

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ им. А.Е.ФЕРСМАНА  
Российской академии наук (ФАНО России)  
Ленинский пр-т, дом 18, корпус 2, Москва, 119071  
Телефон (495) 952-00-67; факс (495) 952-48-50. E-mail: [mineral@fmm.ru](mailto:mineral@fmm.ru)

№ \_\_\_\_\_

10.01.2017

### **ОТЗЫВ**

**официального оппонента**

**на диссертацию Яковлева Евгения Юрьевича**

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗОТОПНО-РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ  
ПОИСКОВ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ  
АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ»,**

**представленную на соискание ученой степени**

**кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.11 – геология,  
поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения**

Представленная работа актуальна, поскольку расширяет спектр методов прогноза и поиска месторождений алмаза, нужны новые подходы к решению задач поисков месторождений алмаза и внедрение их в практику поисковых работ. Это особенно актуально для Архангельской алмазоносной провинции, где стоит остро задача приращения запасов алмазного сырья за счет открытия новых месторождений.

Цель вполне аргументирована - исследование систем радиоактивных изотопов, их активности и пространственного распределения в породах и водах на территории Архангельской алмазоносной провинции для установления связи с геологическим строением территории и особенно околотрубного пространства кимберлитов и разработки новых методов поисков коренных источников алмазов.

С этой целью решались несколько задач: Рассмотреть геологическое строение Зимнебережного алмазоносного района и околотрубного пространства кимберлитовых тел; Изучить изотопный состав урана в кимберлитах и вмещающих породах околотрубного пространства кимберлитовых трубок; Выполнить исследования неравновесного урана в поверхностных и подземных водах; Выполнить исследования распределения радиоактивных элементов в околотрубном пространстве кимберлитов и перекрывающих отложениях; Провести исследования объемной активности радона над кимберлитовыми трубками.

Отметим достаточно полный фактический материал и разнообразные методы полевых и лабораторных исследований, включающие в себя гамма-спектрометрию, радоновую съемку и альфа-спектрометрию с радиохимическим выделением.

Научная новизна. В ходе выполнения диссертационной работы к решению поставленных задач и умение автора работы применять эти методы

для решения поставленных задач были получены следующие научные результаты:

В породах околотрубного пространства установлены избытки изотопа  $^{234}\text{U}$ . Высокие значения величины  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  обусловлены геологическим строением околотрубного пространства. Подземные воды, циркулирующие в околотрубном пространстве кимберлитовых тел, сопровождаются аномальными активностями дочернего изотопа  $^{234}\text{U}$  по отношению к  $^{238}\text{U}$ . Повышенные по отношению к фону концентрации радиоэлементов в околотрубном пространстве формируют аномалии гамма-поля в перекрывающих трубки отложениях. Пространственная картина распределения радиоактивных элементов и приуроченность их к геологическим структурам Зимнего берега указывает на то, что существует восходящая вертикальная миграция радиоактивных изотопов по разломам, контролирующим размещение кимберлитов. Аномальная объемная активность радона в перекрывающих отложениях является отражением развития в околотрубном пространстве трещиноватых газопроницаемых зон, по которым происходит миграция радона к дневной поверхности.

Достоверность научных положений и выводов обосновывается большим фактическим материалом полевых и лабораторных исследований, полученным с применением высокоточной радиометрической аппаратуры (высокочувствительного и производительного гамма-спектрометрического комплекса RS-701 (Канада).

Конечно, имеется и практическая значимость, т.к. вся работа Яковлева Е.Ю. направлена на получение достоверного практического результата, выявление аномально неравновесного изотопного состава урана во вмещающих породах околотрубного пространства, а также в подземных водах, циркулирующих в пределах околотрубного пространства.

Научная апробация вполне достойна, по теме работы опубликовано 15 работ, из которых 3 статьи входят в перечень рекомендованных ВАК изданий.

Диссертационная работа содержит 125 страниц, включая 6 таблиц и 36 рисунков. Состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 120 наименований.

Как обычно первая глава – это краткий геологический обзор ААП. И, главное, рассмотрены некоторые негативные факторы, затрудняющие эффективно применять различные методы поиска кимберлитов на этой территории. Вторая глава – анализ основных свойств и особенностей распределения радиоактивных элементов в геологической среде, особенно применительно к объектам кимберлитового магматизма. Автором работы сделан важный вывод о перспективности развития радиометрических методов для поисков кимберлитовых тел на территории ААП. Также указывается на комплексный подход в использовании различных радиометрических методов и к интерпретации полученных данных по структурно-геологическому принципу, которые позволят повысить эффективность радиометрии для поисков коренных месторождений алмаза. Третья глава

посвящена описанию методов полевых и лабораторных исследований. Это комплекс изотопно-радиогеохимических методов, включающих в себя альфа- и гамма-спектрометрию и эманационные исследования.

