

На правах рукописи



ЯКОВЛЕВ Евгений Юрьевич

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

Специальность 25.00.11 - Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых,
минерагения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Архангельск 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре комплексного изучения Арктики Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА РАН)

Научный руководитель: **Киселев Георгий Петрович,**
доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФГБУН ФИЦКИА РАН

Официальные оппоненты: **Гаранин Виктор Константинович,**
доктор геолого-минералогических наук, профессор, научный руководитель ФГБУН Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН

Алешин Алексей Петрович,
кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиогеологии и радиогеоэкологии ИГЕМ РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГУП ЦНИГРИ)

Защита диссертации состоится «16» февраля 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.121.04 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ) www.mgri-rggru.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 201_ года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



Бобков А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. К настоящему времени, в применении традиционных методов прогноза и поисков месторождений алмазов, таких как магниторазведка, на территории Архангельской области наметился определенный кризис, выражающийся в снижении интенсивности аномалий магнитного поля и приближения к уровню геологических помех. Множество других геофизических и геохимических методов, опробованных для решения задачи поисков коренных месторождений алмазов, не продемонстрировали устойчивую эффективность. В связи с этим, особую важность приобретает необходимость разработки новых подходов в решении задач поисков месторождений алмазов и внедрения их в практику поисковых работ.

Существующие фактические данные по известным алмазоносным провинциям мира свидетельствуют об эффективности применения радиометрических методов для решения задачи поисков кимберлитовых тел. Однако для Архангельской алмазоносной провинции, которая относится к закрытым поисковым территориям, перспективы применения радиометрических методов для решения проблемы поисков трубок ограничиваются недостаточными данными о характере распределения и фракционирования естественных радиоактивных изотопов на данной территории в условиях развития мощной толщи перекрывающих отложений.

Цель и задачи исследования.

Целью данной диссертационной работы является 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 околотрубочного пространства кимберлитов и разработки методов поисков коренных источников алмазов.

Задачи исследования:

1. Рассмотреть геологическое строение Зимнебережного алмазоносного района и околотрубочного пространства кимберлитовых тел;
2. Изучить изотопный состав урана в кимберлитах и вмещающих породах околотрубочного пространства кимберлитовых трубок;
3. Выполнить исследования неравновесного урана в поверхностных и подземных водах;
4. Выполнить исследования распределения радиоактивных элементов в околотрубочном пространстве кимберлитов и перекрывающих отложениях;
5. Провести исследования объемной активности радона над кимберлитовыми трубками.

Фактический материал. Работа выполнена в лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФГБУН ФИЦКИА РАН. Исследования проводились в период обучения в аспирантуре в составе научного коллектива лаборатории экологической радиологии, под руководством заведующего лабораторией, доктора геолого-минералогических наук, Георгия Петровича Киселева. Диссертационная работа была связана с выполнением исследований по теме ФНИР лаборатории экологической радиологии, а также по грантам Министерства науки и образования Архангельской области и РФФИ (проекты №№ 16-35-00153 и 13-2015-03).

Методы исследования. В диссертационной работе использовались 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 получены следующие научные результаты:

1. В породах околотрубочного пространства установлены избытки изотопа ^{234}U . Формирование высоких значений величины $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ обусловлено геологическим строением околотрубочного пространства.
2. Установлено, что подземные воды, циркулирующие в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, сопровождаются аномальными активностями дочернего изотопа ^{234}U

по отношению к ^{238}U .

3. Выявлено, что повышенные по отношению к фону концентрации радиоэлементов в околотрубочном пространстве формируют аномалии гамма-поля в перекрывающих трубки отложениях, что доказывается результатами гамма-спектрометрической съемки.
4. Пространственная картина распределения радиоактивных элементов и приуроченность их к геологическим структурам Зимнего берега указывает на то, что, несмотря на развитие в районе Зимнего берега мощной толщи аллохтонных четвертичных отложений, существует восходящая вертикальная миграция радиоактивных изотопов по разломам, контролирующим размещение кимберлитов.
5. Показано, что аномальная объемная активность радона в перекрывающих отложениях является отражением развития в околотрубочном 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. Благодаря использованию высокочувствительного и производительного гамма-спектрометрического комплекса RS-701 (Канада) получены значения радиометрических показателей в более чем 100 000 точек наблюдений.

Лабораторные аналитические исследования выполнялись в аккредитованной лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФГБУН ФИЦКИА РАН по аттестованным методикам Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС).

Практическая значимость работы. Выполненный в работе комплекс изотопно-радиогеохимических исследований показал, что известные кимберлитовые трубки проявляются в виде локальных радиоизотопных аномалий, как на дневной поверхности, так и в кернах поисковых скважин. Особенно отчетливо это проявляется в формировании аномально неравновесного изотопного состава урана во вмещающих породах околотрубочного пространства, а также в подземных водах, циркулирующих в пределах околотрубочного пространства. Полученные результаты создают предпосылки использования радиометрических методов для выделения перспективных участков на обнаружение кимберлитовых трубок в пределах Архангельской алмазонасной провинции.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в полевых и лабораторных исследованиях, в обработке и интерпретации полученной информации и формулировании выводов.

Научная апробация и публикации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках научных конференций различного уровня: IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, 2015); XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (МГРИ-РГГРУ, Москва, 2015); III всероссийская молодежная научная конференция «Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике» (Улан-Удэ, 2015); Всероссийская конференция с международным участием «Экология – 2015» (ИЭПС УрО РАН, Архангельск, 2015); ESIR Isotope Workshop XIII (Загреб, 2015); V Российская молодежная научно-практическая Школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (ИГЕМ РАН, Москва, 2015), XV Всероссийская конференция «Современные исследования в геологии» (СПбГУ, Санкт-Петербург, 2016); VIII Международная научная конференция «Молодые – наукам о Земле» (МГРИ-РГГРУ, Москва, 2016), V Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (ТПУ, Томск, 2016).

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 3 в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ Министерства образования и науки РФ.

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

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, указываются цель и задачи, приводятся данные по фактическому материалу и структуре работы, формулируются защищаемые положения диссертации.

В первой главе представлен краткий очерк о геологическом строении Архангельской алмазоносной провинции (ААП). Рассмотрены основные негативные факторы, обусловленные геологическим строением территории, петрофизическим и петрохимическими особенностями кимберлитов, которые затрудняют использование традиционных методов поисков кимберлитовых трубок на территории ААП. Учитывая влияние геологических факторов на эффективность поисков кимберлитов, перспективным направлением в развитии поисковых методов на территории ААП выступает выделение кимберлитоконтролирующих структур и выявление вещественных и тектонических признаков околотрубочного пространства в разрезах поисковых скважин.

Во второй главе рассмотрены основные свойства и особенности распределения радиоактивных элементов в геологической среде. Особое внимание уделено рассмотрению четных изотопов урана в природных средах и их индикаторному значению при исследовании геологических процессов. Рассмотрены существующие данные об особенностях распределения радиоактивных элементов и неравновесного урана в районах развития кимберлитового магматизма. Сделан вывод о перспективности развития радиометрических методов для поисков кимберлитовых тел на территории ААП. Важным при этом является комплексный подход в использовании различных радиометрических методов и интерпретация полученных данных по структурно-геологическому принципу, которые позволят повысить эффективность радиометрии для поисков коренных месторождений алмазов.

Третья глава посвящена описанию методов полевых и лабораторных исследований. Для выполнения работ был использован комплекс изотопно-радиогеохимических методов, включающих в себя альфа- и гамма-спектрометрию и эманационные исследования. Использование комплекса методов повышает число решаемых задач и достоверность получаемых результатов.

В четвертой главе представлены результаты исследований изотопного состава урана в кимберлитах, вмещающих породах, поверхностных и подземных водах Золотицкого поля ААП. В околотрубочном пространстве кимберлитов установлена неравновесные величины изотопного отношения урана $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$, которые обусловлены особенностями геологического строения околотрубочного пространства. Закономерности распределения избытков изотопа ${}^{234}\text{U}$ хорошо согласуются с данными по тектоническим и вещественным изменениям в породах околотрубочного пространства.

