguta A. K., Shumilin M. V., Shumilin M. V., Shchetochkin V. N. *Uranium in the Russian subsoil*. Moscow: VIMS Publishing; 2010. (In Russ.)
- 40. Afanasiev G. V., Mironov Iu. B., Pinskii E. M. New aspects of sandstone-type deposits formation. *Regionalnaia geologiia i metallogeniia = Regional Geology and Metallogeny*. 2014; 59: 89–96. (In Russ.)
- 41. Khalezov A. B. Uranium deposits in river paleovalleys of the Ural region. Types of uranim deposits of the unconformity type in the Phanerozoic. *Mineralnoe syrie* = *The Mineral Resources Journal*. 2017; 34: 194.

Received 15 December 2022

Information about the authors:

Sfen S. Karagodin – PhD (Geology and Mineralogy), Ural State Mining University veteran. E-mail: sfen80k@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5882-821x

Vladimir S. Karagodin – PhD (Philosophy), associate professor of the Economics and Management Department, Ural State Mining University. E-mail: karagodindec@yandex.ru

Gulnara G. Khasanova – PhD (Geology and Mineralogy), associate professor of the Department of Geology, Exploration and Prospecting, Ural State Mining University. E-mail: fgg.gpr@m.ursmu.ru

Для цитирования: Карагодин С. С., Карагодин В. С., Хасанова Г. Г. Полигенное уран-торий-редкоземельное оруденение Приполярного Урала: история открытия и вопросы генезиса // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 107–123. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-107-123

For citation: Karagodin S. S., Karagodin V. S., Khasanova G. G. Polygenic uranium-thorium-rare earth mineralization of the Nether-Polar Urals: discovery history and genesis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2023; 2: 107–123 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-107-123