В четвертой главе представлены результаты исследований изотопного состава урана в кимберлитах, вмещающих породах, поверхностных и подземных водах Золотицкого поля ААП. В пятой главе представлены результаты исследования распределения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), а также объемной активности радона (ОАР) во вмещающих и перекрывающих породах кимберлитовых трубок Зимнебережного района ААП. В Заключение приведены основные выводы по диссертационной работе.

Работа структурно построена по защищаемым положениям, т.е. после тезиса (защищаемого положения) приводятся детальные доказательства и аргументы того, что этот тезис верен. Аргументация защищаемого положения 1 приведена в главе IV; положений 2 и 3 - в главе V. Это очень удобно для анализа положений. Перейдем к анализу защищаемых положений (их три).

**Защищаемое положение 1. Вмещающие породы околотрубного пространства кимберлитов выделяются по возрастанию изотопного отношения урана  $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  в сторону увеличения активности изотопа  ${}^{234}\text{U}$  по отношению к  ${}^{238}\text{U}$ , что в свою очередь отражается на формировании аномальных избытков  ${}^{234}\text{U}$  в подземных водах (до  $\gamma > 4$ ), циркулирующих в околотрубном пространстве кимберлитовых трубок Архангельской алмазонасной провинции.**

Исследования проводились на примере кимберлитовых трубок Архангельская и Пионерская месторождения им. М.В. Ломоносова Золотицкого поля. Был изучен изотопный состав урана в кимберлитах и вмещающих породах. Мы хорошо знаем, что эти тела сегодня находятся в разработке и хорошо изучены породы и околотрубного пространства и самих трубок. В качестве эталонных выбор этих трубок не вызывает споров и каких-либо вопросов. Было бы неплохо поставить эксперименты и на каком-нибудь объекте месторождения или Золотицкого поля, который не тронут, не вскрыт, закрыт четвертичными отложениями. Как в этом случае работают изотопно-радиохимические методы? Ведь поиск ведут на сложных территориях, вот в чем дело!

Тем не менее, работы были поставлены, исследования на эталонных объектах проведены, результаты получены. Проведем анализ полученных результатов. Автор работы показал, что изотопное отношение урана  $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  на трубке Архангельская изменяется в пределах от 0,86 до 1,60 (рис. 1). Далее также было показано, что и во вмещающих породах этот параметр также не отклоняется от равновесной величины. А вот вокруг трубки в околотрубном пространстве это отношение нарушено в сторону увеличения  $\gamma$  более 1,1. При этом значения неравновесного урана изменяются по площади закономерно и образуют вокруг контура трубки ореол повышенных значений  $\gamma$

концентрической формы с величинами более 1,1. Концентрация урана, исследованная альфа-спектрометрическим методом, изменяется в пределах от 0,6 до 4,07 ppm и также образует вокруг трубки ореол повышенных значений концентраций урана. Причиной резкого нарушения изотопного отношения урана в породах околотрубного пространства являются структурно-геологические особенности кимберлитовой трубки Архангельская. Это подтверждается результатами исследований, в ходе которых в околотрубном пространстве трубки Архангельская были зафиксированы разрывные нарушения (Игнатов, 2009).

Автор работы указывает, что распределение ореола неравновесного урана в околотрубном пространстве, можно связать развитием тектонических нарушений на контактах трубки и на некотором удалении от нее.

Изменение режима циркуляции подземных вод в околотрубном пространстве в результате смещения минерализованных вод вендского комплекса с пресными водами инфильтрационного происхождения создает условия для осаждения урана вокруг трубки. В ходе этих процессов происходит образование минеральных фаз урана в результате чего, происходит современное активное фракционирование изотопов  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , которое устанавливается по избыткам урана-234 в породах околотрубного пространства трубки Архангельская.

Точно такие же данные были получены и при изучении изотопного отношения урана  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в околотрубном пространстве трубки Пионерская.

Судя по особенностям изменения величины  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в кимберлитах и вмещающих породах, Яковлев Е.Ю. делает вывод о единой природе образования избытков изотопа  $^{234}\text{U}$  в породах околотрубного пространства трубок Пионерская и Архангельская, которая заключается в развитии тектонических нарушений, ограничивающих кимберлитовые трубки. Осаждение урана в околотрубном пространстве, по его мнению, приводит к активной миграции изотопа  $^{234}\text{U}$ .

