

УДК 553.81

**НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН В ОКОЛОТРУБОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ ЗОЛОТИЦКОГО ПОЛЯ  
АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ****Киселев Г.П., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В.***Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН,  
Архангельск, e-mail: yakovlev\_eu@inbox.ru*

Выполнено исследование изотопного состава урана во вмещающих породах околотрубочного пространства и кимберлитах, а также природных водах в районе Золотицкого кимберлитового поля Архангельской алмазоносной провинции. В околотрубочном пространстве кимберлитовых тел установлен ореол неравновесного урана, размеры которого могут достигать двух диаметров трубок. Установлено, что подземные воды, циркулирующие в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, сопровождаются аномальными активностями дочернего изотопа  $^{234}\text{U}$  по отношению к  $^{238}\text{U}$ . 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 кимберлитовых тел. Закономерности распределения избытков изотопа  $^{234}\text{U}$  хорошо согласуются с данными по тектоническим и вещественным изменениям в породах околотрубочного пространства.

**Ключевые слова:** эффект Чердынцева – Чалова, кимберлиты, альфа-активность,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , Архангельская алмазоносная провинция

**NON-EQUILIBRIUM URANIUM IN THE NEAR-CONTACT ZONE  
OF THE ZOLOTITSKOE KIMBERLITE FIELD OF ARKHANGELSK  
DIAMONDIFEROUS PROVINCE****Kiselev G.P., Yakovlev E.Yu., Druzhinin S.V.***Federal Research Centre for Integrated Study of the Arctic of the RAS, Arkhangelsk,  
e-mail: yakovlev\_eu@inbox.ru*

Studies of the uranium isotopic composition in host rocks and kimberlites of near-contact zone were carried out in the Zolotitskoe kimberlite field of the Arkhangelsk diamondiferous province. The aureole of the non-equilibrium uranium was found in the near-contact zone of kimberlite pipes, its size can reach two pipes diameter. It has been established that groundwater circulating in the near-contact zone of kimberlite pipes is accompanied by abnormal activity of  $^{234}\text{U}$  daughter isotope. Patterns of the spatial variation of the value  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  in groundwater and rocks indicate their genetic relationship which is determined the geological structure of the near-contact zone of kimberlite pipes. Regularities in the distribution of excess  $^{234}\text{U}$  are consistent with the tectonic and real changes data of the rocks near-contact zone.

**Keywords:** Cherdyntsev – Chalov effect, kimberlites, alpha-activity,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , Arkhangelsk diamondiferous province

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. Эффективность магниторазведки при поисках кимберлитовых тел по всей Архангельской алмазоносной провинции (ААП) в настоящее время значительно снизилась [17, 23]. Множество других геофизических и геохимических методов, опробованных для решения задачи поисков коренных месторождений алмазов, не продемонстрировали устойчивую эффективность [2]. В связи с этим особую важность приобретает необходимость разработки новых подходов в решении задач поисков месторождений алмазов и вне-

дрения их в практику поисковых работ. Одним из перспективных подходов выступает разрабатываемый в последние годы рядом исследователей комплекс методов, основанных на заверке слабоконтрастных аномалий по структурно-тектоническому принципу [1, 5, 6, 17]. Главным вопросом при поисках и разведке коренных месторождений алмазов является исследование рудоконтролирующих и рудовмещающих структур. Однако выделение подобных структур традиционными геофизическими методами зачастую не приносит положительного результата в связи с закрытостью территории и слабой проявленностью рудоконтролирующих разломов в физических полях [11]. Важнейшее значение при этом приобретает выделение признаков разломной тектоники и околорудных изменений горных пород непосредственно в разрезах поисковых скважин [11].

Однако выделение признаков разломной тектоники осложняется наличием пластичной кимберлитовмещающей толщи, малоамплитудных тектонических нарушений и «сухих» зон разломов без признаков гидротермальной деятельности [5]. В последние годы решению данной проблемы посвящены ряд исследований, проводимых как на территории Якутской, так и Архангельской алмазонасных провинций [4, 7, 10–14, 26]. Данными исследованиями во вмещающих породах вокруг кимберлитовых тел обнаружены ореолы макро- и микротектоники и новообразования в породах венда-кембрия. Специальная документация керна позволила выделять кимберлитоконтролирующие разломные структуры [14]. В околотрубочном пространстве кимберлитовых тел установлены локальные тектонические элементы, сопровождающие экзоконтакты кимберлитов [5], вещественные изменения пород в виде эндогенного прожилкового осветления [15], а также увеличение концентраций радиационных дефектов в кварцах вмещающих песчаников при приближении к экзоконтактам трубок [9].