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. Гамма-спектрометрическими исследованиями в околотрубочном пространстве установлены повышенные по отношению к фону концентрации радиоэлементов, которые формируют аномалии гамма-поля в перекрывающих трубки отложениях в результате миграции радиоактивных элементов по разломам контролирующих размещение кимберлитов. В почвенном воздухе на границах кимберлитовых тел установлены аномальные значения ОАР. Аномальная активность радона в перекрывающих отложениях является отражением развития в околотрубочном пространстве трещиноватых газопроницаемых зон, по которым происходит миграция радона к дневной поверхности.

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность своему научному руководителю – заведующему лабораторией экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФГБУН ФИЦКИА РАН, доктору геолого-минералогических наук Георгию Петровичу Киселеву за общее руководство над диссертацией, полезные идеи и помощь в выборе верных направлений в исследованиях, за ценные консультации и критические замечания, неоценимую научную и практическую помощь, а также за постоянное внимание и интерес к различным проблемам, неизбежно возникавшим при написании диссертации. Автор выражает искреннюю благодарность С.В. Дружинину и К.Б. Данилову за помощь в проведении полевых работ, конструктивное обсуждение результатов и ценные советы, а также С.Б. Зыкову за помощь в выполнении радиохимических исследований. Автор также выражает благодарность за общую поддержку всем сотрудникам лаборатории экологической радиологии А.А. Очеретенко, И.М. Киселевой, Е.Н. Зыковой, В.М. Быкову и А.В. Баженову. Автор с чувством глубокой признательности вспоминает помощь, которую на различных этапах написания работы оказали С.Е. Тельтевская, А.А. Максимов, И.В. Долгова, В.Ф. Кудров, И.В. Никонорова, Е.С. Коноплева и А.Г. Шугаев.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие защищаемые положения:

1. Вмещающие породы околотрубочного 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 околотрубочном пространстве кимберлитовых трубок Архангельской алмазонасной провинции.

На примере кимберлитовых трубок Архангельская и Пионерская Золотицкого поля ААП исследован изотопный состав урана в кимберлитах и вмещающих породах.

Трубка Архангельская. Изотопное отношение урана $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ на трубке Архангельская изменяется в пределах от 0,86 до 1,60 (рис. 1).

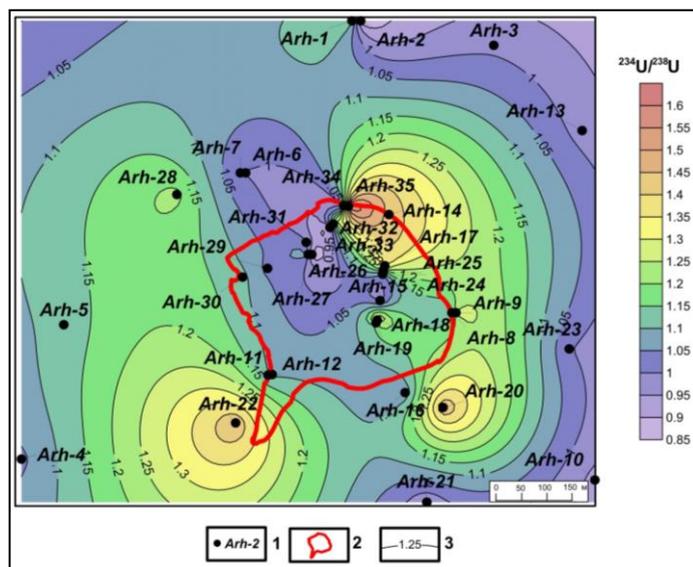


Рис. 1. Изменение изотопного отношения урана $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ в околотрубочном пространстве трубки Архангельская.

1 – точки отбора образцов на исследование изотопного состава урана; 2 – контур трубки Архангельская; 3 – изолинии изменения величины γ .

В горных породах, возраст которых более 1 млн лет, должна наблюдаться близкая к равновесной величина γ по причине преимущественного распада радиогенных атомов урана-234. Однако во многих исследованных образцах резко нарушено, при этом, значения неравновесного урана изменяются по площади закономерно и образуют вокруг контура трубки ореол повышенных значений γ концентрической формы с величинами более 1,1. Ореол неравновесного урана приурочен к околотрубочному пространству и обнаруживается

во вмещающих вендских породах и в отложениях кратерной фации находящихся в контакте с вендскими отложениями. Среднее отклонение от равновесия в них составляет 1,27 ‰, достигая значений до 1,6 ‰. В породах урзугской свиты карбона среднее изотопное отношение урана равно 1. Автолитовая брекчия и туфогенно-осадочные породы нижнего разреза кратерной фации характеризуются равновесным изотопным составом урана. В четвертичных отложениях также отмечается равновесная величина ‰.

Концентрация урана, исследованная альфа-спектрометрическим методом изменяется в пределах от 0,6 до 4,07 ppm (рис. 2). Для автолитовой брекчии характерна низкая концентрация урана. Это также характерно для пород нижней части кратерной фации

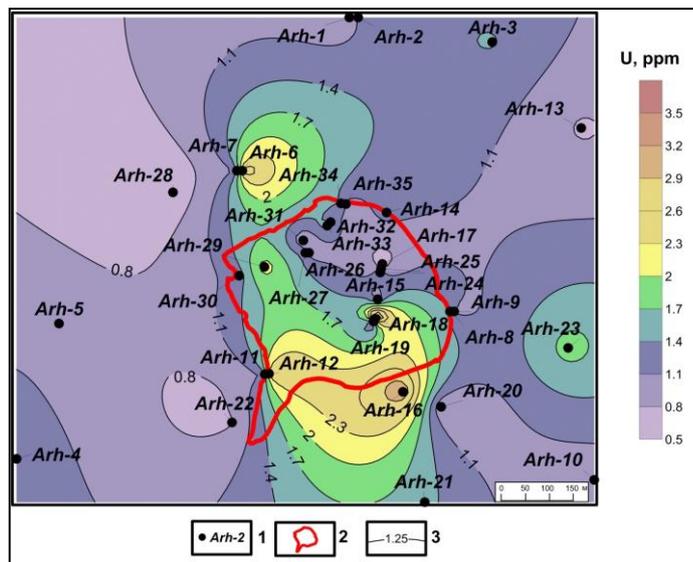


Рис. 2. Изменение концентрации урана в околотрубочном пространстве трубки Архангельская по альфа-спектрометрическим данным.

1 – точки отбора образцов на исследование изотопного состава урана; 2 – контур трубки Архангельская; 3 – изолинии изменения концентрации урана (ppm).

трубки. Породы урзугской свиты карбона, характеризуются средним содержанием урана около 1,2 ppm.

Содержание урана в четвертичных отложениях составляет 1,4 ppm. Пространственная картина распределения урана по альфа-

спектрометрическим данным отличается от картины ореола величины изотопного отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, однако, при этом повышенная концентрация урана также приурочена к вендским отложениям и породам кратерной части на контакте с песчаниками и алевролитами венда. Среднее содержание урана в данных породах около 1,8 ppm. Пространственное положение повышенных концентраций урана тяготеет непосредственно к контуру трубки и локализовано в двух областях на северной и южной границе трубки.

Причиной резкого нарушения изотопного отношения урана в породах околотрубочного пространства являются структурно-геологические особенности кимберлитовой трубки Архангельская. Это подтверждается результатами исследований, в ходе которых в околотрубочном пространстве трубки Архангельская были зафиксированы разрывные нарушения (Игнатов, 2009). Тектонические нарушения сопровождают вмещающие и перекрывающие отложения и достоверно установлены в урзугской свите карбона и падунской свите венда (Васильев, 2010). Кроме этого, в околотрубочном пространстве было установлено эндогенное происхождение прожилкового осветления (Игнатов и др., 2015). Размеры ореола распространения секущего осветления достигают диаметра трубки и пространственно имеют схожую конфигурацию с ореолом неравновесного урана. Прожилки осветления фиксируются по всему периметру околотрубочного пространства (Игнатов и др., 2015), как непосредственно на тектонических контактах кратерной части трубки, так и на удалении до 300 м от трубки, осветление развивается вдоль трещин и имеет мощность до 20 см.

Распределение ореола неравновесного урана в околотрубочном пространстве, вероятнее всего, также связывается развитием тектонических нарушений на контактах трубки и на некотором удалении от нее. Закономерности распределения избытков изотопа ^{234}U хорошо согласуется с данными по тектоническим и вещественным изменениям в породах околотрубочного пространства, которые связаны со структурно-геологическими особенностями трубки. Механизм нарушения изотопного равновесия урана в данном случае, может быть объяснен процессами динамики и циркуляции подземных вод по тектоническим

трещинам, ограничивающим трубку Архангельская. Изменение режима циркуляции подземных вод в околотрубочном пространстве в результате смешения 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}U и ^{238}U , которое устанавливается по избыткам урана-234 в породах околотрубочного пространства трубки Архангельская.