Процессы фракционирования изотопов  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  в породах околотрубного пространства приводят к активной миграции  $^{234}\text{U}$  в воду и формированию вокруг трубки ореола с аномальными значениями  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . Это подтверждается исследованием изотопного состава урана природных вод некоторых тел Золотицкого кимберлитового поля ААП. Поскольку возрастание избытка изотопа  $^{234}\text{U}$  происходит с приближением к кимберлитовым трубкам, как было установлено Е.Ю. Яковлевым, то отсюда следует, что подземные воды претерпевают изменения в результате фильтрации через породы непосредственно в водоносных горизонтах околотрубного пространства и приобретают аномальную изотопную метку. Детально изменение величины отношения четных изотопов урана в подземных водах было исследовано в пределах куста трубок – Архангельская, Карпинского-1, Капринского-2 (рис. 5). Во всех случаях увеличение избытков изотопа  $^{234}\text{U}$  происходит с приближением к границам кимберлитовых трубок. Ореол неравновесного

урана формирует вокруг трубок аномалию избытков  $^{234}\text{U}$  концентрической формы.

Процессы активного фракционирования изотопов урана в породах, связанные с геологическим строением околотрубочного пространства приводят к миграции урана-234 и обогащению подземных вод избытками изотопа  $^{234}\text{U}$ . Выявленные закономерности свидетельствуют об очевидной связи аномальных избытков  $^{234}\text{U}$  с кимберлитовыми телами и возможности использования величины  $\gamma = ^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$  в качестве поискового признака кимберлитовых трубок.

Материал к защищаемому положению достаточно полный, отсюда и выводы вполне корректны.

Защищаемое положение в целом принимается при одном замечании.

**Замечание к защищаемому положению только одно: речь может идти только об околотрубочном пространстве кимберлитовых трубок месторождения им. М.В. Ломоносова, а не обо всех кимберлитовых трубках ААП, как записано в защищаемом положении.**

**Защищаемое положение 2. Структурно-геологические особенности кимберлитовых трубок Архангельской алмазонасной провинции обуславливают накопление естественных радиоактивных элементов U, Th, K в околотрубочном пространстве кимберлитов и рудоконтролирующих зонах, что отражается в формировании ореолов повышенных по отношению к фону концентраций U, Th, K в перекрывающих трубки отложениях, трассирующих кимберлитовмещающие структуры.**

Автором работы выполнены исследования распределения радиоактивных элементов (U, Th, K) во вмещающих и перекрывающих породах в пределах кимберлитовых трубок Золотицкого и Чидвинско-Ижмозерского полей ААП. Е.Ю. Яковлев полагает, что к настоящему времени четкой приуроченности к кимберлитовым трубкам ореолов рассеяния радиоактивных элементов в перекрывающих отложениях на территории ААП не установлено. Главной из причин, осложняющих применение радиометрических методов на данной территории, по его мнению, является закрытость территории, выражающаяся в развитии мощной толщи перекрывающих отложений, которая может создавать большое количество ложных аномалий и значительно снижать поисковую эффективность радиометрических методов.

**Здесь возникает один вопрос, а что такое, по мнению автора, мощная толща перекрывающих отложений? Надо отметить, что на сегодня фонд выходящих на поверхность кимберлитовых тел исчерпан и в этом случае встает вопрос о пределах применимости и эффективности радиометрических методов на закрытых территориях.**

Для того чтобы выявить малые флуктуации параметров гамма-поля, необходимо проведение гамма-спектрометрической съемки в наземном варианте с использованием современных высокоразрешающих и высокочувствительных детекторов. Этот подход и был реализован в рамках

данной работы. Интерпретация полученных радиоизотопных данных при наземных радиометрических съемках проводилась с учетом геологических предпосылок формирования тех или иных аномалий ЕРЭ. Это естественно, т.к. любые геофизические аномалии связаны с геологическими и вещественными предпосылками. Яковлев Е.Ю. справедливо полагает, что концентрирование радиоэлементов происходит на геохимических барьерах, в которых существуют восстановительные условия, приводящие к осаждению изотопов. В качестве такого геохимического барьера могут выступать имеющие щелочные свойства кимберлитовые трубки, но также и кимберлитоконтролирующие разломы, выделяемые в осадочном чехле (Игнатов и др., 2008). Для установления концентрации и распределения радиоактивных элементов в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел в рамках работы были выполнены высокоточные гамма-спектрометрические исследования в карьере кимберлитовой трубки Архангельская. Они показали, что концентрация тория в околотрубочном пространстве колеблется в пределах от 8 до 32 ppm. Фоновые значения составляют около 4 – 6 ppm. Концентрация урана в пределах данной области изменяется в среднем от 4 до более 10 ppm при фоновых значениях 2,5 – 3,0 ppm. Содержание калия в пределах исследуемой области изменяется от 1,4 до более 3,4% при фоновых значениях 1,0 – 1,2 %.

