

УДК 540.4+553.81

doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.1.19

ЯКОВЛЕВ Евгений Юрьевич

Институт экологических проблем Севера Уральского отделения РАН

адрес: 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 109; e-mail: yakovlev_eu@inbox.ru

КИСЕЛЕВ Георгий Петрович

Институт экологических проблем Севера Уральского отделения РАН

адрес: 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 109; e-mail: kiselevgp@yandex.ru

ДРУЖИНИН Сергей Валериевич

Институт экологических проблем Севера Уральского отделения РАН

адрес: 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 109; e-mail: druzhininserg@yandex.ru

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН В КИМБЕРЛИТАХ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ ТРУБКИ ПИОНЕРСКАЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА¹

Существующие в настоящее время проблемы в применении традиционных методов прогноза и поисков месторождений алмазов на территории Архангельской области, связанные со снижением контрастности выделяемых аномалий, обуславливают необходимость поиска других подходов к решению этих задач. Одним из таких направлений, активно развиваемых в последние годы, стало выявление в керне поисковых скважин признаков околорудных изменений вмещающих отложений, связанных с воздействием кимберлитов, таких как тектонические деформации, приконтактовые изменения пород, увеличение концентраций радиационных дефектов. Установлено, что в околотрубочном пространстве также обнаруживается увеличение интенсивности гамма-излучения пород, повышение концентрации ряда радиоактивных элементов, таких как уран-238, торий-232, калий-40, и возрастание величины отношения активностей четных изотопов урана, которое является трассером взаимодействия рудного вещества и вмещающих отложений. Возникла необходимость изучения особенностей фракционирования изотопов урана в твердой фазе приконтактовой области на примере ряда кимберлитовых трубок месторождения имени М.В. Ломоносова. Выполнено исследование изотопного состава урана в кимберлитах и вмещающих отложениях трубки Пионерская Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции. Показано, что в кимберлитах диатремы, а также вмещающих отложениях, отдаленных от трубки, преимущественно сохраняется близкий к равновесному изотопный состав урана. В то же время в твердой фазе горных пород в приконтактовой зоне кимберлитов отмечается возрастание неравновесия альфа-активностей изотопной пары урана, что является следствием взаимодействия кимберлитового вещества и вмещающих отложений, приводящих к фракционированию четных изотопов урана.

Ключевые слова: фракционирование изотопов урана, кимберлиты, вмещающие отложения, околотрубочное пространство, альфа-активность, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, Архангельская алмазоносная провинция.

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Архангельской области (конкурс «Молодые ученые Поморья») в рамках научного проекта №13-2015-03а «Исследование изотопов урана ^{234}U , ^{238}U в кимберлитах месторождения имени М.В. Ломоносова».

К настоящему времени в применении традиционных методов прогноза и поисков месторождений алмазов на территории Архангельской области, таких как магниторазведка, наметился определенный кризис, который вызван снижением интенсивности аномалий магнитного поля и приближением к уровню геологических помех [1]. Множество других геофизических и геохимических методов, опробованных для решения задачи поисков коренных месторождений алмазов, не продемонстрировало устойчивую эффективность [2]. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых подходов к решению задач поисков месторождений алмазов и внедрения их в практику поисковых работ. Одним из перспективных подходов является разрабатываемый в последние годы рядом исследователей комплекс методов, основанных на заверке слабоконтрастных магнитных аномалий по структурно-тектоническому принципу [3, 4]. Важнейшее значение при этом приобретает выделение признаков разломной тектоники и околорудных изменений горных пород в разрезах скважин. В околотрубочном пространстве обнаруживаются проявления тектонических деформаций различной морфологии и генезиса (как в зоне контакта, так и на некотором удалении), зоны приконтактных изменений вмещающих горных пород, а также увеличение концентрации радиационных дефектов в кварцах вмещающих песчаников при приближении к контактам трубки [3, 5]. Выполненный нами комплекс высокоточных радиоизотопных исследований в пределах трубки Архангельская также позволил установить существование радиоактивных аномалий в околотрубочном пространстве [6]. Такие аномалии выделяются по радиоактивным изотомам U, Th, Ra, K, а также по резкому нарушению отношения активностей четных изотопов урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в твердой фазе. Выявленные радиоизотопные особенности пород в пределах трубки Архангельская обосновывают перспективы развития радиоизотопных методов и определяют необходимость проверки наличия означенных изменений и на других объектах Золотицкого рудного поля. Значительный интерес для нас представля-

ет исследование неравновесного урана в твердой фазе, являющегося индикатором взаимодействия рудного вещества с вмещающими отложениями [7]. В связи с этим целью настоящей работы является исследование изотопного состава урана в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская Золотицкого поля для установления возможности выделения признаков околорудных изменений вмещающих отложений по неравновесному урану.