Приведенные выше факты свидетельствуют о широком развитии признаков околотрубочного пространства в карьере трубки Архангельская. Среди тектонических и вещественных признаков, околотрубочное пространство также выделяется увеличением во вмещающих породах изотопного отношения урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$.

Трубка Пионерская. Образцы исследованных пород представлены кернами трех скважин. Первая скважина представлена кимберлитами жерла трубки Пионерская, вторая околотрубочным пространством, а третья безрудной зоной вмещающих пород, удаленной от трубки (рис. 3).

Содержание урана в образцах автолитовой брекчии изменяется в пределах 0,33 – 0,80 ppm. Изотопное отношение урана близко к равновесному. Вендские песчаники, приуроченные к экзоконтактам трубки характеризуются содержанием урана от 0,40 до 5,93 ppm. Изотопный состав урана выделяется резким нарушением равновесия величины $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$.



Рис. 3. Размещение опробованных скважин.

Алевролиты и аргиллиты, представленные керном скважины 1000/1, характеризуются содержанием урана в диапазоне 1,41 – 3,35 ppm. Величина изотопного отношения урана близка к равновесным значениям.

Вмещающие алевролиты и аргиллиты скважины 1000/1, в целом характеризуются концентрациями урана, соответствующими данным типам пород, и в несколько раз превышают содержания урана в кимберлитах (скважина 1490), отличающихся относительной равномерностью значений на разных глубинах. Для песчаников мезенской свиты венда (скважина П-4mz), находящихся в экзоконтакте трубки характерен самый большим разброс значений среди исследованных образцов. Содержание урана в них колеблется от 0,40 до 5,93 ppm. Подобный характер распределения урана, по-видимому, свидетельствует об изменчивости гидрогеологических условий во вмещающих породах в приконтактной области – смене окислительных условий на восстановительные, приводящих к осаждению урана.

Установлена зависимость содержания урана от глубины в кимберлитах трубки Пионерская. Концентрация урана с увеличением глубины в автолитовых брекчиях скважины 1490 закономерно убывает (рис. 4). Зависимость выражается значением коэффициента корреляции $-0,75$, что свидетельствует о еще большей обедненности магматического источника кимберлитов Золотицкого поля тяжелыми элементами. Возрастание концентрации урана при приближении к поверхности, по всей видимости, обусловлено воздействием вмещающих пород с высоким содержанием урана при подъеме кимберлитовой магмы.

Значения изотопного отношения урана в автолитовых брекчиях и вмещающих отложениях, удаленных от трубки, характеризуются близкими к равновесным величинами $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и отражают относительно равномерное распределение по глубине.

Близкие к равновесным значения величины γ свидетельствуют о стабильном состоянии этих пород на протяжении долгого времени и отсутствии влияния процессов, способных

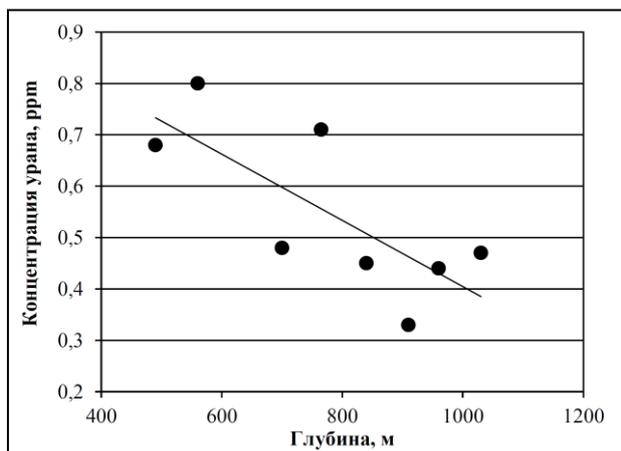


Рис. 4. Содержание урана в кимберлитах трубки Пионерская.

привести к изотопному фракционированию. При приближении к границам трубки в образце керна скважины П-4mz наблюдается резкое нарушение изотопного равновесия урана до 357 %, что для горных пород является аномальным. Для этих образцов также характерен широкий диапазон вариации значений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ от 0,85 до 3,57.

Таким образом, высокий изотопный сдвиг свидетельствует об активных процессах фракционирования урана в породах околотрубочного пространства трубки Пионерская. Судя по особенностям изменения величины $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в кимберлитах и вмещающих породах, можно сделать вывод о единой природе образования избытков изотопа ^{234}U в породах околотрубочного пространства трубок Пионерская и Архангельская, которая заключается в развитии тектонических нарушений, ограничивающих кимберлитовые трубки. Осаждение урана в околотрубочном пространстве приводит и к активной миграции изотопа ^{234}U .

Процессы фракционирования изотопов ^{234}U и ^{238}U в породах околотрубочного пространства приводят к активной миграции ^{234}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 Золотицкого кимберлитового поля ААП.

Пробы природных вод на территории Золотицкого поля отбирались из эксплуатационных и самоизливающихся скважин, а также из рек, ручьев и заболоченных участков. Значения $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ подземных вод в районе исследования изменяется от 1,99 до 7,81 γ , а концентрация урана изменяется в диапазоне 0,16 – 2,71 ppm. Максимальная величина изотопного отношения (7,81 γ) отмечается в скважине, расположенной на северо-восточной окраине трубки Архангельская.

Минимальные величины γ наблюдаются в подземных водах удаленных от кимберлитовых трубок. Изотопное отношение урана в них колеблется от 1,99 до 2,81 γ . Изотопное отношение урана в поверхностных водах исследуемого района изменяется в незначительных пределах от 1,15 до 2,21 γ . Диапазон изменения концентрации урана в них также незначительный (0,21 – 0,53 ppm).

Полученные данные для большей части проб подземных вод Золотицкого кимберлитового поля демонстрируют аномальный избыток изотопа ^{234}U по отношению к ^{238}U , превышающий в среднем 400%. Поскольку основной источник питания подземных вод в данном районе инфильтрационного происхождения, то изотопный состав урана должен быть близок к значениям поверхностного стока с некоторым увеличением в результате перехода подвижных атомов ^{234}U из водовмещающей толщи. Средний изотопный состав урана подземных вод платформенных областей составляет 1,40 – 1,80 γ (Киселев, 2005). Однако наблюдаемое изотопное отношение урана, значительно превышает величины $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ для подземных вод платформенных областей и поверхностных вод исследуемого района. Поскольку возрастание избытка изотопа ^{234}U происходит с приближением к кимберлитовым трубкам, то отсюда следует, что подземные воды претерпевают изменения в результате фильтрации через породы непосредственно в водоносных горизонтах околотрубочного пространства и приобретают аномальную изотопную метку. В ряде случаев высокие изотопные сдвиги урана могут наблюдаться и в поверхностных водах. Так, в пробе воды, отобранной из ручья Тучкин на трубке им. Ломоносова наблюдается аномальное увеличение отношения активностей изотопов урана до 2,21 γ , практически в два раза превышающее среднее значение для поверхностных вод данного района. По всей видимости,

это объясняется выклиниванием подземных вод вблизи трубки Ломоносовской, характеризующихся высокими изотопными сдвигами и смешением их с водами ручья Тучкин.

Более детально изменение величины отношения четных изотопов урана в подземных водах было исследовано в пределах куста трубок – Архангельская, Карпинского-1, Капринского-2 (рис. 5).