Таким образом, в результате высокоточных гамма-спектрометрических исследований на трубке Архангельская автором работы установлено, что околотрубочное пространство выделяется повышенными и аномальными концентрациями ЕРЭ и суммарной мощностью гамма-излучения относительно фоновых значений. Размеры ореолов составляют около 1,5 – 2 диаметров трубки. Далее Яковлев Е.Ю. предполагает, что вначале идет накопление радиоактивных элементов, а далее играет роль структурно-геологическая позиция кимберлитовой трубки Архангельская, определяющая современный этап концентрирования радиоэлементов в околотрубочном пространстве. Развитие зон трещиноватости, ограничивающих трубку Архангельская, по всей видимости, по мнению Яковлева Е.Ю., привело к проникновению инфильтрационных вод в водоносные горизонты вендских отложений и изменению гидрохимического режима подземных вод, в результате которого произошло осаждение урана и миграция изотопа  $^{234}\text{U}$  и ЕРЭ.

Если по зонам разломов осадочного чехла происходит восходящая миграция ЕРЭ, то это может приводить к формированию ореолов радиоактивных элементов в верхних горизонтах перекрывающих кимберлитовые тела, которые могут быть зафиксированы наземными исследованиями.

Указанные предпосылки находят свое доказательство в результатах гамма-спектрометрической съемки на территории Золотицкого и Чидвинско-Ижмозерского полей ААП. Это и было показано на примерах Золотицкого кимберлитового поля и Чидвинско-Ижмозерского поля.

Проведенные исследования показали в пределах Золотицкого и Чидвинско-Ижмозерского полей ААП, что повышенные концентрации

радиоэлементов в околотрубочном пространстве формируют аномалии гамма-поля в перекрывающих трубки отложениях. Пространственная картина распределения ЕРЭ имеет выраженный линейный субмеридиональный характер, совпадающий с направлением главных кимберлитоконтролирующих разломов.

**Вопрос один, а при какой мощности перекрывающих отложений можно почувствовать аномальный эффект в значениях ЕРЭ.**

Еще одно замечание, которое относится вообще к работе. Автор в своей работе оперирует словом «кимберлитовые» трубки. Это и при описании, например, трубки Архангельская, и при описании трубок Чидвинско-Ижмозерского поля. Но вообще-то на сегодня известно, что в ААП имеются тела кимберлитов, кимпикритов, пикритов. И, если трубки Золотицкого поля – это кимберлитовые тела, то трубки Чидвинско-Ижмозерского поля - это пикриты. При этом необходимо точно говорить о том, а какой это тип породы: магнезиально-алюминистый, или железотитанистый. Все это известно и, конечно, в работе необходимо более точно и корректно работать с терминами, определяющими тип трубки и петрологический характер пород трубок.

А материал к защищаемому положению 2 не вызывает сомнения в тех выводах, которые автор делает в конце раздела, доказывающего несомненность выводов и сформулированного положения.

**Защищаемое положение 3. Разрывные нарушения, сопровождающие экзоконтакты кимберлитов, обуславливают аномальную объемную активность радона-222, которая фиксируется в почвенном воздухе над кимберлитовыми телами.**

Исследования ОАР выполнены в пределах кимберлитовых тел Золотицкого и Чидвинско-Ижмозерского полей ААП.

Количество точек наблюдения было вполне достаточным, надо было изучить вариации ОАР в пределах кимберлитового тела, на контактах с вмещающей средой, а также выходом на фон за пределы границ трубки. Изучение активности радона в почвенном воздухе показало, что значения ОАР по элементам профилей подчиняются определенной закономерности, связанной со структурной позицией кимберлитовых тел. Это очень важно.

Значения ОАР в почвенном воздухе по профилям, пересекающим кимберлитовые трубки, изменяется в широких пределах от 91 до 11519 Бк/м<sup>3</sup>. В пределах тела трубок средние значения объемной активности <sup>222</sup>Rn изменяются в диапазоне 134 – 1555 Бк/м<sup>3</sup>. Фоновые значения колеблются в пределах от 91 до 664 Бк/м<sup>3</sup>.