Материалы и методы. Архангельская алмазоносная провинция расположена на севере Восточно-Европейской платформы (*рис. 1*).

На территории провинции выделено несколько полей кимберлитов и родственных им пород. Наиболее изученным является Золотицкое кимберлитовое поле, в пределах которого находится месторождение имени М.В. Ломоносова [8, 9].

Вмещающая кимберлиты песчано-глинистая формация мощностью около 920 м отнесена к верхнему отделу вендской системы и представлена отложениями трех свит: устьпинезской, мезенской и падунской. Комплекс перекрывающих пород представлен отложениями среднекаменноугольного возраста, общая мощность которых возрастает с юга на север с 28 до 55 м, и четвертичного возраста. В разрезе среднекаменноугольных отложений развиты песчаники с редкими маломощными прослоями алевролитов, известняков и гравелитов. Четвертичные образования представлены различными генетическими типами: флювиогляциальными, ледниковыми, озерными, озерноболотными и аллювиальными.

В вертикальном разрезе трубка Пионерская представляет собой две сближенные трубки с общим раструбом и относится к двухкорневым диатремам. Жерловая часть трубки выполнена автолитовыми брекчиями и ксенотуфобрекчиями, которые слагают самостоятельные рудные столбы. У трубки сохранилась кратерная часть, сложенная осадочно-вулканогенными образованиями двух основных типов пород – туфогенных и туфогенно-осадочных.