Таким образом, перспективным направлением развития методов поисков кимберлитовых тел выступает выделение кимберлитоконтролирующих структур и выявление признаков околотрубочного пространства.

Выполненные нами исследования на примере трубки Пионерская позволили установить в околотрубочном пространстве резкое нарушение равновесия изотопов  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  [27]. Величина изотопного отношения  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  достигала 3,57, что является аномальным для горных пород, во вмещающих породах, удаленных от трубки, изотопный состав урана равновесный. В ходе этих исследований было установлено, что околотрубочное пространство кимберлитов выделяется по нарушению равновесия отношения активностей четных изотопов урана (эффект Чердынцева – Чалова) [24–25], которое является индикатором проявления геологических процессов, приводящих к фракционированию  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  [15–16]. В свою очередь это создает хорошие предпосылки для использования величины  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в качестве признака околотрубочного пространства кимберлитовых тел.

Целью работы является изучение особенностей фракционирования четных изотопов урана в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел Золотицкого поля АПП для установления возможности выявления признаков кимберлитовых тел по

неравновесному урану. В соответствии с целью исследования была поставлена задача изучения изотопного состава урана в кимберлитах, вмещающих отложениях, подземных и поверхностных водах на территории Золотицкого поля. Данное поле было выбрано ввиду наибольшей изученности среди кимберлитовых полей на территории АПП, в связи с нахождением в его пределах месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Кроме этого, наличие разрабатываемых карьеров на трубках Архангельская и Карпинского-1 дает возможность непосредственно исследовать особенности формирования изотопного состава урана в породах околотрубочного пространства. Для решения поставленной задачи были отобраны 45 проб кимберлитов, вмещающих и перекрывающих пород в карьерах трубок Архангельская и Карпинского-1, а также 32 пробы поверхностных и подземных вод по площади Золотицкого поля.

#### Краткая характеристика района исследования

Золотицкое кимберлитовое поле расположено в 90 км к северо-востоку от г. Архангельска и насчитывает в своем составе десять трубок, образующих цепочку длиной около 20 км с направлением на север-северо-восток (рис. 1). Шесть кимберлитовых трубок – Архангельская, Карпинского-1, Карпинского-2, Пионерская, Поморская, Ломоносова – входят в состав месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова [1, 3, 18].

Вмещающая толща верхнего венда мощностью около 920 м представлена отложениями усть-пинезской, мезенской и падунской свит. Комплекс перекрывающих пород представлен отложениями среднекаменноугольного возраста, общая мощность которых возрастает с юга на север от 28 до 55 м, и четвертичного возраста. Четвертичные рыхлые образования сплошным чехлом перекрывают древние породы. В генетическом отношении – это флювиогляциальные, ледниковые, озерные, озерно-болотные и аллювиальные отложения. Средняя мощность отложений составляет около 35 м.

В вертикальном разрезе кимберлитовые тела имеют форму типичной воронки взрыва с раструбом в верхней части. Трубки Поморская и им. Карпинского-2 и Пионерская относятся к двухкорневым и представляют собой две сближенные трубки с общим раструбом.