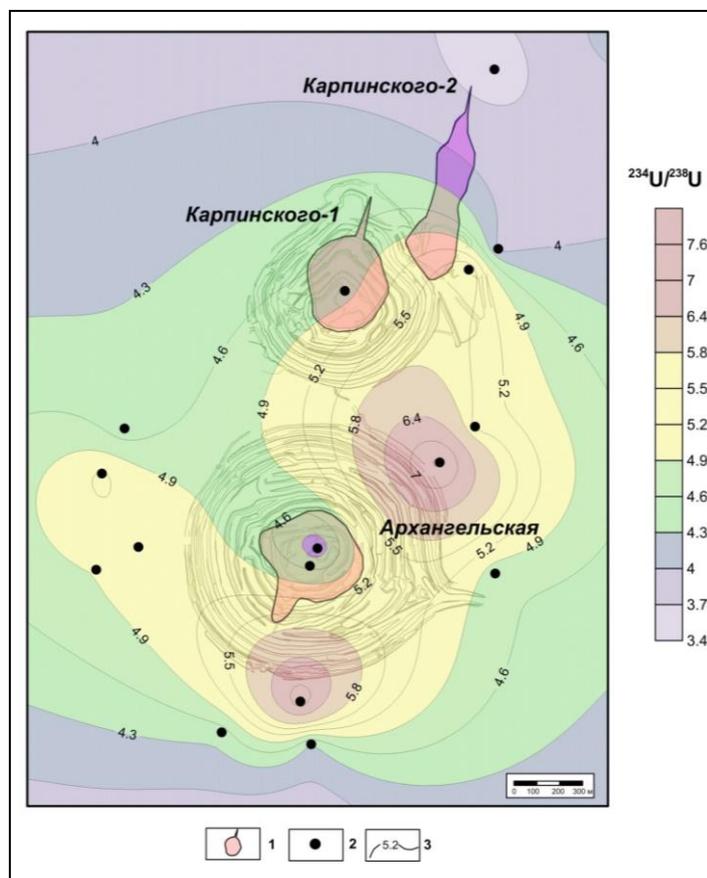


Рис. 5. Изменение величины изотопного отношения урана $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ в подземных водах в районе трубок Архангельская, Карпинского-1, Карпинского-2.

1 – контур кимберлитовых трубок; 2 – точки отбора проб подземных вод; 3 – изолинии изменения величины $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$.

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. Более плотная сеть наблюдений вокруг трубки Архангельская отражает приуроченность аномалий изотопного состава урана к околотрубочному пространству. Закономерности пространственного изменения величины γ в подземных водах и породах околотрубочного пространства указывает на их генетическую связь.

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.

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.

Исследования распределения радиоактивных элементов (U, Th, K) во вмещающих и перекрывающих породах выполнены в пределах кимберлитовых трубок Золотицкого и Чидвинско-Ижмозерского полей ААП.

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, является закрытость территории, выражающаяся в развитии мощной толщи перекрывающих отложений, которая может создавать большое количество ложных

аномалий и значительно снижать поисковую эффективность радиометрических методов. Фактические данные прошлых лет по распределению радиоактивных элементов на территории Зимнебережного района ААП, главным образом, получены аэрогамма-спектрометрией. Однако перекрывающие отложения территории ААП характеризуются низкими концентрациями ЕРЭ и слабо проявленные аномалии можно зафиксировать только в прямом контакте с горной породой при наземных измерениях. Аэрогамма-спектрометрическая съемка при этом оказывается менее эффективной, так как при ее проведении излучение на детектор приходит из площади с большим радиусом при высокой скорости пролета летательного аппарата.

Таким образом, 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 реализован в рамках данного исследования.

Интерпретация полученных радиоизотопных данных при наземных радиометрических съемках должна проводиться с учетом геологических предпосылок формирования тех или иных аномалий ЕРЭ. Предпосылки для формирования повышенных и аномальных по отношению к фону содержаний радиоэлементов во вмещающих и перекрывающих отложениях ААП существуют. 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 того чтобы установить геологическую природу фиксируемых на дневной поверхности вариаций гамма-поля, необходимо изучение распределения радиоактивных элементов в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, а также площадные радиометрические исследования для установления приуроченности выделяемых аномалий к рудоконтролирующим структурам.

Для установления концентрации и распределения радиоактивных элементов в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел выполнены высокоточные гамма-спектрометрические исследования в карьере кимберлитовой трубки Архангельская. Результаты исследований отражены на рис. 6.

По показателю общей радиоактивности (сps) вокруг контура трубки формируется контрастная аномалия, распространяющаяся на породы кратерной фации и вмещающие отложения, превышающая по интенсивности гамма-излучения фоновые показатели в среднем в 1,5 – 2 раза (рис. 6, А).

Кимберлиты жерловой части, а также нижнего разреза кратерной фации трубки характеризуется минимальными значениями общей радиоактивности. Для распределения содержания тория, урана и калия характерна аналогичная картина, выражающаяся в формировании аномалий повышенных значений вокруг контура трубки. Концентрация тория в околотрубочном пространстве колеблется в пределах от 8 до 32 ppm. Фоновые значения составляют около 4 – 6 ppm (рис. 6, Б). Концентрация урана в пределах данной области изменяется в среднем от 4 до более 10 ppm при фоновых значениях 2,5 – 3,0 ppm (рис. 6, В). Содержание калия в пределах исследуемой области изменяется от 1,4 до более 3,4% при фоновых значениях 1,0 – 1,2 % (рис. 6, Г). Однако ореол повешенного и аномального содержания калия имеет несколько более широкую конфигурацию, чем ореолы урана и тория. Приуроченность повышенных содержаний калия к околотрубочному пространству не очевидна. Участки с повышенными значениями содержания калия отмечаются как в вендских, так и четвертичных образованиях. Однако участок с аномальным содержанием калия (до 3,4 %) приурочен к околотрубочному пространству и локализован в вендских отложениях в северной части трубки.

Таким образом, в результате высокоточных гамма-спектрометрических исследований на трубке Архангельская 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.

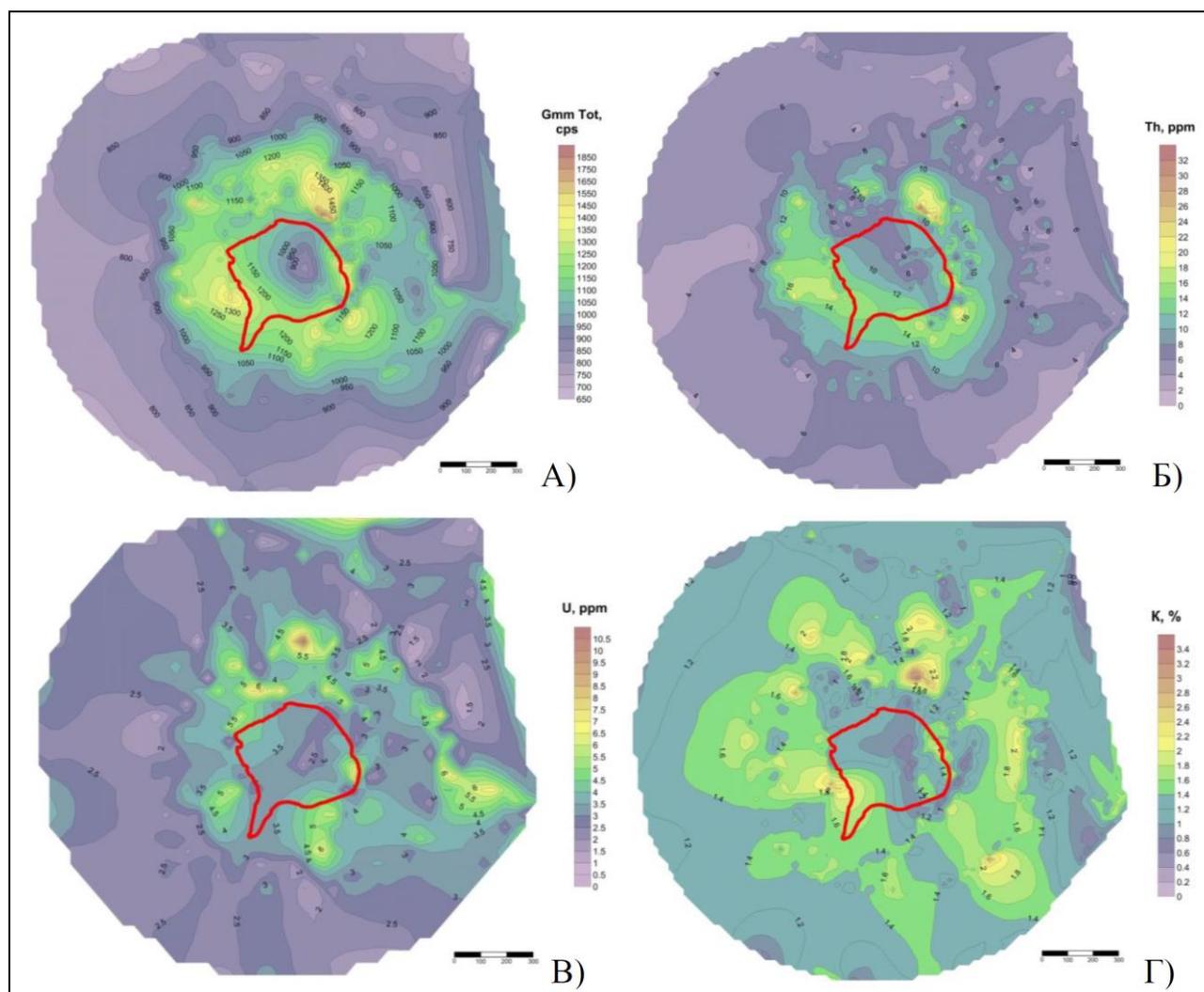


Рис. 6. Распределение радиоактивных элементов в породах трубки Архангельская. А – суммарная интенсивность гамма-излучения (cps); Б – концентрация тория (ppm); В – концентрация урана (ppm); Г – распределение калия (%).

