

УДК 550.83:553.81+550.423:546.79

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ И СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ ЧИДВИНСКАЯ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

© 2016 Г.П. Киселев, К.Б. Данилов, Е.Ю. Яковлев, С.В. Дружинин

*Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск, 163000;
e-mail: kiselevgp@yandex.ru*

На кимберлитовой алмазоносной трубке Чидвинская Архангельской алмазоносной провинции выполнены наземные геофизические исследования методами высокоточной гамма-спектрометрической съемки, эманационной съемки и микросейсмического зондирования. Показано, что трубка проявляется в виде высокоскоростного тела, а вмещающая среда является низкоскоростной, что характерно для горных пород с повышенной трещиноватостью. Показано, что повышенные значения гамма-излучения верхних горизонтов приурочены к контуру трубки и превышают фоновые значения в 2–4 раза. Установлено, что объемная активность радона в почвенном воздухе образует аномальные концентрации на границах трубки, что согласуется с данными микросейсмического зондирования, указывающими на развитие в приконтактной области газопроницаемых зон с повышенной трещиноватостью.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, радон, микросейсм, трубка Чидвинская, Архангельская алмазоносная провинция.

ВВЕДЕНИЕ

С момента обнаружения первой кимберлитовой трубки на территории Архангельской алмазоносной провинции (ААП) для целей поисков новых кимберлитовых тел было опробовано множество традиционных геофизических методов, но наибольшую эффективность среди них продемонстрировали аэромагнитные методы (Бабаянц и др., 2006; Контарович, Цыганов, 2000; Цыганов, Контарович, 2004). Однако, на сегодняшний день, назревающий кризис в эффективности использования магниторазведки для поиска кимберлитовых тел все больше отражается на результатах поисков. Так, если в начале 80-х годов прошлого столетия эффективность заправки магнитных аномалий составляла 20%; в конце 80-х годов — 12.5%; в 90-е годы она составила уже менее 1% (Коротков, 2011). В наши дни для территории ААП этот показатель составляет менее чем 0.5% (Стогний, Коротков, 2010). Это связано с тем, что контрастность аномалий, выделяемых по результатам магниторазведки, приближается к уровню геологических помех не связанных

с кимберлитовыми телами. В связи с этим важной задачей выступает разработка новых подходов к решению проблемы поисков и прогнозирования кимберлитовых тел.

К одним из таких подходов можно отнести использование комплекса наземных геофизических методов, включающих в себя метод микросейсмического зондирования (ММЗ), высокоточную гамма-спектрометрию и эманационную съемку, поисковые возможности которых были продемонстрированы в результате опытно-методических работ на примере кимберлитовых трубок АПП (Данилов, 2011; Яковлев и др., 2015). По данным метода ММЗ трубки взрыва проявляются в поле микросейсм в виде вертикальных зон со значениями относительной микросейсмической интенсивности > 5 дБ. Трубки взрыва сопровождаются вертикальными разрывными нарушениями с более высокими значениями относительной интенсивности микросейсм (Данилов, 2011). Гамма-спектрометрические исследования широко применяются для поисков рудных месторождений полезных ископаемых с высокой эффективностью (Суеркулов и др., 1985). Так же в результате радиометрических исследований

установлено, что в верхних горизонтах горных пород над трубками наблюдается повышенное общее гамма-излучение и увеличение концентраций ряда радиоактивных элементов. Границы трубок выделяются аномалиями эманаций радона в почвенном воздухе.

Кроме того, в результате исследований особенностей распределения радиоактивных изотопов в породах трубки Архангельская было установлено, что радиоактивные элементы концентрируются во вмещающих породах в околотрубочном пространстве, здесь же в приконтактной области наблюдается нарушение векового равновесия четных изотопов урана (Яковлев и др., 2015).

В настоящей работе объектом исследования является кимберлитовая трубка Чидвинская Чидвинско-Ижмозерского поля ААП. Данная трубка была выбрана ввиду относительно больших размеров (1810 × 580 м) и малой мощности (~9 м) перекрывающих отложений, что важно для радиометрических исследований. Линейные размеры трубки заведомо превышали разрешающую способность метода ММЗ (~0.5h, где h — глубина залегания неоднородности) (Горбатов, Цуканов, 2011), что позволяло ожидать более надежное определение глубинного строения.

Существующие данные о поисковых возможностях радиометрии и ММЗ позволяют ожидать высокую эффективность комплексирования этих геофизических методов для поисков кимберлитовых трубок ААП. Приведем краткий обзор предпосылок применения радиометрических и сейсмометрических методов для поисков коренных источников алмазов в районах развития кимберлитового магматизма.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОИСКОВ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ

Радиометрические методы. Ранее радиоактивные свойства кимберлитовых пород не рассматривались в качестве критерия при проведении поисковых работ на алмазы (Контарович, Цыганов, 2000). Согласно основополагающей работе А.А. Смылова (1974) по исследованию геохимии урана и тория в земной коре и в частности магматическом процессе, изверженные породы ультраосновного состава к которым относятся и кимберлиты, характеризуются минимальным содержанием радиоактивных элементов (по урану >1 г/т). С уменьшением содержания кремнекислоты в магматическом расплаве, резко уменьшается концентрация радиоактивных элементов. Однако с накоплением данных о содержании радиоэлементов в кимберлитах различных алмазоносных провин-

ций мира было установлено, что концентрация U и Th в них может сильно варьировать.

