

Отзыв

на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Еременко Руслана Умаровича

**«Закономерности концентраций скандия в Накынском алмазоносном и других
кимберлитовых полях Якутии».** Специальность - 1.6.10 – Геология, поиски и разведка
твёрдых полезных ископаемых, минерагения

Открытие месторождений такого важного элемента как скандий в Западной Якутии может внести существенный вклад в развитие страны и, в частности, арктических регионов России, так как он используется в аэрокосмической и оборонной промышленности, при производстве прочных сплавов алюминия, производстве керамики, электроники и в 3D-печати. Необходимость расширения минерально-сырьевой базы Sc указана в документах и распоряжение Правительства Российской Федерации, согласно которым скандий входит в «перечень основных видов стратегического минерального сырья» и закреплен за категорией редкие металлы.

Напомним, что в Якутии имеется известное уникальное месторождение Томтор, в котором скандий может добываться как попутный компонент в коре выветривания. При этом вопрос о вероятном наличии комплексных скандий-редкоземельных месторождений в известных и разрабатываемых алмазоносных полях Якутии ранее не поднимался.

В этом отношении кандидатская диссертация Еременко Руслана Умаровича очень своевременна и актуальна.

Понятны и четко сформулированы цель и основные задачи исследований. Главное – это выявить геологические и физико-химические условия образования, а также локализация вероятных промышленных концентраций скандия в алмазоносных районах Западной Якутии.

Сразу отметим большой фактический материал, собранный Еременко Русланом Умаровичем. Геохимическое опробование большого количества керн скважин и, конечно, множество анализов РФА, ИСР, статистическая обработка больших массивов данных, построение и выявление корреляционных связей и другие виды анализа и обработки.

Вот один из примеров: Автором данной работы изучен керн поисковых скважин разрезов нижнего и верхнего палеозоя, включая горизонты древних кор выветривания, в отмеченных площадях Мало-Ботубинского района и Накынского поля в объеме **24 000** погонных метров. Это впечатляет.

Отсюда, конечно, научная новизна работы и ее практическая значимость. Повторять тезисы новизны и практической значимости мы не будем и полностью согласны с формулировками.

И еще один момент, это разработка новых приемов выделения ближнего околотрубочного пространства кимберлитов на основе анализа коэффициентов корреляции фоновых содержаний определённых элементов во вмещающих породах.

Работа хорошо апробирована, есть и публикации в статьях, и выступления на научных конференциях.

В работе представлены четыре защищаемые положения. И здесь необходимо сказать о том, как построена работа. Всегда оппонентам нравится, когда работа и автореферат построены по одному принципу, а именно, по защищаемым положениям. В этом случае работа построена логично и легко и понятно читается. Труднее всего, когда работа построена по главам и внутри глав защиты защищаемые положения. В большинстве случаев, авторы работы отражают какой материал работы соответствует тому или иному положению. Это понятно и дает возможность легко разобраться с работой и положениями. Труднее всего, когда в начале списком приводятся положения, а потом идут главы и необходимо самому разбирать текст, чтобы понять, какой материал соответствует тому или иному положению.

Вот этот вариант самый неудобный для оппонента. К счастью, диссертант построил работу таким образом, что главные Главы отражают конкретно то или иное защищаемое положение. При этом и автореферат читается легко и понятен, так как он построен по защищаемым положениям.

В Главе 1 приведены материалы о геологическом строении алмазоносных районов. Довольно подробно от более древних пород к четвертичным отложениям. Конечно, здесь использованы данные АК «Алроса», они систематизированы, обобщены и дают определенное представление о геологическом строении Мало-Ботуобинского, Средне-Мархинского и Ыгыаттинского алмазоносных районов Якутии алмазоносных районов Якутии.

Теперь приведем Первое защищаемое положение и определим его новизну.

1. В Якутии имеются перспективы промышленных концентраций скандия двух типов: в древних корах выветривания и в впервые выявленных зонах выклинивания пластового окисления угленосных пермских пород.