Концентрирование ЕРЭ в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, вероятнее всего, происходило двумя путями. На первом этапе накопление радиоактивных элементов могло происходить в результате формирования восстановительных условий в околотрубочном пространстве под действием щелочных флюидов в процессе внедрения кимберлитовой магмы. Кимберлитовое тело при этом выступало в качестве геохимического барьера. Подтверждением этого выступают результаты исследования радиационных дефектов в кварце кратерных песчаников, вмещающих пород венда и перекрывающих карбона на трубке Архангельская (Васильев, 2010; Зарипов, 2014). Повышенные значения концентраций радиационных дефектов в кварце песчаников венда связываются с инфильтрационным палеонакоплением урана в восстановительных условиях формирующихся вокруг трубки (Зарипов, 2014). Возраст урановой минерализации по радиационным дефектам 370 млн лет, соответствующий возрасту становления Золотицких кимберлитовых трубок. Второй причиной выступает структурно-геологическая позиция кимберлитовой трубки Архангельская, определяющая современный этап концентрирования радиоэлементов в околотрубочном пространстве. Современный этап накопления урана устанавливается по резкому неравновесию изотопного отношения урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, установленным в ходе настоящих исследований. Отклонение от равновесия изотопной пары

^{234}U и ^{238}U свидетельствует миграции дочернего изотопа за последние 1 млн лет, поскольку избытки ^{234}U сохраняются не более 10 периодов полураспада урана-234. В карьере трубки Архангельская установлены локальные тектонические элементы, сопровождающие экзоконтакты кимберлитов (Игнатов и др., 2009, Васильев, 2010, Игнатов и др., 2012). Трубку ограничивают зоны милонитов и крутопадающей трещиноватости, включающей малоамплитудные взбросы и просядочные сбросы, сопровождаемые осветлением красноцветных пород по трещинам (Васильев, 2010). Развитие зон трещиноватости, ограничивающих трубку Архангельская, по всей видимости, 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}U . Подобные процессы накопления радиоактивных элементов должны наблюдаться и в пределах кимберлитоконтролирующих разломов, поскольку нарушение сплошности залегания отложений также может создавать условия проникновения инфильтрационных вод и смешения их с минерализованными подземными водами, которое приводит к образованию геохимического барьера. Установление радиогеохимических особенностей кимберлитоконтролирующих разломов требует отдельного внимания, поскольку к настоящему времени таких данных нет, как и нет данных об общей геохимической специализации разломов (Кутинов, Чистова, 2004). Однако представляется вероятным, что кимберлитоконтролирующие разломы будут отражаться в результатах наземных гамма-спектрометрических съемок, учитывая гидрогеологические условия территории. Узлы и зоны тектонических нарушений сопровождаются подъемом вод венда, снижение минерализации которых должно происходить в зоне контакта с пресными водами карбона и палеозоя (Кутинов, Чистова, 2004). Зоны и узлы разломов ААП выделяются геохимическими аномалиями, что подтверждается данными геохимических съемок (Главатских, 1992).

Образование в перекрывающих отложениях радиоактивных аномалий может быть приурочено к кимберлитовым трубкам и контролирующим их размещением разломам. 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.

Золотицкое кимберлитовое поле. Суммарная интенсивность гамма-излучения в пределах Золотицкого поля изменяется от менее 200 до 2800 срс (рис. 7, а). Интенсивность гамма-излучения в южной, центральной и северной части поля различается. Наиболее низкая интенсивность гамма-излучения наблюдается в южной части кимберлитового поля. Северная часть характеризуется наиболее высокими значениями гамма-поля. Кимберлитовые трубки в целом приурочены к протяженным структурным зонам, выделяемым в общем гамма-поле.

Фоновое содержание калия в пределах исследуемой области изменяется от 1 до 1,5 %. В пределах трубок этот показатель возрастает до 4 %.

Территория Золотицкого поля в целом обеднена ураном и характеризуется сложным характером распределения данного элемента по площади. Концентрация урана колеблется от 1 до 4 ppm, достигая на отдельных участках значений 7-8 ppm.

Фоновые значения концентрации тория на территории Золотицкого поля находятся в пределах 2-3 ppm. В пределах кимберлитовых трубок концентрация тория, как правило, значительно повышается от 12 до 30 ppm. Характер распределения тория в целом пространственно повторяет картину распределения калия.

В связи с развитием на территории Золотицкого поля перекрывающих четвертичных и каменноугольных отложений мощностью более 10 метров по показателю суммарной интенсивности гамма-излучения создается большое количество аномалий. В связи с этим,

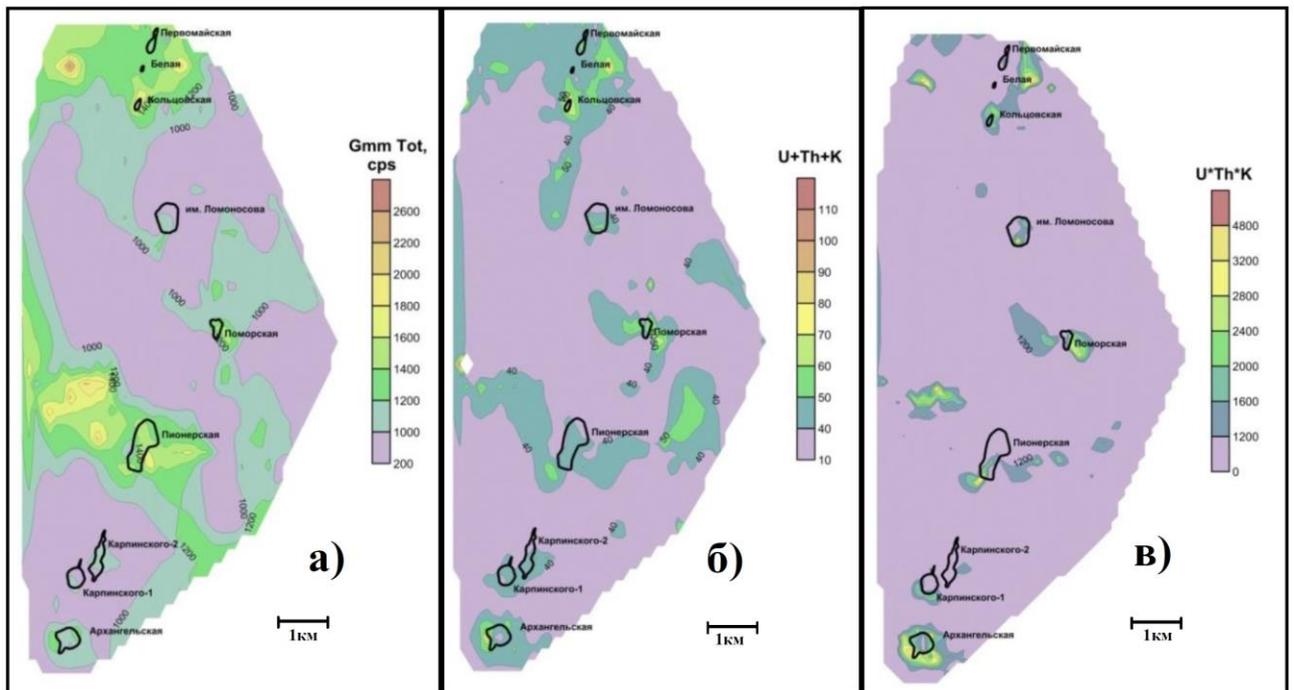


Рис. 7. Распределение суммарной гамма-активности, аддитивного или мультипликативного показателей по содержанию тория, калия и урана и по площади Золотицкого кимберлитового поля (Киселев и др., 2013).