С целью определения содержания и изотопного состава урана в кимберлитах и вмеща-

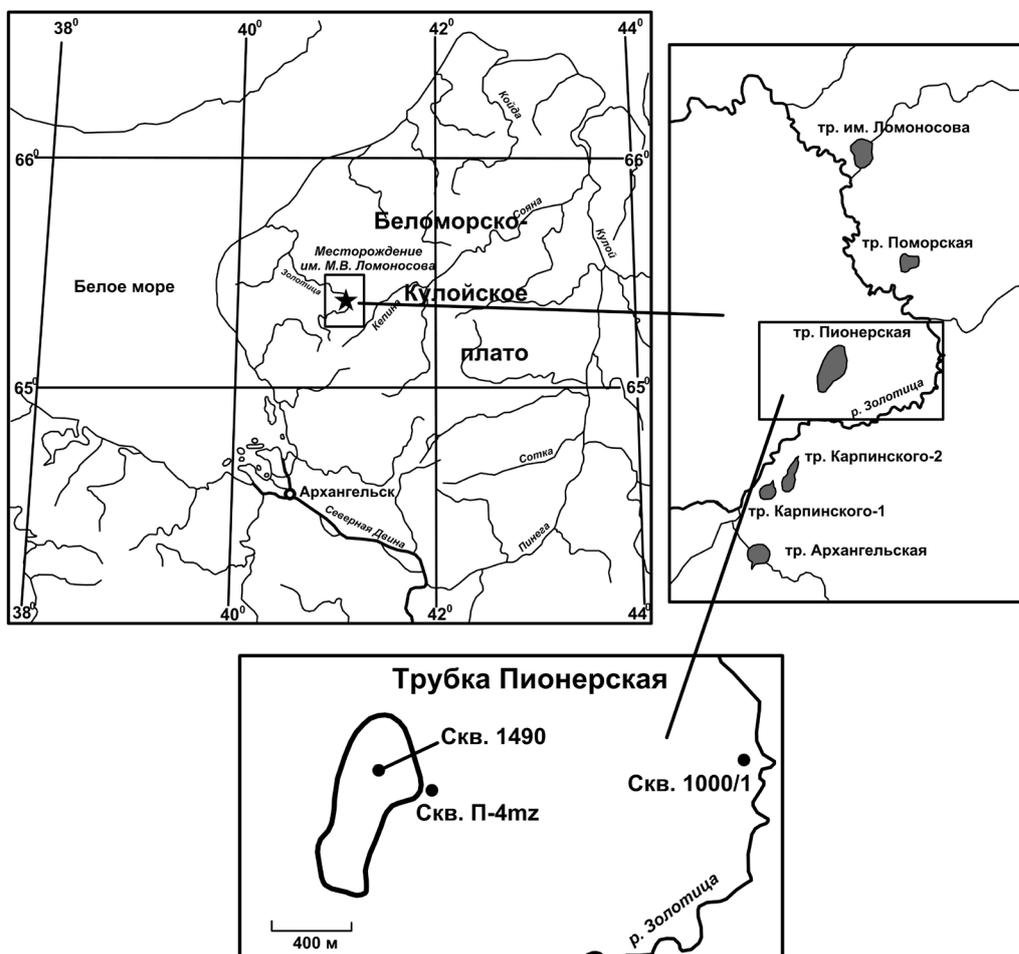


Рис. 1. Местоположение района исследования и размещение опробованных скважин

ющих отложениях трубки Пионерская были отобраны 17 проб, представленных кернами трех скважин. Препараты готовили путем измельчения породы 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 HF и HClO₄ в соотношении 4:1. Кимберлитовый материал, содержащий труднорастворимые минеральные включения, дополнительно подвергали спеканию с Na₂CO₃ при темпера-

туре 900 °С. После этого породу переводили в азотнокислый раствор, из которого изотопы урана экстрагировали 30-процентным раствором трибутилфосфата в толуоле с последующей очисткой от мешающих радионуклидов с близкими энергиями альфа-частиц. Выход урана контролировали по активности введенного в препарат индикатора – искусственного изотопа ²³²U (0,0265 Бк).

Источники для альфа-спектрометрического определения готовили путем электролитического осаждения урана на диски из нержа-

вещей стали диаметром 34 мм. Измерения выполнялись на полупроводниковом альфа-спектрометре серии «Прогресс» с кремниевым детектором площадью 400 мм² и разрешающей способностью 30 кэВ. Время измерений изменялось в зависимости от активности препарата от 8 до 33 ч.

Результаты и обсуждение. Результаты определения изотопного состава и концентрации урана в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская представлены в *таблице*, демонстрирующей широкий разброс значений исследуемых показателей.

Первые данные по содержанию радиоактивных элементов в кимберлитах были получены для африканских образцов [10]. Затем появились результаты аналогичных исследований пород кимберлитовых трубок Сибири [11]. Согласно этим данным содержание радиоэлементов в кимберлитах сопоставимо с гранитами и характеризуется наиболее высокими концен-

трациями урана и тория в ряду ультраосновных пород. Содержание урана в кимберлитах Сибирской платформы закономерно возрастает от южных к северным районам от 2,0 до 8,2 г/т. Авторами работы [12] установлены и более высокие значения для некоторых трубок Якутской алмазоносной провинции (около 11 г/т).

Для образцов кимберлитов Индии был также отмечен широкий разброс значений концентрации урана. Содержание суммарного урана колеблется от 1,87 до 3,93 ppm [13]. Кимберлиты трубок района Форт де ла Корн, расположенного в Канаде, также характеризуются повышенными концентрациями урана [14].

Обращают на себя внимание значительно более низкие концентрации урана (0,33–0,80 ppm) в исследованных нами образцах автолитовых кимберлитовых брекчий трубки Пионерская (скважина 1490) по сравнению с кимберлитами традиционных районов Якут-

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ И КОНЦЕНТРАЦИЯ УРАНА В КИМБЕРЛИТАХ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ ТРУБКИ ПИОНЕРСКАЯ ЗОЛОТИЦКОГО ПОЛЯ АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

| Шифр пробы | Краткое описание пробы | Глубина, м | ²³⁴ U/ ²³⁸ U±0,02 | U, ppm |
|------------------------|------------------------|------------|---|--------|
| <i>Скважина 1490</i> | | | | |
| P-1kim | Автолитовая брекчия | 490 | 1,01 | 0,68 |
| P-2kim | Автолитовая брекчия | 560 | 1,08 | 0,80 |
| P-3kim | Автолитовая брекчия | 700 | 1,14 | 0,48 |
| P-4kim | Автолитовая брекчия | 765 | 1,11 | 0,71 |
| P-5kim | Автолитовая брекчия | 840 | 0,85 | 0,45 |
| P-6kim | Автолитовая брекчия | 910 | 0,89 | 0,33 |
| P-7kim | Автолитовая брекчия | 960 | 1,03 | 0,44 |
| P-8kim | Автолитовая брекчия | 1030 | 1,04 | 0,47 |
| <i>Скважина 1000/1</i> | | | | |
| P-6wmp | Алевролит | 310 | 1,10 | 2,46 |
| P-7wmp | Аргиллит | 440 | 1,09 | 2,59 |
| P-8wmp | Аргиллит | 760 | 0,94 | 1,41 |
| P-9wmp | Аргиллит | 1070 | 1,01 | 3,35 |
| <i>Скважина П-4mz</i> | | | | |
| P-1mz | Песчаник | 149 | 3,57 | 1,31 |
| P-2mz | Песчаник | 195 | 1,15 | 0,92 |
| P-3mz | Песчаник | 202 | 1,17 | 0,40 |
| P-4mz | Песчаник | 208 | 0,85 | 5,93 |
| P-5mz | Песчаник | 213 | 1,35 | 0,45 |