Весь материал к обоснованию этого положения приведен в Главе 2. **ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СКАНДИЯ В ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩАХ МАЛО-БОТУОБИНСКОГО, СРЕДНЕ-МАРХИНСКОГО И ЫГЫАТТИНСКОГО АЛМАЗОНОСНЫХ РАЙОНОВ ЯКУТИИ.**

Здесь можно сделать одно замечание такого рода. Перспективы промышленных концентраций скандия выявлены в зонах выклинивания пластового окисления угленосных пермских пород. Я внимательно просмотрел материал Главы 1 и нигде при описании пермских пород не увидел, что хотя бы кратко были упомянуты зоны выклинивания пластового окисления угленосных пермских пород. А это был бы очень хороший мостик между материалом Глав 1 и 2. Диссертация только тогда имеет цельный вид, когда есть соединяющие мостики между главами.

Второе. Надо было бы дать хотя бы краткую информацию о скандии. Формах нахождения в природе, Проявления в каких-то типах пород. Промышленные скопления. Запасы. Добыча. Это надо было сделать, что бы хотя бы иметь представление о том, для чего и почему этим элементом интересуются ученые и производственники.

Проведем анализ материала Главы 2 и посмотрим, насколько обосновано данное первое положение, что действительно в трех алмазоносных районах Якутии имеются промышленные концентрации скандия.

В июле 2021 г. при изучении керна поисковых на алмазы скважин автором данной работы, совместно с Игнатовым П.А. и Томаровской М.А., была выделена зона пластового окисления на участке Улахан-Курунг-Юрях Мало-Ботуобинского алмазоносного поля.

Были проверены имеющиеся данные РФА-анализов на возможные концентрации U, Re, V и Sc. Скандий оказался единственным элементом, повышенные концентрации которого не только на порядок превысили кларковые значения, но и легли в единую протяженную зону северо-восточного простирания. Позже были проверены имеющиеся данные по Слюдякарскому

и Накынскому полям, в которых также имелись аномально высокие концентрации скандия.

И в дальнейшем диссертантом была создана обширная аналитическая база в виде результатов корректных рентгенофлуоресцентных определений (РФА), а также ICP-AES анализов всех обозначенных площадей, и далее эти данные обработаны статистически.

Обратим внимание на то, что признаки пластового окисления в угленосных отложениях перми выявлены на площадях Мало-Ботуобинского и Ыгыаттинского алмазодносных районов Якутии, отстоящих друг от друга на сотни километров, что указывает, по мнению Еременко Руслана Умаровича, на масштабное проявление древних гипергенных процессов. В указанных районах отмечены признаки пластово-трещинного окисления в корах выветривания каменноугольного возраста. Таким образом, проявления древних эпигенетических процессов широко проявлены в Западной Якутии. Все эти результаты большой комплексной работы, проведенной диссертантом за весьма короткий срок.

Несмотря на достаточно высокую степень изученности, признаки эпигенетического окисления в толщах Мало-Ботуобинского района ранее не фиксировались. Однако диссертант вместе с коллегами выявили такие признаки в первично сероцветных породах верхнего палеозоя, а также в захороненной коре выветривания каменноугольного возраста. Аналогичные образования были обнаружены и в разрезах поисковой площади Бестях. С этими образованиями связаны скопления скандия и сопутствующих металлов.

Трещинно-пластовое окисление, как показал диссертант, имеет широкое распространение и отсутствует только в разрезах, где кора выветривания отсутствует.

Эти данные позволили диссертанту предположить, что при формировании зон окисления существовал единый водоносный комплекс, включавший пласты песчаников карбона-перми, трещинно-пластовый коллектор коры выветривания и линейные трещинные зоны в крутопадающих разломах в породах кембрия.

Предполагается, что с зонами внутрипластового, пластово-трещинного и трещинного окисления могли быть связаны процессы эпигенетического рудообразования.