а – суммарная интенсивность гамма-излучения; б – аддитивный показатель содержания радиоактивных элементов; в – мультипликативный показатель содержания радиоэлементов.

важным при проведении гамма-спектрометрических исследований обратить внимание на характер распределения калия и тория, поскольку их площадное распределение в целом идентично, а также применить аддитивный или мультипликативный показатели для усиления аномального эффекта и снижения количества помех.

Распределение аддитивного или мультипликативного показателей по торию, калию и урану представлено на рис. 7 (б, в). Применение данных показателей позволило значительно уменьшить число радиометрических помех, не связанных с кимберлитами. В пределах исследуемой площади все трубки сопровождаются аномальными значениями этих параметров.

Радиометрические аномалии соединяются в структурные зоны и приобретают более выраженный линейный субмеридиональный характер, совпадающий с направлением главных кимберлитоконтролирующих разломов Золотицкого поля, при этом кимберлитовые трубки в структурных зонах выделяются наиболее контрастными значениями. Этот факт указывает на то, что, несмотря на закрытость территории, обусловленную развитием толщи перекрывающих отложений, существует восходящая вертикальная миграция радиоактивных изотопов по разломам, контролирующим размещение кимберлитов.

Чидвинско-Ижмозерское поле. В пределах данного поля была изучена трубка Чидвинская ввиду того, что это единственная на территории ААП трубка, выходящая на дневную поверхность. Средняя мощность перекрывающих четвертичных отложений (~9 м). В пределах северного столба трубки мощность четвертичных отложений не превышает 1,5 м.

Общая радиоактивность пород изменяется в широких пределах от 172 до 1585 cps (рис. 8).

Распределение повышенных значений гамма-поля имеет несколько более широкую конфигурацию, чем контур трубки. Наиболее контрастный и больший по площади участок повышенных значений гамма-поля приурочен к северной части трубки и локализован в пределах северного столба, где мощность перекрывающих четвертичных отложений минимальна. Здесь значения суммарной радиоактивности достигают более 1500 cps.

Пространственное распределение повышенных значений общего гамма-излучения верхних горизонтов в районе трубки Чидвинской образует линейную аномалию северо-восточного простирания, выходящую на пределы контура трубки и совпадающую с направлением кимберлитоконтролирующего разлома. За пределами этой области средние значения радиоактивного фона составляют порядка 800-900 cps. Содержание калия в районе трубки Чидвинской колеблется в диапазоне от менее 0,3 до 3,8 %. Пространственная картина распределения калия в целом идентична показателю суммарной интенсивности гамма-излучения и образует области повышенных значений в пределах контура, особенно в районе северной части трубки с малой мощностью перекрывающих четвертичных отложений. Концентрация тория в районе трубки Чидвинская варьирует в пределах 0,5 – 14,0 ppm. Максимальные значения тория локализованы на небольших по площади участках и

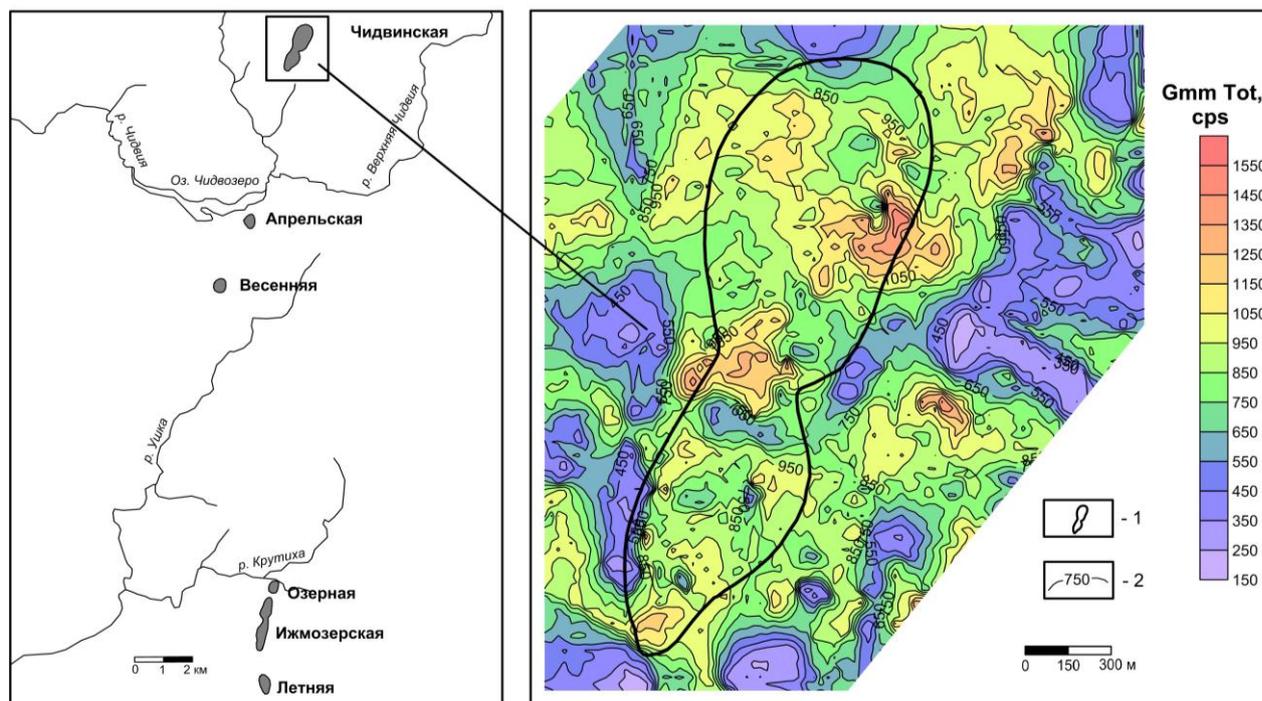


Рис. 8. Распределение суммарной интенсивности гамма-излучения в районе трубки Чидвинская.

1 – контур трубки Чидвинская; 2 – точки измерения ОАР в почвенном воздухе; 3 – точки измерения микросейсм; 4 – изолинии радиометрических показателей.

расположены, в основном, в пределах контура трубки. Концентрация урана изменяется от менее 0,4 до 4,6 ppm. Характер распределения урана не однозначен. Явной пространственной приуроченности к контуру трубки не наблюдается.

В целом, трубка Чидвинская выделяется повышенными значениями гамма-поля, а также содержанием калия на фоне вмещающих отложений. Распределение концентраций тория и урана фрагментарно и не имеет площадного распространения, что, по-видимому, объясняется сложным характером распределения радиоактивных элементов в силу эродированности верхней части кратерной фации трубки.

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.

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.

Золотицкое поле. Профили измерения ^{222}Rn в почвенном воздухе ряда кимберлитовых трубок Золотицкого поля показаны на *рис. 9*. Результаты эманационной съемки в обобщенном виде представлены в виде *табл. 1*.



Рис. 9. Расположение профилей измерения объемной активности радона над кимберлитовыми трубками Золотицкого поля.

1 – трубки взрыва; 2 – профили измерения ОАР.

Количество точек наблюдения определялось необходимостью изучения вариаций ОАР в пределах кимберлитового тела, на контактах с вмещающей средой, а также выходом на фон за пределы границ трубки. Точки измерения ОАР располагались относительно равномерно друг от друга по всем элементам профиля трубок. Изучение активности радона в почвенном воздухе показало, что значения ОАР по элементам профилей подчиняются определенной закономерности, связанной со структурной позицией кимберлитовых тел.

Значения ОАР в почвенном воздухе по профилям, пересекающим кимберлитовые трубки, изменяется в широких пределах от 91 до 11519 Бк/м³. В пределах тела трубок средние значения объемной активности ^{222}Rn изменяются в диапазоне 134 – 1555 Бк/м³. Фоновые значения колеблются в пределах от 91 до 664 Бк/м³.

Табл. 1. ОАР в почвенном воздухе в районе кимберлитовых трубок Золотицкого поля (Киселев и др., 2014).