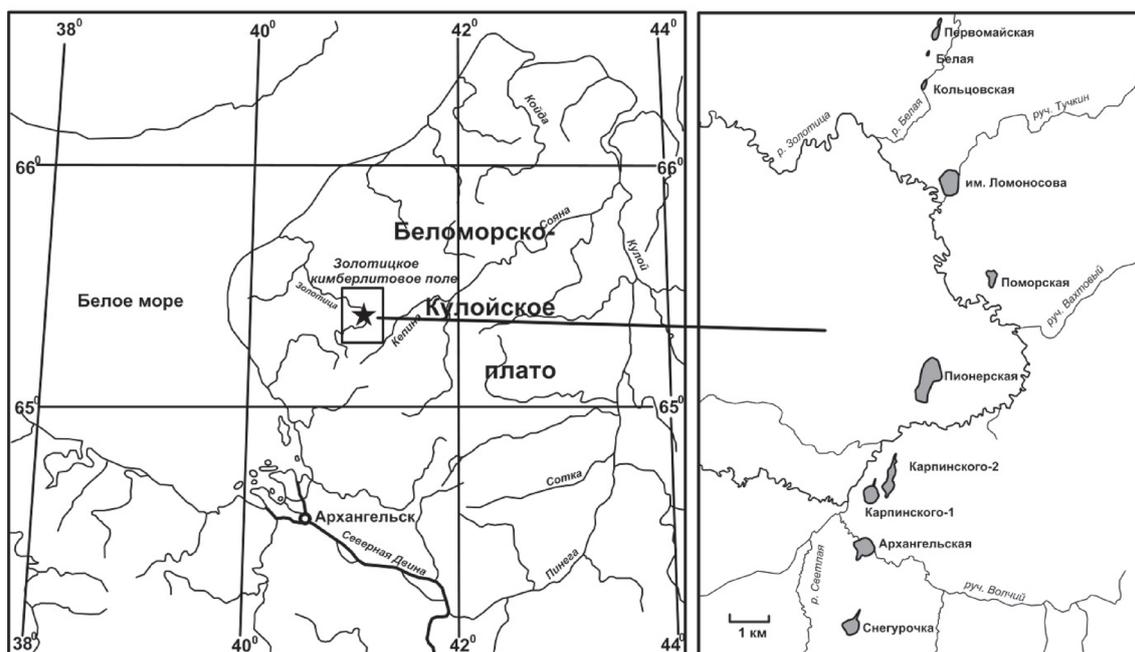


Рис. 1. Местоположение Золотицкого кимберлитового поля ААП

Особенностью гидрогеологического строения территории является отсутствие в разрезе выдержанных по мощности и в пространстве слабопроницаемых отложений, которые могли бы рассматриваться как региональный водоупор [19].

### Материалы и методы исследования

Исследование уран-изотопных характеристик в образцах кимберлитов, горных пород и природных вод проводилось с помощью альфа-спектрометрического метода с предварительным радиохимическим выделением [20, 21]. Для одновременного определения содержания урана и его изотопного состава, а также контроля полноты выхода урана из образцов в пробы вносили трассер – искусственный долгоживущий изотоп  $^{232}\text{U}$ .

Препараты из кимберлитов и горных пород готовили путем измельчения пробы массой 100 г до размера фракций 0,075 мм. Из гомогенизированной таким образом пробы брали навеску массой 10 г и подвергали полному растворению воздействием раствора концентрированных кислот  $\text{HF}$  и  $\text{HClO}_4$  в соотношении 4:1. Кимберлитовый материал, содержащий труднорастворимые минеральные включения, дополнительно подвергали спеканию с  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  при температуре 900°C.

Предварительное концентрирование урана из крупнообъемных водных проб (20–30 литров) проводили в полевых условиях с помощью специально подготовленного активированного угля марки БАУ-А, избирательно сорбирующего до 80% урана. Для адсорбции урана из воды в пробы добавляли порошок активированного угля и тщательно перемешивали. После полного оседания угля на дно емкости воду сливали, а уголь с остатками воды отфильтровывали через фильтр «синяя лента», который затем высуши-

вали на воздухе. Десорбция урана с активированного угля осуществлялась в лабораторных условиях путем промывания фильтра с углем горячей соляной кислотой. После десорбции фильтр с углем полностью озоляли в муфельной печи, а золу присоединяли к десорбированному фильтрату и кипятили в течение 20 минут для удаления углекислоты [22].

После полного растворения горных пород и кимберлитов, а также после десорбции угля радиохимическую очистку урана от соосажденных с ним радиоактивных элементов осуществляли методом экстракции трибутилфосфатом.

Источники для альфа-спектрометрического детектирования готовили путем электролитического осаждения урана на полированные диски из нержавеющей стали диаметром 34 мм. Измерения проводили на полупроводниковом альфа-спектрометре серии «Прогресс».

### Результаты исследования и их обсуждение

Изотопный состав и концентрация урана в кимберлитах и вмещающих породах околотрубочного пространства, отобранных в карьерах трубок Архангельская (35 образцов) и Карпинского-1 (10 образцов), характеризуются широким разбросом значений. Точки опробования показаны на рис. 2. Изотопное отношение урана  $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  в образцах, отобранных в карьере трубки Архангельская, изменяется в пределах от 0,86 до 1,60. Концентрация урана колеблется в диапазоне 0,61–4,07 г/т. Величина  $\gamma$  в породах трубки Карпинского-1 колеблется от 0,88 до 1,35. Концентрация урана изменяется от 0,28 до 1,78 г/т.