По мнению диссертанта, выявленные концентрационные ореолы скандия (Sc) фиксируют сложную зону выклинивания внутрипластового окисления в породах верхнего палеозоя, а также площадные сорбционный и щелочной барьеры, способствующие его осаждению в карбонатно-глинистом материале древней коры выветривания.

Результаты детального картирования лимонитизированных и осветленных пород пермской толщи, вмещающей триасовые силлы долеритов, показали наличие полосы, выклинивания зоны внутрипластового окисления, представленной осветленными песчаниками. Она прослежена на расстояние более 10 км.

В Мало-Ботуобинском и других алмазоносных районах Якутии в венд-кембрийской толще широко распространены древние, в том числе каменноугольного возраста, захороненные коры выветривания. В них установлены повышенные концентрации скандия, ванадия, кобальта, никеля, лантана и церия. Материал кор выветривания вполне мог попадать в область питания инфильтрационных артезианских бассейнов триассового и более молодого возраста и служить источником рудообразования.

Полученные данные позволяют предположить, что выделенные участки выклинивания зон пластового и трещинно-пластового окисления могут быть потенциально рудоносными.

Таким образом, очень важный вывод делает Еременко Руслана Умаровича: на контакте сероцветных угленосных пород и осветленных окисленных песчаников перми, а также битуминозных и окисленных пород кембрия вероятны концентрации ванадия и скандия.

Материал к первому защищаемому положению хорошо иллюстрирован фотографиями керна и описаниями в таблицах.

Считаем, что положение аргументировано на высоком уровне и принимается.

Перейдем к анализу материала ко второму защищаемому положению

2. Впервые установлены признаки и перспективные геохимические ореолы повышенных концентраций скандия и сопутствующих элементов в Сюльдюкарском и Накынском алмазоносных полях в корах выветривания каменноугольного и триас-юрского возраста. Материал к этому положению лежит в основе Главы 3 **РУДНЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СКАНДИЯ И СОПУТСТВУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ В ДРЕВНИХ КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ НАКЫНСКОГО И СЮЛЬДЮКАРСКОГО АЛМАЗОНОСНЫХ ПОЛЕЙ**

Еременко Руслан Умарович обращает внимание на тот факт, что содержание скандия в качестве попутного компонента в рудах других металлов колеблется от 41 до 100 г/т и более (Wang et al. 2021). На гигантском редкометалльном месторождении Томтор – в карбонатитах и развитых по ним корах выветривания – средние содержания скандия составляют 200 г/т, в промышленных рудах – 500 г/т (Толстов и др., 2009). В этой связи за условное минимально-промышленное содержание скандия в корах выветривания принято значение $CSc = 100$ г/т при кларке в глинистых породах 12 г/т и базитах – 24 г/т.

И этим обозначен порог минимально-промышленное содержание скандия в корах выветривания на рассматриваемых площадях - значение $CSc = 100$ г/т.

Для того, чтобы опробовать коры выветривания больших площадей Накынского и Сюльдюкарского, надо было отобрать большое количество проб и сделать многочисленные анализы РФА. Это очень большая работа, и диссертант успешно ее провел.

При анализе РФА многочисленных проб в Сюльдюкарском поле из 4081 РФА только 12 имеют содержания Sc выше 100 г/т, и лишь 19 выше 50 г/т. Это довольно низкие значения.

Но помимо скандия в этих пробах были выявлены повышенные содержания V (до 796 г/т), Се (до 1598 г/т), Pr (до 123 г/т), Nd (до 422 г/т), Nb (до 394 г/т), Ni (до 4302 г/т) и Со (до 634 г/т), а это уже очень интересный факт в качестве перспективы на потенциальный объект для освоения. Повышенные содержания скандия наблюдались в ближнем околотрубочном пространстве кимберлитовых тел. Обращено внимание на то, что максимальные концентрации полезных компонентов концентрируются в нижних горизонтах коры выветривания

В Накынском кимберлитовом поле проанализировано распределение скандия и ряда других элементов по 46 763 рентгенофлуоресцентным анализам (РФА). Из них в 48 пробах содержание скандия превысило 100 г/т,

Выявлено, что концентрационные аномалии скандия в дяхтарской свите локализованы в узлах пересечения разломов, которые, в том числе, выполнены среднедевонскими дайками и эруптивными брекчиями основного состава.