Аномальное увеличение концентрации радона наблюдается на границах трубок с вмещающими породами. Подобный характер распределения эманаций радона объясняется развитием трещиноватых зон в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, которые приводят к активной миграции

$^{222}\text{Rn}$  к поверхности. Все совершенно правильно. Это очень хорошо видно на рисунках (например, рис. 10 автореферата).

Далее автор работы подробно рассматривает распределение радона в пределах кимберлитовых тел Золотицкого поля и трубки Чидвинская.

Значения ОАР в почвенном воздухе по профилям, пересекающим кимберлитовые трубки Золотицкого поля, изменяется в широких пределах от 91 до 11519 Бк/м<sup>3</sup>. В пределах тела трубок средние значения объемной активности  $^{222}\text{Rn}$  изменяются в диапазоне 134 – 1555 Бк/м<sup>3</sup>. Фоновые значения колеблются в пределах от 91 до 664 Бк/м<sup>3</sup>.

Аномальное увеличение концентрации радона наблюдается на границах трубок. По профилю значения ОАР изменяются от 2508 до 11519 Бк/м<sup>3</sup>, что в 4 и более чем в 20 раз превышает фоновые показатели и значения, наблюдаемые в пределах тела трубки. Подобный характер распределения эманаций радона объясняется Автором данной работы развитием трещиноватых зон в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, которые приводят к активной миграции  $^{222}\text{Rn}$  к поверхности.

Измерения ОАР в почвенном воздухе по профилю, пересекающему северный столб трубки Чидвинская изменяются в пределах 114 – 1312 Бк/м<sup>3</sup>. А в пределах контура трубки вариации ОАР незначительны от 185 до 312 Бк/м<sup>3</sup>.

В работе показано, что на границах трубки наблюдается аномальное увеличение концентрации радона. На северо-западной границе трубки по профилю максимальная активность радона в почвенном воздухе достигает значений 1156 Бк/м<sup>3</sup>, на юго-восточной границе этот показатель равен 1312 Бк/м<sup>3</sup>. За пределами границ трубки активность  $^{222}\text{Rn}$  резко падает, уменьшаясь до минимальных значений.

Автор работы логично обращает внимание на то, что на контактах кимберлитовых трубок Золотицкого поля и кимберлитовой трубки Чидвинской с вмещающим породами развиты трещиноватые разломные зоны с повышенной газопроницаемостью, приводящие к образованию наблюдаемых аномальных концентраций ОАР в почвенном воздухе.

Наличие в околотрубочном пространстве трубок Золотицкого поля и трубки Чидвинской зон с повышенной трещиноватостью полностью подтверждается исследованием глубинного строения трубки, выполненными методом микросейсмического зондирования. По выделенным разломным структурам и происходит миграция радона и возможно других глубинных газов.

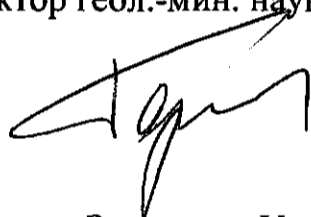
Таким образом, установлено, что аномальные концентрации радона, фиксируемые по бортам трубки, обусловлены зонами дробления горных пород вокруг трубки, которые проявляются в виде контрастных низкоскоростных зон по данным ММЗ.



Таким образом, в целом, работу можно признать весьма актуальным, имеющим определенную генетическую значимость исследованием, которое также имеет большое практическое значение. Представленная диссертация полностью соответствует требованиям ВАК,а, 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, логически выстроена.

Автор данной работы **Яковлев Евгений Юрьевич** заслуживает присвоения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

Научный руководитель Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН,  
Лауреат Премии Правительства в области науки и техники,  
Лауреат Премии им. А.Е. Ферсмана РАН,  
профессор, доктор геол.-мин. наук



Виктор Константинович Гаранин

Отзыв утвержден на Заседании Ученого Совета Минмузея

Ученый секретарь Совета, кандидат геол.-мин. наук **Е.И. Матвеев**



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ им. А.Е.ФЕРСМАНА Российской академии наук

Ленинский пр-т, дом 18, корпус 2, Москва, 119071

Телефон (495) 952-00-67; факс (495) 952-48-50. E-mail: [mineral@fmm.ru](mailto:mineral@fmm.ru); [vgaranin@mail.ru](mailto:vgaranin@mail.ru)