В древних породах, возраст которых более 1 миллиона лет, между четными изотопами урана наступает секулярное равновесие, выражающееся в выравнивании альфа-активностей  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ , по причине преимущественного распада радиогенных атомов урана-234 [2]. Однако во многих исследованных нами образцах древних пород трубок Архангельская и Карпинского-1 изотопное равновесие резко нарушено.

Пространственное положение избытков изотопа  $^{234}\text{U}$  в кимберлитах и вмещающих породах по площади карьеров трубок Карпинского-1 и Архангельская выделено ореолами с величинами  $\gamma$  более 1,1. Ореолы неравновесного урана показаны на рис. 2.

Образцы пород на трубке Карпинского-1 были отобраны только в западной части карьера. Равномерность опробования была осложнена тем, что на момент отбора образцов (2014 год) восточный борт трубки не был вскрыт карьером. Максимальные значения величины  $\gamma$  в породах околотрубочного пространства трубки Карпинского-1 приурочены к песчаникам и алевролитам венда. Изотопное отношение в них изменяется в пределах 1,17–1,35 $\gamma$ . Туф кратерной фации характеризуется изотопным отношением урана ниже равновесного (0,88 $\gamma$ ). Образец водно-ледниковых отложений четвертичного возраста характеризуется близким к равновесному изотопным составом урана, то же характерно и для песков уругуской свиты карбона.

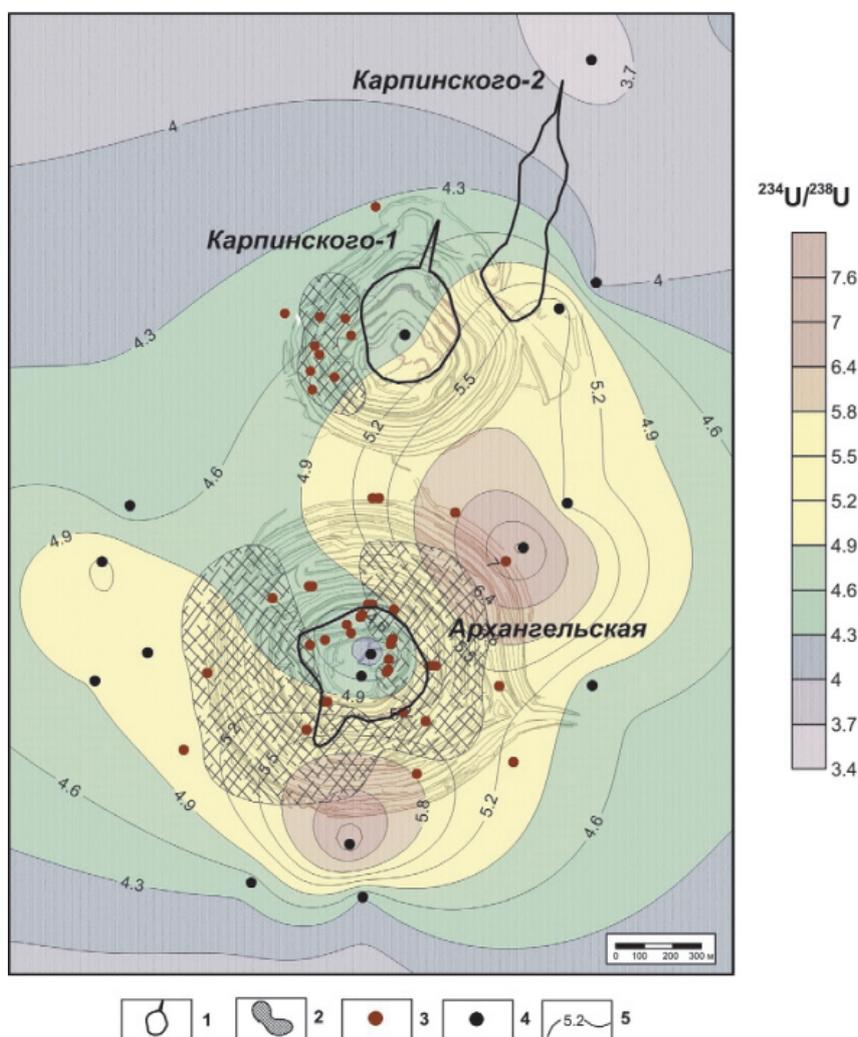


Рис. 2. Величина изотопного отношения  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах вендских отложений в районе южной группы трубок месторождения им. Ломоносова, а также ореол неравновесного урана в околотрубочном пространстве трубок Архангельская и Карпинского-1:

- 1 – контур трубок; 2 – ореол неравновесного урана;  
3 – точки отбора проб горных пород и кимберлитов; 4 – точки опробования подземных вод;  
5 – изолинии изменения величины  $\gamma$  в подземных водах

Ореол неравновесного урана на трубке Архангельская 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  $1,27\gamma$ , достигая значений до  $1,6\gamma$ . В породах урзугской свиты каменноугольного возраста среднее изотопное отношение урана равно 1. Автолитовая брекчия и породы нижнего разреза кратерной фации, характеризуются равновесным изотопным составом урана. В образце четвертичных отложений также отмечается равновесная величина  $\gamma$ , что говорит об отсутствии здесь условий для активного распределения изотопной пары урана.

В распределении концентрации урана отмечается ряд особенностей. Для автолитовой брекчии характерна низкая концентрация урана. Это также характерно для пород нижней части кратерной фации трубки. Образцы, представленные алевролитами и песчаниками урзугской свиты венда, характеризуются средним содержанием урана около  $1,2 \text{ ppm}$ . Содержание урана в образце четвертичных отложений составляет  $1,4 \text{ ppm}$ . Пространственная картина распределения урана 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  $1,8 \text{ ppm}$ .

Причиной резкого нарушения изотопного отношения урана в породах околотрубочного пространства является структурно-геологическая позиция кимберлитовой трубки Архангельская. Это подтверждается результатами исследований в карьере трубки Архангельская, в результате которых в околотрубочном пространстве были зафиксированы разрывные нарушения, сопровождающие экзоконтакты кимберлитов [10]. Тектонические нарушения сопровождаются вмещающие и перекрывающие отложения и достоверно установлены в урзугской свите карбона и падунской свите венда. Позднее в красноцветных терригенных породах венда в карьере трубки Архангельская было исследовано прожилковое осветление [12]. В результате детального картирования околотрубочного пространства тр. Архангельская в масштабах 1:500 и 1:5000 было установлено эндогенное происхождение прожилкового осветления по морфологии, минеральному и хи-

мическому составу. Размеры ореола распространения секущего осветления достигают диаметра трубки и пространственно имеют схожую конфигурацию с ореолом неравновесного урана.

Прожилки осветления закартированы авторами работы [12] по всему периметру околотрубочного пространства. Эндогенное прожилковое осветление отмечено 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  $^{234}\text{U}$  хорошо согласуются с данными по тектоническим и вещественным изменениям в породах околотрубочного пространства, и природа явления связана именно со структурно-геологическими особенностями трубки. Механизм нарушения изотопного равновесия урана в данном случае может быть объяснен процессами динамики и циркуляции подземных вод по установленным 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  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , которое устанавливается по избыткам урана-234 в породах околотрубочного пространства трубки Архангельская. Процессы фракционирования изотопов  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  в породах околотрубочного пространства должны приводить к активной миграции  $^{234}\text{U}$  в воду и формированию вокруг трубки ореола с высокими значениями  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . Это в свою очередь определяет необходимость исследования изотопного состава урана в подземных водах, омывающих кимберлитовые трубки.

Приведенные выше факты свидетельствуют о широком развитии признаков околотрубочного пространства в карьере трубки Архангельская. Среди тектонических и вещественных признаков околотрубочного пространства также выделяется

увеличением во вмещающих породах изотопного отношения урана  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . Это позволяет рассматривать величину  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  с избытками урана-234 в качестве поискового признака кимберлитовых тел. Аномальное неравновесие изотопной пары урана в сторону увеличения активности  $^{234}\text{U}$  было также обнаружено в керне разведочной скважины трубки Пионерская, приуроченной к околотрубочному пространству [27].

Впервые исследование изотопного состава урана подземных вод, омывающих кимберлитовые трубки, было выполнено на территории Якутской алмазоносной

провинции, в результате чего, были установлены аномальные избытки изотопа  $^{234}\text{U}$  в подземных водах [8]. Высокие избытки величины  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах были отнесены к поисковым признакам на кимберлиты. На территории Архангельской алмазоносной провинции аномалии изотопного состава урана подземных вод, циркулирующих в районе кимберлитовых тел, были впервые установлены Г.П. Киселевым (1999) [16]. Эти закономерности говорят о схожем характере формирования изотопного состава урана подземных вод в областях развития кимберлитового магматизма.