По данным РФА анализов 9808 проб, взятых из пород дяхтарской свиты Накынского поля, средние содержания скандия составили 14,25 г/т, в 938 пробах они превысили 30 г/т, в 132 оказались больше 50 г/т, в 27 свыше 100 г/т. Абсолютное большинство проб с аномальными концентрациями скандия в дяхтарской свите, представленной глинами. Максимальное содержание достигает 462,5 г/т. Это очень интересный факт для понимания локализации скандия в тех или иных породах.

Также выявлено, что повышенные концентрации скандия (выше 100 г/т) расположены, преимущественно, на палеоводоразделах Дюлюнг-Дяхтарской впадины. Пробы с аномальными концентрациями скандия (>100 г/т) отобраны с глубин от 32,4 до 111,6 м и по большей части представлены также глинами. В разрезе дяхтарской свиты концентрации скандия ассоциируют с заметно повышенными концентрациями ванадия, кобальта, никеля, лантана и церия.

Наиболее перспективная группа сближенных на площади концентраций скандия расположена на западе Накынского кимберлитового поля в узлах пересечения Лиендокитского, Северного, а также Западного, Ботубинского и Лиендокитского разломов.

Таким образом, делается вывод, что значительное число проб с повышенными концентрациями скандия и ряда сопутствующих элементов предопределяет большой поисковый потенциал на скандий Накынского поля. По мнению автора данной работы, по всей видимости, скандий и другие металлы накапливались здесь поэтапно: в позднем девоне – раннем карбоне во время поднятий при формировании среднепалеозойских кор выветривания; в позднем триасе при образовании раннемезозойских кор выветривания; в поздне триасово-раннеюрское время при их ближнем переотложении; позднее при инфильтрации агрессивных по отношению к скандию сульфатных окислительных грунтовых вод и его осаждении в глинах на щелочно-

сорбционном барьере. Вполне разумное предположение и второе защищаемое положение принимается.

Единственное замечание к материалу Глав 2 и 3 касается того, что все хорошо показано с точки зрения сложного процесса образования кор выветривания и накопления в них скандия. Но вот откуда он берется и накапливается. Слабо освещены процессы выветривания и разрушения базитов, то есть разных траппов, которые имеются в данных районах. Также надо было бы более обстоятельно показать и интенсивное выветривание позднедевонских кимберлитов. Источники скандия из коренных пород указаны, но освещены слабо.

3. Третье защищаемое положение: По расчётам петрохимических модулей и корреляционных связей Sc с другими элементами обоснованы две формы его высоких концентраций в древних корах выветривания: сорбционная в монтмориллоните и изоморфная в тонкозернистом акцессорном ванадий-скандиеносном титаномagnetите.

Материал к этому положению лежит в основе Главы 4. Наличие основных, ультраосновных и щелочных пород в этом регионе, которые подвергались выветриванию предопределяет возможность накопления в среднепалеозойских и мезозойских корах выветривания скандия и попутных компонентов. Для определения того, какими типами пород внутри глинистой дяхтарской свиты ассоциирует Sc, Еременко Русланом Умаровичем использован анализ петрохимических модулей, позволяющий классифицировать разности внутри свиты на основании макрокомпонентов. За основу взяты: известные гидролизатный и алюмокремнёвый модуль, общая нормативная щёлочность, Fe/Mn и Ti/Zr индикаторы (Скляров, 2001).

Каждый модуль вычисляется по определенной формуле. Например, гидролизатный модуль вычисляется по формуле $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO / SiO_2$. Показатель дает возможность разделять терригенные и глинистые отложения по содержанию либо продуктов гидролиза (каолинит, оксиды алюминия, железа, марганца), либо кремнезема.