ской алмазонасной провинции и мира. Полученные нами данные согласуются с результатами исследований [15, 16]: в кимберлитах ряда трубок Золотицкого поля установлены аналогичные значения содержания урана. Также авторами [15] были выявлены отрицательные аномалии высокозарядных редких элементов, тория, титана и низкие величины индикаторных отношений Ce/Y , Nb/Zr и Th/U . На основании этих данных кимберлиты Архангельской алмазонасной провинции были выделены в отдельный геохимический тип D. Существенным является и отличие кимберлитов D-типа от кимберлитов традиционных алмазонасных районов Якутии в минеральном составе, который определяет физические свойства пород и обуславливает их низкую магнитную восприимчивость [15].

На рис. 2 представлен график зависимости изменения содержания урана и глубины в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская. Выделяются три области по изменению концентрации и характеру распределения урана в зависимости от глубины.

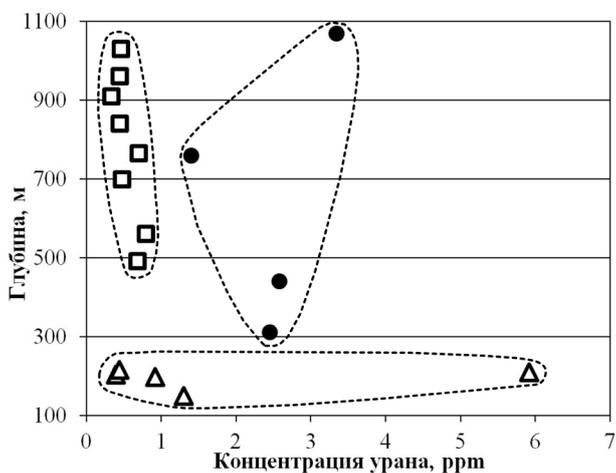


Рис. 2. Изменение концентрации урана в зависимости от глубины залегания в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская месторождения имени М.В. Ломоносова: ● – вмещающие отложения (скважина 1000/1); □ – кимберлиты (скважина 1490); ▲ – вмещающие породы, находящиеся в экзоконтактах трубки (скважина П-4mz)

Вмещающие алевролиты и аргиллиты, представленные образцами керна скважины 1000/1, в целом характеризуются концентрациями урана, соответствующими данным типам пород [17]; эти показатели в несколько раз превышают значения содержания урана в кимберлитах (скважина 1490), отличающихся относительной равномерностью значений на разных глубинах. На графике выделяется еще одна область, представленная образцами песчаников мезенской свиты венда (скважина П-4mz), находящимися в приконтактной зоне кимберлитов верхнего разреза трубки Пионерская. Данные породы характеризуются самым большим разбросом 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, приводящие к сорбции урана песчаниками.

Нами установлена зависимость содержания урана от глубины в кимберлитах трубки Пионерская. Как видно на графике (рис. 3), концентрация урана с увеличением глубины в автолитовых брекчиях скважины 1490 закономерно убывает.

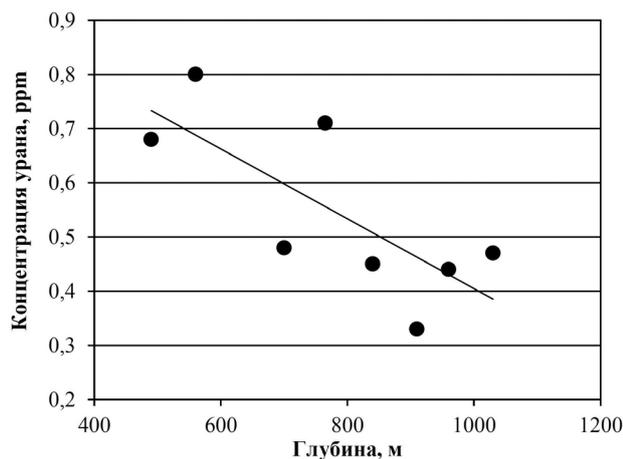


Рис. 3. Содержание урана в кимберлитах трубки Пионерская

Данная зависимость выражается значением коэффициента корреляции $-0,75$. Это позволяет сделать вывод 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.