Уран-изотопный состав подземных и поверхностных вод Золотицкого кимберлитового поля

№ п/п	Место отбора проб	Концентрация урана, $n \cdot 10^{-6}$ г/дм <sup>3</sup>	Изотопное отношение $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \pm 0,02$ Бк/Бк
<b>Подземные воды</b>			
1	Скважина на сев. окраине тр. Кольцовская	0,31	4,54
2	Скважина на юж. окраине тр. Кольцовская	0,38	4,10
3	Скважина 130А, тр. им. Ломоносова	1,13	5,68
4	Скважина 16 тр. им. Ломоносова	0,16	3,07
5	Скважина на зап. границе тр. Пионерская	0,43	5,63
6	Скважина на тр. Карпинского-1	0,39	4,77
7	Скважина на сев. границе тр. Карпинского-2	0,29	3,57
8	Скважина в карьере тр. Архангельская	0,32	4,54
9	Скважина в карьере тр. Архангельская	0,19	4,05
10	Скважина ВПС-4 тр. Архангельская	0,39	4,41
11	Скважина ВПС-6 тр. Архангельская	0,27	5,26
12	Скважина ВПС-10 тр. Архангельская	0,38	4,92
13	Скважина ВПС-36 тр. Архангельская	0,36	4,71
14	Скважина ВПС-24 тр. Архангельская	1,66	4,42
15	Скважина ВПС-21 тр. Архангельская	2,04	4,44
16	Скважина ЮАД-3 тр. Архангельская	2,71	7,41
17	Скважина ЗАД-2 тр. Архангельская	0,79	3,42
18	Скважина ВАД-2 тр. Архангельская	1,57	7,81
19	Скважина ВАД-3 тр. Архангельская	2,01	5,40
20	Скважина ВКД-3	1,56	5,8
21	Скважина ВКД-2	3,16	3,92
22	Скважина 2Э Водозабор ГОКа	1,62	7,20
23	Скважина 3П Водозабор ГОКа	0,53	5,70
24	Скважина 1Г	0,77	2,81
25	Скважина 14Г	0,31	1,99
26	Родник у нового хвостохранилища	2,01	2,71
<b>Поверхностные воды</b>			
27	Р. Золотица	0,24	1,26
28	Р. Белая	0,42	1,36
29	Руч. Вахтовый	0,27	1,26
30	Руч. Тучкин на тр. им. Ломоносова	0,53	2,21
31	Болото южнее тр. Поморская	0,21	1,15
32	Болото южнее тр. Поморская	0,49	1,35

С целью установления закономерностей изменения величины  $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  в природных водах и приуроченности избытков  ${}^{234}\text{U}$  к кимберлитовым телам, в пределах Золотицкого поля были выполнены исследования изотопного состава урана. Пробы природных вод на территории Золотицкого поля отбирались из эксплуатационных и самоизливающихся скважин, а также из рек, ручьев и заболоченных участков. Результаты определений изотопного состава и концентрации урана представлены в таблице.

Как видно из таблицы, значения отношения альфа-активностей четных изотопов урана ( $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ ) подземных вод в районе Золотицкого кимберлитового поля изменяются от 1,99 до 7,81 $\gamma$ , а концентрация урана изменяется в диапазоне 0,16–3,16 ppm. Максимальная величина изотопного отношения (7,81) отмечается в скважине ВАД-2, расположенной на северо-восточной окраине трубки Архангельская.

Минимальные величины  $\gamma$  наблюдаются в подземных водах, удаленных от кимберлитовых трубок (скважины 14Г, 1Т и родник у нового хвостохранилища). Изотопное отношение урана в них колеблется от 1,99 до 2,81 $\gamma$ . Изотопное отношение урана в поверхностных водах исследуемого района изменяется в незначительных пределах от 1,15 до 2,21 $\gamma$ . Диапазон изменения концентрации урана в них также незначительный (0,21–0,53 ppm).