Здесь возникает одно замечание вот какого рода. Для каждого модуля есть числовые значения. Например, при гидролизатном модуле при значении модуля меньше 0.1 речь идёт о кварцевых песчаниках и алевролитах, от 0.1 до 0.2 о слабоглинистых песчаниках и алевролитах, 0.2-0.3 соответствует глинистым песчаникам. Вот эти значения кем предложены, и принимал ли автор данной работы какое-то участие для корректировки этих значений при применении их к анализу Sc.

Вот интересен фациальный индикатор Ti/Zr, который указывает на дальность переноса вещества и основан на том, что при длительной транспортировке обломочной составляющей породы значения этого модуля уменьшаются вследствие лучшей сохранности циркона в сравнении с титансодержащими минералами. 69% проб с высоким содержанием скандия указывают на породы, которые не подвергались дальнему переносу, однако 31% проб, согласно модулю, явно дальнепривносные. Это показывает, что

среди проб с повышенным содержанием Sc есть породы как ближнего, так и дальнего сноса. Показана достаточно неплохая информативность данного модуля. Или, например, согласно Fe/Mn фациальному индикатору все пробы являются континентальными отложениями за исключением нижней пробы (141 г/т), которая относится к мелководным отложениям, что скорее всего связано с положением в нижней части разреза и эрозией карбонатных пород олдондинской свиты ордовика.

В результате анализа всех петрохимических модулей большая часть концентраций скандия выше 100 г/т связана с глинистыми, повышенно железистыми, породами зрелой коры выветривания, которые накопились в континентальных, слабощелочных условиях и не испытали значительного перемещения. По коэффициентам корреляций скандия с калием, рубидием и ванадием можно считать, что форма нахождения рудных концентраций скандия предполагается в виде сорбции в монтмориллоните и в изоморфном виде в тонкозернистом ванадий-скандиеносном титаномагнетите. Этот вывод принимается и показывает, что эти модули весьма неплохой инструмент для привязки скандия к тем или иным породам и чувствительны к их изменениям, также может указывать на сложность и длительность процесса изменения при формировании кор выветривания.

Данное положение принимается. Таким образом, по петрохимическим модулям большая часть концентраций скандия выше 100 г/т связана с глинистыми, повышенно железистыми, породами зрелой коры выветривания, которые накопились в континентальных, слабощелочных условиях и не испытали значительного перемещения. По коэффициентам корреляций скандия с калием, рубидием и ванадием можно считать, что форма нахождения рудных концентраций скандия предполагается в виде сорбции в монтмориллоните и в изоморфном виде в тонкозернистом ванадий-скандиеносном титаномагнетите.

Перейдем к последнему четвертому защищаемому положению.

4. Четвертое защищаемое положение: Выявлены нарушения корреляционных связей фоновых содержаний V, Cr, Co, Ni, Zn, Zr и Sc в осадочных породах нижнего палеозоя, вмещающих кимберлиты Накынского и Сюльдюкарского алмазоносных полей. Они могут быть использованы в качестве нового поискового признака кимберлитов на закрытых поисковых площадях.

Здесь все очень просто и понятно. Есть фоновые содержания вышеперечисленных элементов, и они нарушаются вблизи прорыва кимберлитовых расплавов на расстоянии менее 100 метров, а от 100 и до 200 метров они приближаются к фоновым. Влияние расплава, конечно, неизбежно при развитии системы трещин вблизи околотрубочного пространства. Здесь определенную роль играют флюиды и метеорные воды, переносчики этих элементов.

Вот Еременко Руслан Умарович и обратил на это внимание и решил проанализировать корреляционные связи этих элементов в околотрубочном пространстве и вдали, как они нарушаются и какие закономерности их предопределяют.

Он предложил вполне логичную методику обработки аналитического материал, которая включает семь процедур.