Исследование четных изотопов урана в процессе кимберлитового магматизма впервые было выполнено на примере трубок алмазоносных районов Якутии [18]. Полученные результаты показывают слабую информативность изотопного отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в качестве геохимического трассера при изолированном рассмотрении кимберлитового вещества. Однако позднее во вмещающих отложениях, приуроченных к экзоконтактам кимберлитовых трубок, было обнаружено нарушение изотопного равновесия урана в сторону увеличения активности дочернего изотопа ^{234}U . Это позволило по-новому взглянуть на использование изотопного отношения урана в качестве индикатора твердофазного взаимодействия кимберлитов и вмещающих пород [19].

На *рис. 4* показан график изменения отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в кимберлитах и вмещающих отложениях трубки Пионерская в зависимости от глубины. Как видно на рисунке, 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 отношения альфа-активностей четных изотопов урана свидетельствуют о стабильном состоянии этих пород на протяжении долгого времени и отсутствии влияния современных экзогенных процессов, способных привести к изотопному фракционированию. При приближении к границам трубки в твердой фазе образцов керна скважины П-4mz наблюдается резкое нарушение

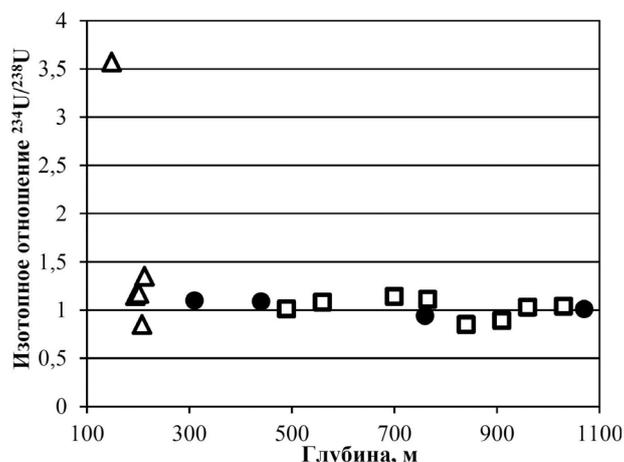


Рис. 4. Изотопное отношение урана в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская месторождения имени М.В. Ломоносова: ● – вмещающие отложения (скважина 1000/1); □ – кимберлиты (скважина 1490); ▲ – вмещающие породы, находящиеся в экзоконтактах трубки (скважина П-4mz)

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. Подобные особенности были установлены нами и для трубки Архангельская, где было обнаружено возрастание неравновесия уранового ряда во вмещающих породах при приближении к границам трубки. Таким образом, высокий изотопный сдвиг в породах околотрубочного пространства трубки Пионерская свидетельствует об активных процессах фракционирования урана при взаимодействии рудного вещества и вмещающих образований.

Выводы. Результаты исследования изотопов урана в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции позволяют сделать следующие выводы:

1. Кимберлиты и вмещающие породы, находящиеся на удалении от трубчатого пространства, характеризуются близким к равновесному изотопным составом урана, что свидетельству-

ет об их стабильном состоянии и об отсутствии в них на современном этапе процессов, способных привести к фракционированию.

2. Во вмещающих отложениях ближней зоны кимберлитовой трубки, приуроченных к экзоконтактам, резко нарушается изотопное равновесие уранового ряда.

3. Возрастание индикаторного изотопного отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ во вмещающих породах при приближении к границе трубки свидетельствует о существовании в околотрубочном пространстве области взаимодействия

кимберлитов и вмещающих отложений. Размеры этой области могут быть соотносимыми с размерами самой трубки.

4. Околорудные изменения горных пород в разрезах скважин, относимые в настоящее время к перспективным поисковым признакам обнаружения алмазов, отличаются возрастанием избытка изотопа ^{234}U при приближении к приконтактовой области. Неравновесный уран является новым критерием обнаружения признаков околотрубочного пространства.