Полученные нами данные для большей части проб подземных вод Золотицкого кимберлитового поля демонстрируют аномальный избыток изотопа  ${}^{234}\text{U}$  по отношению к  ${}^{238}\text{U}$ , превышающий в среднем 400%. Поскольку основной источник питания подземных вод в данном районе инфльтрационного происхождения, то изотопный состав урана должен быть близок к значениям поверхностного стока с некоторым увеличением в результате перехода подвижных атомов  ${}^{234}\text{U}$  из водовмещающей толщи. Средний изотопный состав урана подземных вод платформенных областей составляет 1,40–1,80 $\gamma$  [15]. Однако в нашем случае в подземных водах мы наблюдаем резкое возрастание изотопного отношения урана, значительно превышающее величины  $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  для подземных вод платформенных областей и поверхностных вод исследуемого района. Поскольку возрастание избытка изотопа  ${}^{234}\text{U}$  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 $\gamma$ , 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 южной группы трубок месторождения им. Ломоносова: трубки – Архангельская, Карпинского-1, Капринского-2. Пробы представляли собой подземные воды, циркулирующие в пределах вендского комплекса пород в районе куста трубок. Три точки отбора проб расположены в карьерах трубок Архангельская и Карпинского-1 и представляют собой смесь атмосферных осадков и вод из водоносных горизонтов, приуроченных к каменноугольным и вендским отложениям, выклинивающимся на бортах карьеров. Карта изолиний величины  $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  показана на рис. 2. Как видно на рис. 2, изменение изотопного отношения урана в подземных водах подчиняется определенной закономерности. Увеличение избытков изотопа  ${}^{234}\text{U}$  происходит с приближением к границам кимберлитовых трубок. Ореол неравновесного урана формируется вокруг трубок аномалию избытков  ${}^{234}\text{U}$  концентрической формы. Плотная сеть наблюдений вокруг трубки Архангельская отражает приуроченность аномалий изотопного состава урана к околотрубочному пространству. Закономерности пространственного изменения величины  $\gamma = {}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  в подземных водах и породах околотрубочного пространства трубки Архангельская указывает на их генетическую связь и взаимообусловленность. Процессы активного фракционирования изотопов урана в породах, связанные с геологическим строением околотрубочного пространства, приводят к миграции урана-234 и обогащению подземных вод избытками изотопа  ${}^{234}\text{U}$ . Возможно, аналогичные изотопные эффекты могут наблюдаться и в пределах разломов

осадочного чехла, контролируемых кимберлитов, поскольку развитые в них зоны трещиноватости также будут приводить к изменению гидрохимических условий циркуляции подземных вод, осаждению урана и миграции изотопа  $^{234}\text{U}$ . Установление возможности таких процессов требует специальных исследований. Однако 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.

### Заключение

Результаты исследования особенностей фракционирования радиоизотопов на территории Золотицкого кимберлитового поля сводятся к следующему.

В породах околотрубочного пространства установлены избытки изотопа  $^{234}\text{U}$ . Формирование высоких значений величины  $\gamma = ^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  обусловлено геологическим строением околотрубочного пространства. Закономерности распределения избытков изотопа  $^{234}\text{U}$  хорошо согласуются с данными по тектоническим и вещественным изменениям в породах околотрубочного пространства. Механизм нарушения изотопного равновесия урана объясняется процессами динамики и циркуляции подземных вод по тектоническим трещинам, ограничивающим трубки. Развитие трещиноватых зон в околотрубочном пространстве к осаждению урана и миграции изотопа  $^{234}\text{U}$ . Орел неравновесного урана достигает двух диаметров трубки и может рассматриваться в качестве локального поискового признака на обнаружение кимберлитов.

Изотопный состав урана поверхностных вод в районе Золотицкого поля, а также подземных вод, не связанных с кимберлитовыми телами, характеризуется минимальным избытком  $^{234}\text{U}$ , изменяющимся в диапазоне от 1,15 до 2,81 Бк/Бк. Подземные воды, циркулирующие в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел, сопровождаются аномальными активностями дочернего изотопа  $^{234}\text{U}$  по отношению к  $^{238}\text{U}$ . Средние значения избытка  $^{234}\text{U}$  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  $^{234}\text{U}$  может рассматриваться в качестве идентификационного критерия вод кимберлитовых трубок и выступать поисковым признаком при выявлении новых кимберлитовых тел на территории Зимнебережного алмазоносного района.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-35-00153 «Механизмы формирования изотопного состава урана алмазоносных и вмещающих пород кимберлитовых трубок Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции».*