1. Разделение проб на околокимберлитовые (до 100 м от кимберлита) и фоновые (далее 200 м от тела в пределах поля);
2. Отбраковка проб на основании содержаний макроэлементов для снятия влияния процессов древнего выветривания;
3. Выбор типоморфных микроэлементов для анализа, исходя из геологического строения и особенностей площади;
4. Анализ закона распределения в выборках и расчёт средних и медианных значений для каждого элемента;
5. Отбраковка и исключение экстремальных значений, составляющих больше медианного в 10 раз, для снятия заведомо аномальных концентраций;
6. Расчет коэффициентов корреляции и составление корреляционных матриц;
7. Интерпретация и сравнение данных по фону с околокимберлитовыми участками и поисковыми площадями, в том числе, где вероятно наличие трубки взрыва.

Здесь все логично и понятно.

На основании значений коэффициентов корреляции в фоновом пространстве и в околотрубочном пространстве Сюльдюкарского кимберлита была построена диаграмма соотношений коэффициентов корреляции и проанализированы.

Им выявлено, что для таких пар элементов как V-Cr, V-Zn, V-Ni, V-Se, Se-Zn, Se-Cr отмечаются значимые изменения в значениях коэффициентов. Ещё более отчётливо видна разница при изучении зон сжатия и растяжения Сюльдюкарских кимберлитов.

Высокая корреляция между элементами фоновых содержаний для осадочных пород, очевидно, по мнению диссертанта, обусловлена процессами выветривания, морской седиментации, диагенеза и катагенеза терригенно-карбонатных отложений

Автор работы подчеркивает высокую положительную связь отмеченных пар для геохимического фона осадочных терригенно-карбонатных пород: коэффициенты корреляции колеблются от 0,71 до 0,88. Во-вторых, для всех пар элементов имеет место снижение корреляции при переходе от фона к околотрубочному пространству. Особенно это очевидно для корреляций Zn с Cr, V и Ni. Также значительное снижение связи получилось между кобальтом и цирконием. В-третьих, надо отметить небольшие нарушения положительных связей между однотипными элементами-индикаторами кимберлитов (Cr, Co и Ni) и базитофильным V.

Этому он дает вполне нормальное объяснение. В сложных условиях при взрывах должен был формироваться сложный газовый флюид, часть которого захватывала вмещающую кимберлиты геологическую среду. Отсюда делается вывод о том, что околотрубочное пространство можно использовать при поиске алмазных месторождений. Вполне логичное предложение.

Таким образом, по нашему мнению, основная цель работы «**выявление геологических и физико-химических условий образования, а также**

локализация вероятных промышленных концентраций скандия в алмазоносных районах Западной Якутии» выполнена полностью.

Вероятные промышленные концентрации Sc локализованы в западной части Накынского поля на участке 500м в ширину и 3 км в длину. Промышленные, но слабо рентабельные концентрации отмечены в коре выветривания по Сюльдюкарскому кимберлиту.

Апробация работы вполне отвечает всем требованиям ВАК. Работа логично построена, интересна и несет научную новизну. Все задачи логично сформулированы, четкие и отражают существо работы. Диссертация полностью соответствует разделу 4 паспорта научной специальности 1.6.10.

Таким образом, в целом, работу можно признать весьма актуальным, имеющим генетическое значение и практическую значимость, исследованием. Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Достаточный список опубликованных работ, в том числе и в реферируемых научных журналах. Автореферат полностью отражает суть представленной работы. Работа написана ясным и понятным русским языком.

Автор данной работы, **Еременко Руслан Умарович**, сложившийся специалист в области геологии, поисков и разведки твердых полезных ископаемых, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.10 – геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения.

Руководитель направления, профессор,
доктор геол.-мин. наук, лауреат

Премии Правительства России в области науки и техники **В.К. Гаранин**

Подпись В.К. Гаранина подтверждаю,
Руководитель Отдела кадров



Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Минералогический музей
им. А.Е. Ферсмана Российской академии наук
119071, г. Москва, Ленинский проспект, дом 18, корпус 2,
Телефон (495) 952-00-67; факс (495) 952-48-50. E-mail: mineral@fmm.ru