Список литературы

1. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск, 2010. 121 с.
2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Зубов Е.И., Лаврова Т.Ю., Трусов А.А. Интерпретация аэрогеофизических данных при поисках месторождений твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2006. № 5. С. 18–26.
3. Васильев И.Д. Геологические структуры в околотрубочном пространстве трубки Архангельская и их использование для поисков коренных месторождений алмазов в Зимнебережном районе: дис. ... канд. геол.-минералог. наук. М., 2010.
4. Вержак В.В., Минченко Г.В., Ларченко В.А., Сотников В.И., Гунин А.П. 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 конф., посвящ. 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Якутск, 2008. С. 308–314.
5. Игнатов П.А., Болонин А.В., Васильев И.Д., Шмонов А.М., Фомин А.А., Ким В. Складчатые и разрывные деформации во вмещающих и перекрывающих толщах в карьере кимберлитовой трубки Архангельская // Руды и металлы. 2012. № 1. С. 42–48.
6. Яковлев Е.Ю., Киселев Г.П., Дружинин С.В. Особенности распределения радиоактивных элементов в породах кимберлитовой трубки Архангельская (месторождение им. М.В. Ломоносова) // Новое в познании процессов рудообразования: материалы 5-й Рос. молодеж. науч.-практ. школы с междунар. участием. М., 2015. С. 289–291.
7. Киселев Г.П. Прогноз месторождений полезных ископаемых и загрязнения геологической среды уран-изотопными методами: дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. Архангельск, 2005.
8. Богатилов О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А., Кудрявцева Г.П., Васильева Е.Р., Вержак В.В., Веричев Е.М., Парсаданян К.С., Посухова Т.В. Архангельская алмазоносная провинция (Геология, петрография, геохимия и минералогия). М., 1999. 524 с.
9. Вержак В.В. Геологическое строение, вещественный состав, условия образования и методика разведки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова: дис. ... канд. геол.-минералог. наук. М., 2001.
10. Ahrens L.H., Cherry R.D., Erlank A.J. Observation on the Th-U Relationship in Zircons from Granitic Rocks and from Kimberlites // Geochim. Cosmochim. Acta. 1967. № 31. P. 2379–2387.
11. Lutts B.G., Mineeva I.G. Uranium and Thorium in Kimberlites of Siberia // Geochemistry International. 1973. № 11. P. 1721–1724.
12. Зверев В.Л., Семенов Г.С., Спиридонов А.И., Чешико А.Л. Разделение изотопов урана в процессе кимберлитового магматизма // Геохимия. 1976. № 12. С. 1884–1886.
13. Paul D.K., Gale N.H., Harris P.G. Uranium and Thorium Abundances in Indian kimberlites // Geochim. Cosmochim. Acta. 1977. № 41(2). P. 335–339.

14. Mwenifumbo C.J., Kjarsgaard B.A. Gamma-Ray Logging and Radioelement Distribution in the Fort à la Corne Kimberlite Pipe 169 // Exploration and Mining Geology. 1999. №.8(12). P. 137–147.

15. Лапин А.В., Толстов А.В. О геохимических типах кимберлитов // Щелочной магматизм и его рудоносность. Киев, 2007. С. 139–142.

16. Белов С.В., Бурмистров А.А., Зинчук Н.Н., Лапин А.В., Толстов А.В., Фролов А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз). М., 2005. 540 с.

17. Тутаева Н.А. Геохимия природных радиоактивных рядов распада. М., 2005. 226 с.

18. Зверев В.Л., Кравцов А.И., Илупин И.П., Пряхина Е.В., Войтов Г.А., Демин Н.В., Тутаева Н.А., Чешико А.Л., Семенов Г.С. Изотопы урана в кимберлитовом магматизме Восточной Сибири // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245, № 4. С. 946–950.

19. Киселев Г.П. Четные изотопы урана в геосфере. Екатеринбург, 1999. 220 с.

References

1. Stogniy V.V., Korotkov Yu.V. *Poisk kimberlitovykh tel metodom perekhodnykh protsessov* [The Search of the Kimberlite Bodies by Transients]. Novosibirsk, 2010. 121 p.

2. Babayants P.S., Blokh Yu.I., Zubov E.I., Lavrova T.Yu., Trusov A.A. Interpretatsiya aerogeofizicheskikh dannykh pri poiskakh mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh [Interpretation of the Airborne Geophysical Data in the Search for Solid Mineral Deposits]. *Razvedka i okhrana neдр* [Prospect and Protection of Mineral Resources], 2006, no. 5, pp. 18–26.