Трубка	Активность радона по элементам профиля, пересекающего тело трубки			
	Фоновая активность за пределами трубки**	Граница 1*	Тело трубки**	Граница 2*
Карпинского-1	469±84	11519±1727	310±60	1174 ± 187
Карпинского-2	397±58	2508±401	205±42	1259±201
Ломоносова	91±23	4360±654	545±98	211±46
Поморская	107±27	2196±351	134±36	127±31
Пионерская	664±115	2804±448	1555±259	2571±411
Первомайская	497±88	2534±405	416±77	1105±187

Примечание: *Максимальное значение, наблюдаемое на границах трубок

**Значение рассчитано как среднее для элемента профиля.

Аномальное увеличение концентрации радона наблюдается на границах трубок. На данном элементе профиля значения ОАР изменяются от 2508 до 11519 Бк/м³, 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 развитием трещиноватых зон в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, которые приводят к активной миграции ^{222}Rn к поверхности.

Чидвинско-Ижмозерское поле. Изучение распределения радона в пределах поля были выполнено на примере трубки Чидвинской. Измерения ОАР в почвенном воздухе на трубке проводилось по профилю, пересекающему северный столб трубки в направлении северо-запад – юго-восток. Расположение точек наблюдения показано на *рис. 10*.

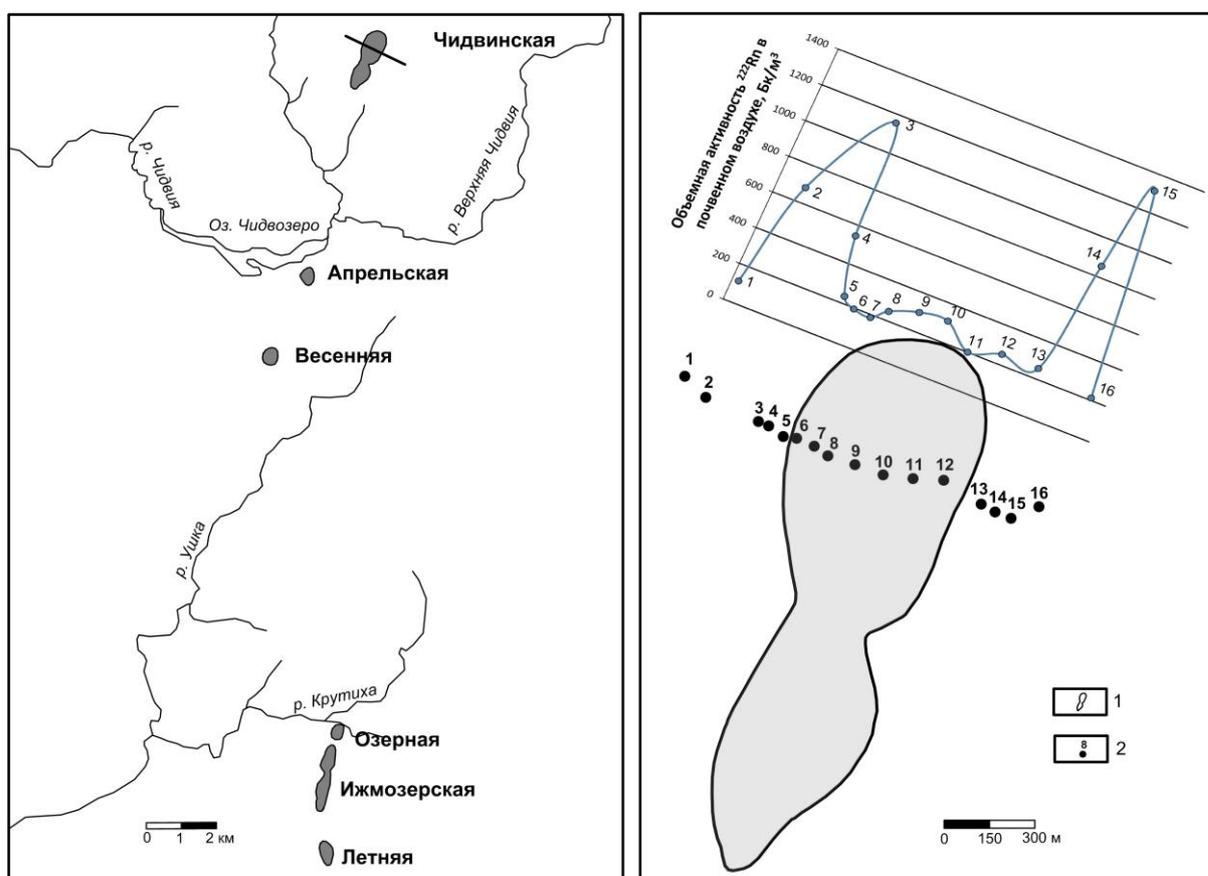


Рис. 10. Изменение активности ^{222}Rn в почвенном воздухе на трубке Чидвинская. 1 – контур трубки; 2 – точки измерения радона.

Значения ОАР в почвенном воздухе по профилю, пересекающему северный столб трубки Чидвинская изменяются в пределах 114 – 1312 Бк/м³. В пределах контура трубки вариации ОАР незначительны от 185 до 312 Бк/м³.

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/м³, на юго-восточной границе этот показатель равен 1312 Бк/м³. За пределами границ трубки активность ^{222}Rn резко падает, уменьшаясь до минимальных значений.

Выявленные закономерности изменения ОАР по пройденному профилю, по всей видимости, объясняются тем, что на контактах 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 трубки Чидвинской зон с повышенной трещиноватостью, которые являются подводящими каналами для радона, подтверждается исследованием глубинного строения трубки, выполненным методом микросейсмического зондирования (ММЗ, автор метода А.В. Горбатиков). Результаты сопоставления радиометрических и сейсмометрических исследований представлены на *рис. 11*. В ходе исследований трубки методом ММЗ был установлен характер околотрубочного пространства и строение трубки Чидвинской.

Аномальные концентрации радона, наблюдаемые на границах трубки Чидвинской, соответствуют контрастным линейным низкоскоростным зонам, которые являются трещиноватыми разломами вмещающих пород венда, ограничивающих трубку. По выделенным разломным структурам происходит миграция радона и возможно других глубинных газов. Рудное тело в данных ММЗ выделяется высокоскоростными свойствами.

Возрастание общей гамма-активности соответствует данным ММЗ и находится в пределах аномалии с высокоскоростными свойствами. Интенсивность суммарного гамма-излучения над высокоскоростной аномалией превышает в 2-4 раза фоновые значения характерные для вмещающих пород.

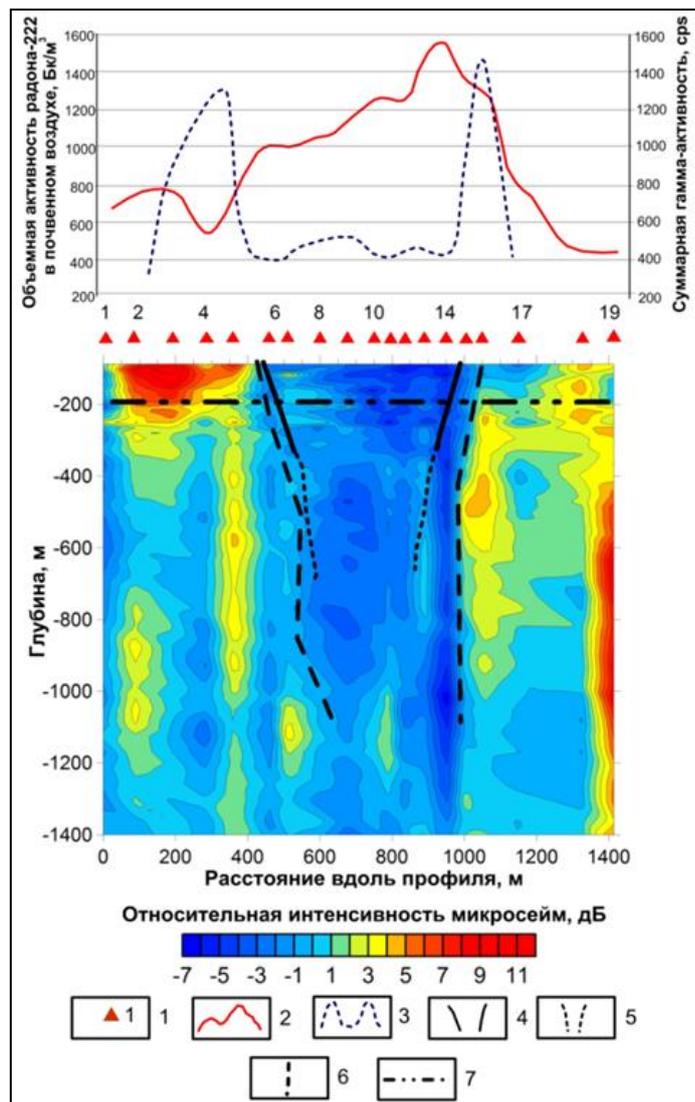


Рис. 11. Глубинный разрез распределений относительной интенсивности микросейсм и радиометрические показатели вдоль профиля, пересекающего трубку Чидвинская.