### Список литературы

1. Андросов Е.А., Вержак В.В., Ларченко В.А. и др. О структурном контроле размещения кимберлитовых тел на примере Архангельской кимберлитовой провинции // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (алмазы-50). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. – С. 9–18.
2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Зубов Е.И. и др. Интерпретация аэрогеофизических данных при поисках месторождений твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 5. – С. 18–26.
3. Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А. и др. Архангельская алмазоносная провинция (Геология, петрография, геохимия и минералогия). – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 524 с.
4. Бушков К.Ю. Структура Накынского кимберлитового поля и признаки скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур: дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М., 2006.
5. Васильев И.Д. Геологические структуры в околотрубочном пространстве трубки Архангельская и их использование для поисков коренных месторождений алмазов в Зимнебережном районе: автореф. канд. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2010.
6. Вержак В.В., Минченко Г.В., Ларченко В.А. и др. Опыт поисков месторождений алмазов в Архангельской алмазоносной провинции и на сопредельных территориях севера Восточно-Европейской платформы // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН. 2008. – С. 308–314.
7. Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В. и др. Тектонофизические исследования при алмазописковых работах: методическое пособие. – М.: Научный мир, 2008. – 175 с.
8. Ежова М.П., Поляков В.А. Способ поиска кимберлитов в районах проявления кимберлитового магматизма // № SU 970 986, Изобретения СССР, 1981.
9. Зарипов Н.Р. Первые данные по радиационным дефектам в осадочных породах Зимнебережного района Архангельской области // Науки о Земле. Современное состояние: материалы II Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции. – Новосибирск: НГУ, 2014.
10. Игнатов П.А., Болонин А.В., Васильев И.Д. и др. Складчатые и разрывные деформации во вмещающих и перекрывающих толщах в карьере кимберлитовой трубки Архангельская // Руды и металлы. – 2012. – № 1. – С. 42–48.
11. Игнатов П.А., Болонин А.В., Калмыков Б.А. и др. Палеотектонические структуры Зимнебережного алмазоносного района Архангельской области // Бюлл. МОИП. Отд. геол. – 2008. – № 3. – С. 13–20.

12. Игнатов П.А., Зарипов Н.Р., Ким В. и др. Типы осветленных красноцветных кимберлитовмещающих пород венда-кембрия Зимнебережного района Архангельской области // Геология и разведка. Известия вузов. – 2015. – № 2. – С. 15–21.
13. Игнатов П.А., Новиков К.В., Бушков К.Ю. и др. Реконструкция кинематики разломов на закрытых территориях по данным анализа микронарушений в керне // Геология и разведка. Известия вузов. – 2011. – № 3. – С. 55–60.
14. Игнатов П.А., Штейн Я.И., Черный С.Д. и др. Новые приемы оценки локальных площадей на коренные месторождения алмазов // Руды и металлы. – 2001. – № 5. – С. 32–43.
15. Киселев Г.П. Прогноз месторождений полезных ископаемых и загрязнения геологической среды уран-изотопными методами: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2005. – 50 с.
16. Киселев Г.П. Четные изотопы урана в геосфере. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 220 с.
17. Коротков Ю.В. К вопросу о выделении и отслеживании разрывных нарушений по характерным изменениям проводимости в толщах осадочных отложений // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12. – № 4. – С. 81–92.
18. Ларченко В.А., Степанов В.П., Минченко Г.В. и др. Алмазоносность кимберлитов и родственных им пород Зимнего берега // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2004. – № 2. – С. 134–147.
19. Малов А.И., Киселев Г.П. Уран в подземных водах Мезенской синеклизы. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2008. – 238 с.
20. Методика измерений объемной активности изотопов урана ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. – М.: ФГУП «ВИМС», 2013. – 15 с.
21. Методика измерений удельной активности изотопов урана ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) в пробах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. – М.: ФГУП «ВИМС», 2013. – 18 с.
22. Методическое руководство по уран-изотопному моделированию динамики подземных вод в условиях активного водообмена. – Бишкек: Илим, 1991. – 88 с.
23. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. – Новосибирск: Изд-во «Малотиражная типография 2D», 2010. – 121 с.
24. Чалов П.И. Изотопное фракционирование природного урана. – Фрунзе: Илим, 1975. – 236 с.
25. Чердынцев В.В., Чалов П.И. Естественное разделение  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  // Открытия в СССР. – М.: УНИИПИ, 1977. – С. 28–31.
26. Эринчек Ю.М., Рыхлова Т.И., Валуева Н.И. и др. Детальное литолого-стратиграфическое расчленение падунской свиты венда в Зимнебережном алмазоносном районе // Разведка и охрана недр. – 1997. – № 11. – С. 3–8.
27. 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. – 2016. – № 1. – С. 19–28.