3. Vasil'ev I.D. *Geologicheskie struktury v okolotrubochnom prostranstve trubki Arkhangel'skaya i ikh ispol'zovanie dlya poiskov korennykh mestorozhdeniy almazov v Zimneberezhnom rayone*: dis. ... kand. geol.-miner. nauk [The Geological Structures in the Contact Zone of the Arkhangelsk Pipe and Their Use for Prospecting of Primary Diamond Deposits in the Zimneberezhnoy District: Cand. Geol. and Miner. Sci. Diss.]. Moscow, 2010.

4. Verzhak V.V., Minchenko G.V., Larchenko V.A., Sotnikov V.I., Gunin A.P. Opyt poiskov mestorozhdeniy almazov v Arkhangel'skoy almazonosnoy provintsii i na sopredel'nykh territoriyakh severa Vostochno-Evropeyskoy platformy [The Experience in Diamond Deposits Searching in the Arkhangelsk Diamond Province and Adjacent Areas of the North of the East European Platform]. *Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdeniy almazov na zakrytykh territoriyakh: materialy konf., posvyashch. 40-letiyu YaNIGP TsNIGRI AK "ALROSA"* [Problems of Forecasting and Searching of Diamond Deposits in Covered Spaces: Proc. Conf., Devoted to the 40th Anniversary of the Yakut Research Geological Exploration Company of Central Research Institute of Geological Survey ALROSA JSC]. Yakutsk, 2008, pp. 308–314.

5. Ignatov P.A., Bolonin A.V., Vasil'ev I.D., Shmonov A.M., Fomin A.A., Kim V. Skladchatye i razryvnye deformatsii vo vmeshchayushchikh i perekryvayushchikh tolshchakh v kar'ere kimberlitovoy trubki Arkhangel'skaya [Fold and Ruptural Deformations in the Host and Overlying Strata in the Open-Pit Mining of the Arkhangelsk Kimberlite Pipe]. *Rudy i metally*, 2012, no. 1, pp. 42–48.

6. Yakovlev E.Yu., Kiselev G.P., Druzhinin S.V. Osobennosti raspredeleniya radioaktivnykh elementov v porodakh kimberlitovoy trubki Arkhangel'skaya (mestorozhdenie im. M.V. Lomonosova) [Features of Distribution of Radioactive Elements in the Rocks of the Arkhangelsk Kimberlite Pipe (the Lomonosov Diamond Deposit)]. *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: materialy 5-y Rossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy shkoly s mezhdunarodnym uchastiem* [New Development in the Processes Knowledge of Ore Formation: Proc. the 5th Russian Youth Sci. and Prac. School with Int. Participation]. Moscow, 2015, pp. 289–291.

7. Kiselev G.P. *Prognoz mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh i zagryazneniya geologicheskoy sredy uran-izotopnymi metodami*: dis. ... dok. geol.-miner. nauk [The Forecast of Mineral Deposits and Contamination of the Geological Environment by the Uranium-Isotope Methods: Dr. Geol. and Miner. Sci. Diss.]. Arkhangelsk, 2005.

8. Bogatkov O.A., Garanin V.K., Kononova V.A., Kudryavtseva G.P., Vasil'eva E.R., Verzhak V.V., Verichev E.M. Parsadanyan K.S., Posukhova T.V. *Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya (Geologiya, petrografiya, geokhimiya i mineralogiya)* [Arkhangelsk Diamond Province (Geology, Petrography, Geochemistry and Mineralogy)]. Moscow, 1999. 524 p.

9. Verzhak V.V. *Geologicheskoe stroenie, veshchestvennyy sostav, usloviya obrazovaniya i metodika razvedki mestorozhdeniya almazov im. M.V. Lomonosova*: dis. ... kand. geol.-miner. nauk [The Geological Structure, Material Composition, Formation Conditions and Exploration Methodology of the Lomonosov Diamond Deposit: Cand. Geol. and Miner. Sci. Diss.]. Moscow, 2001.