1 – точки измерений микросейсм; 2 – кривая изменения суммарной интенсивности гамма-излучения, имп/сек; 3 – кривая изменения ОАР в почвенном воздухе, Бк/м³; 4 – границы трубки Чидвинской по геолого-разведочным данным; 5 – предполагаемое строение жерловой фации; 6 – борта трубчатого тела по данным ММЗ; 7 – граница падунской и мезенской свит верхнего венда.

Высокоскоростной характер трубчатого тела указывает на его консолидированное строение, обуславливающее меньшую конвективную составляющую в миграции радона и как следствие наблюдаемые низкие значения ОАР в пределах данного элемента радонового профиля.

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. В породах околотрубчатого пространства установлены избытки изотопа ^{234}U . Формирование высоких значений величины $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ обусловлено геологическим строением околотрубчатого пространства. Закономерности распределения избытков изотопа ^{234}U хорошо согласуется с данными по тектоническим и вещественным изменениям в породах околотрубчатого пространства. Механизм нарушения изотопного равновесия урана объясняется процессами динамики и циркуляции подземных вод по

- тектоническим трещинам, ограничивающим трубки. Развитие трещиноватых зон в околотрубочном пространстве приводит к осаждению урана и миграции изотопа ^{234}U . ореол неравновесного урана достигает двух диаметров трубки и может рассматриваться в качестве локального поискового признака на обнаружение кимберлитов.
2. Изотопный состав урана поверхностных вод в районе Золотицкого поля, а также подземных вод не связанных с кимберлитовыми телами характеризуется минимальным избытком ^{234}U изменяющимся в диапазоне от 1,15 до 2,81 Бк/Бк. Подземные воды, циркулирующие в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, сопровождаются аномальными активностями дочернего изотопа ^{234}U по отношению к ^{238}U . Средние значения избытка ^{234}U превышают 400 % по активности. Закономерности пространственного изменения величины $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах и породах указывают на их генетическую связь, обусловленную геологическим строением околотрубочного пространства. Неравновесный уран с аномальным избытком изотопа ^{234}U может рассматриваться в качестве идентификационного критерия вод кимберлитовых трубок и выступать поисковым признаком при выявлении новых кимберлитовых тел на территории Зимнебережного алмазоносного района.
 3. Породы околотрубочного пространства характеризуется повышенными и аномальными содержаниями U, Th и K относительно фона. Первоначально накопление радиоактивных элементов в породах околотрубочного пространства происходило в восстановительных условиях формирующихся вокруг трубки в момент становления Золотицких кимберлитовых трубок 370 млн лет назад. Это подтверждается по возрастанию концентрации радиационных дефектов в кварцах вмещающих пород. Современный этап накопления радиоэлементов устанавливается по резкому неравновесию изотопного отношения урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и связан с геологическим строением вмещающей кимберлиты толщи. Развитие тектонических трещин в околотрубочном пространстве приводит к изменению гидрохимического режима подземных вод и осаждению радиоэлементов.
 4. Повышенные по отношению к фону концентрации радиоэлементов в околотрубочном пространстве формируют аномалии гамма-поля в перекрывающих трубки отложениях, что доказывается результатами гамма-спектрометрической съемки. Пространственная картина распределения радиоактивных элементов имеет выраженный линейный субмеридиональный характер, совпадающий с направлением главных кимберлитоконтролирующих разломов. Этот факт указывает на то, что, несмотря на развитие в районе Зимнего берега мощной толщи аллохтонных четвертичных отложений, существует восходящая вертикальная миграция радиоактивных изотопов по разломам, контролирующим размещение кимберлитов.
 5. В почвенном воздухе на границах кимберлитовых трубок фиксируются аномальные значения объемной активности радона-222. Наблюдаемая аномальная объемная активность радона в перекрывающих отложениях является отражением развития в околотрубочном пространстве трещиноватых газопроницаемых зон, по которым происходит миграция радона к дневной поверхности.
 6. Выявленные закономерности фракционирования ЕРЭ обусловленные особенностями геологического строения района исследований создают хорошие предпосылки использования комплекса изотопно-радиогеохимических методов, включающего в себя наземную гамма-спектрометрическую и эманационную съемку, неравновесный уран-изотопный метод для поисков коренных источников алмазов на территории Архангельской алмазоносной провинции.

Список публикаций автора по теме диссертации

В изданиях рекомендованных ВАК:

1. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П., Дружинин С.В. Неравновесный уран в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская месторождения им. М.В. Ломоносова // Вестник САФУ. Серия Естественные науки. №1. 2016. С. 19 – 28.
2. Киселев Г.П., Данилов К.Б., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Радиометрические и сейсмометрические исследования кимберлитовой трубки Чидвинская (Архангельская алмазоносная провинция) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. Вып. 30. № 2. 2016. С. 43-53.
3. Киселев Г.П., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Неравновесный уран в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции // Успехи современного естествознания. № 9. 2016. С. 117-125.

В прочих изданиях:

4. Киселев Г.П. **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Инновационные методы поисков коренных месторождений алмазов в Зимнебережном районе // Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны: Сб. научных трудов / Отв. ред. д.э.н., проф. В.И. Павленко. – Архангельск, 2016. – 209-214.
5. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П., Дружинин С.В. Неравновесный уран в твердых фазах в кимберлитах и вмещающих их породах Архангельской алмазоносной провинции // Материалы V Международной научной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Томск. ТПУ, 2016. С. 751-754.
6. Киселев Г.П., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Механизмы формирования неравновесного урана в различных геологических средах // Материалы V Международной научной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Томск. ТПУ, 2016. С. 295-299.
7. Киселев Г.П., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Об эффекте фракционирования изотопов урана в твердых фазах геологической среды // Збірник центру наукових публікацій «Велес» за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції: «Наука в епоху дисбалансів». – К.: Центр наукових публікацій, 2016. С. 16-18.
8. Киселев Г.П., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Изотопы урана в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская (Архангельская алмазоносная провинция) // Материалы XV Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Современные исследования в геологии». – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. С. 195-196.
9. Киселев Г.П., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Изотопное фракционирование урана в твердых фазах на примере процесса образования кристаллов льда // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2016): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. С. 208-209.
10. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П., Дружинин С.В. Особенности распределения радиоактивных элементов в породах кимберлитовой трубки Архангельская (месторождение им. М.В. Ломоносова) // Материалы 5-й Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». Москва. ИГЕМ РАН. 2015. С. 289-291.
11. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П. Перспективы изучения изотопов урана на месторождениях алмазов // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, ФГУП «ВСЕГЕИ». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. С. 306-309.
12. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П. Изотопы урана в алмазоносных и вмещающих породах трубки Карпинского-1 месторождения им. М.В. Ломоносова // Материалы XII

Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: МГРИ-РГГРУ, 2015. С. 196-197.

13. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П. Неравновесный уран в породах трубок Архангельская и Пионерская месторождения алмазов им. Ломоносова // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы III всероссийской молодежной научной конференции. – Улан-Удэ: 2015. С. 99-101.
14. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П. Изотопный состав урана пород алмазоносной трубки Архангельская // Материалы докл. Всероссийской конференции с международным участием «Экология – 2015» – Архангельск, 2015. С. 73-74.
15. **Yakovlev E.Y.**, Kiselev G.P. Uranium isotope disequilibrium as an indicator for interaction ore matter with enclosing sediment rocks of Arkhangelski kimberlite tube from Lomonosov field // Book of Abstracts: ESIR Isotope Workshop XIII. Ruđer Bošković Institute, Zagreb. 2015. P.42.