10. Ahrens L.H., Cherry R.D., Erlank A.J. Observation on the Th–U Relationship in Zircons from Granitic Rocks and from Kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, no. 31, pp. 2379–2387.
11. Lutts B.G., Mineeva I.G. Uranium and Thorium in Kimberlites of Siberia. *Geochemistry International*, 1973, no. 11, pp. 1721–1724.
12. Zverev V.L., Semenov G.S., Spiridonov A.I., Cheshko A.L. Razdelenie izotopov urana v protsesse kimberlitovogo magmatizma [The Separation of Uranium Isotopes in the Process of Kimberlite Magmatism]. *Geokhimiya* [Geochemistry International], 1976, no. 12, pp. 1884–1886.
13. Paul D.K., Gale N.H., Harris P.G. Uranium and Thorium Abundances in Indian Kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1977, no. 41(2), pp. 335–339.
14. Mwenifumbo C.J., Kjarsgaard B.A. Gamma-Ray Logging and Radioelement Distribution in the Fort à la Sorne Kimberlite Pipe 169. *Exploration and Mining Geology*, 1999, no. 8(12), pp. 137–147.
15. Lapin A.V., Tolstov A.V. O geokhimicheskikh tipakh kimberlitov [On the Geochemical Types of Kimberlites]. *Shchelochnoy magmatizm i ego rudonosnost'* [Alkaline Magmatism and Ore Content]. Kiev, 2007, pp. 139–142.
16. Belov S.V., Burmistrov A.A., Zinchuk N.N., Lapin A.V., Tolstov A.V., Frolov A.A. *Karbonatity i kimberlity (vzaimootnosheniya, minerageniya, prognoz)* [Carbonatites and Kimberlites (Relationship, Minerageny, Forecast)]. Moscow, 2005. 540 p.
17. Titaeva N.A. *Geokhimiya prirodnikh radioaktivnykh ryadov raspada* [Geochemistry of Natural Radioactive Decay Series]. Moscow, 2005. 226 p.
18. Zverev V.L., Kravtsov A.I., Ilupin I.P., Pryakhina E.V., Voytov G.A., Demin N.V., Titaeva N.A., Cheshko A.L., Semenov G.S. Izotopy urana v kimberlitovom magmatizme Vostochnoy Sibiri [Uranium Isotopes in Kimberlite Magmatism in the Eastern Siberia]. *Dokl. AN SSSR* [Report of the Academy of Sciences of the USSR], 1979, vol. 245, no. 4, pp. 946–950.
19. Kiselev G.P. *Chetnye izotopy urana v geosphere* [Even Uranium Isotopes in the Geosphere]. Yekaterinburg, 1999. 220 p.

doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.1.19

Yakovlev Evgeniy Yur'evich

Institute of Ecological Problems of the North,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation;
e-mail: yakovlev_eu@inbox.ru

Kiselev Georgiy Petrovich

Institute of Ecological Problems of the North,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation;
e-mail: kiselevgp@yandex.ru

Druzhinin Sergey Valerievich

Institute of Ecological Problems of the North,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation;
e-mail: druzhininserg@yandex.ru

NON-EQUILIBRIUM URANIUM IN KIMBERLITES AND HOST ROCKS OF THE PIONERSKAYA PIPE OF THE M.V. LOMONOSOV DEPOSIT

The currently problems in the use of traditional methods of forecasting and prospecting of diamond deposits in Arkhangelsk region, associated with a contrast reduction of allocated anomalies, necessitate to find other approaches to solve these problems. The identification of the wallrock alteration features of host sediments in core of exploration wells is actively developed in recent years. These host sediments

are related to the impact of kimberlites, such as tectonic deformation, near-contact rock alteration, increased concentrations of radiation defects. An increase in intensity of rocks gamma radiation, concentrations of a number of radioactive elements such as uranium-238, thorium-232, potassium-40, and an increase of non-equilibrium of even uranium isotopes activities, which is the tracer interaction of ore matter and host sediments are also observed in the contact zone. In this regard, the study of the characteristics of the uranium isotopes fractionation in the solid phase of the near-contact zone on the example of a number of kimberlite pipes of the Lomonosov deposit comes at an opportune time. We studied the isotopic composition of uranium in kimberlites and host sediments of the Pionerskaya pipe of the Zolotitsa field of Arkhangelsk diamond province. The equilibrium isotopic composition of uranium in the diatreme kimberlites and host sediments remoted from the pipe is preferably retained. At the same time, the increase in the non-equilibrium of alpha activity of the uranium isotope pair in the solid phase of rocks in the near-contact zone of kimberlite is marked. This is a consequence of the interaction of kimberlite matter and host sediments, leading to the fractionation of even uranium isotopes.

Keywords: *uranium isotopes fractionation, kimberlites, host sediments, contact zone, alpha activity, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, Arkhangelsk diamond province.*