Первые данные по содержанию U и Th в кимберлитах были приведены в статье Л.Ш. Аренса (Ahrens et al., 1967) для африканских образцов. Затем в работе (Lutts, Mineeva, 1973) появились данные по содержанию радиоактивных элементов в породах кимберлитовых трубок Сибири. Согласно этим данным содержание радиоэлементов в кимберлитах сопоставимо с гранитами и характеризует наиболее высокими концентрациями U и Th в ряду ультраосновных пород. Содержание урана в кимберлитах Сибирской платформы закономерно возрастает от южных к северным районам: от 2.0 г/т до 8.2 г/т. В.Л. Зверевым с соавторами (Зверев и др., 1979) также установлены высокие концентрации U в породах (около 11 г/т) и Th (около 39 г/т).

В образцах кимберлитов Индии содержание U и Th было определено Д.К. Паулем с соавторами (Paul et al., 1977). Для 21 образца кимберлитов Индии был отмечен широкий разброс значений концентрации урана и тория. Содержание суммарного урана колебалось от 1.87 до 3.93 г/т, тория — от 14.02 до 60.44 г/т. Были отмечены переменность и сложность корреляционных связей U, Th, K и сделаны выводы о том, что обогащение U связано с процессами подъема кимберлитовой магмы.

Исследование естественных радиоактивных элементов гамма-спектрометрическим методом в кимберлитах и вмещающих породах района Форт де ла Корн (Канада) представлено в работе (Mwenifumbo, Kjarsgaard, 1999). На основе анализа кимберлитов и образцов вмещающих меловых отложений было показано принципиальное их отличие по содержанию K, U и Th. Показано, что кимберлиты обогащены ураном и торием и обеднены калием. Кроме того, установлено, что радиоактивность кимберлитов связана с акцессорными минералами апатита и перовскита.

Согласно работам (Лапин, Толстов, 2007; Фролов и др., 2005) кимберлиты ААП характеризуются значительно более низкими концентрациями U и Th по сравнению с известными кимберлитовыми провинциями мира. Кроме того, А.А. Фроловым с соавторами (2005) для кимберлитов ААП установлены отрицательные аномалии высокочarged редких элементов, тория, титана и низкие величины индикаторных отношений Ce/Y, Nb/Zr и Th/U. На основании этих данных, кимберлиты ААП были выделены в отдельный геохимический тип — D. Существенным является и отличие кимберлитов D-типа от кимберлитов традиционных алмазоносных районов Якутии в минеральном составе, который обуславливает их низкую магнитную восприимчивость (Лапин, Толстов, 2007), что

затрудняет применение магниторазведки для поисков кимберлитов этого типа.

Нами на примере исследования трубки Пионерская месторождения М.В. Ломоносова (Яковлев и др., 2016) были также установлены низкие концентрации U в кимберлитах около 0.4 г/т. При этом было установлено, что концентрации U снижается с увеличением глубины, что говорит о еще большей обедненности радиоактивными элементами магматического источника кимберлитов ААП. Также были отмечены аномалии изотопного состава урана во вмещающих породах приконтактной области (Яковлев и др., 2015).

Таким образом, данные по содержанию радиоэлементов в кимберлитах ААП свидетельствуют об их низкой радиоактивности. Тем не менее, известным является то, что в приконтактных зонах магматических тел накапливаются радиоактивные элементы в результате формирования восстановительных условий в околотрубном пространстве под действием щелочных флюидов (Арбузов, Рихванов, 2009; Смыслов, 1974). Магматическое тело при этом выступает в качестве геохимического барьера. В результате гамма-спектрометрических исследований нами было установлено, что и в пределах кимберлитовых тел на контакте с вмещающими породами наблюдается накопление U, Th, K (Яковлев и др., 2015). Концентрирование радиоактивных элементов в околотрубном пространстве создает вторичные ореолы рассеяния во вмещающих и перекрывающих отложениях, обуславливая их повышенную радиоактивность (Контарович, Цыганов, 2000; Цыганов, Контарович, 2004).

Аэрогамма-спектрометрические работы на территории Якутской алмазонасной провинции показали, что многие кимберлитовые трубки выделяются на фоне вмещающих отложений повышенными концентрациями тория и пониженными калия, представленными вторичными геохимическими ореолами, которые совпадают с ореолами индикаторных минералов от кимберлитов (Бабаянц и др., 2006). Радиометрические и гамма-спектрометрические съемки хорошо зарекомендовали себя при поисках коренных месторождений алмазов туффизитового типа, которые на участках с малой мощностью покровных отложений выделяются повышенной радиоактивностью (Рыбальченко и др., 2011). Высокая перспективность использования гамма-спектрометрии для обнаружения кимберлитовых тел была показана на примере алмазонасных районов Канады (Mwenifumbo, Kjarsgaard, 1999).

В период открытия первых алмазонасных трубок ААП гамма-спектрометрия в аэро-варианте применялась в комплексе с традиционными геофизическими методами, но дальнейшего

развития не получила, хотя было показано, что в благоприятных ландшафтно-геологических условиях непосредственно кимберлитовые тела выделяются аномалиями гамма-поля (Бабаянц и др., 2006). Основной причиной, осложняющей применение аэрогамма-спектрометрической съемки на территории ААП, является развитие мощной толщи перекрывающих отложений, создающей сложную картину ореолов рассеяния радиоэлементов от кимберлитов. В связи с этим, такие слабо проявленные аномалии можно зафиксировать только в прямом контакте с горной породой при наземных измерениях. Аэрогамма-спектрометрическая съемка при этом оказывается не эффективной, так как при ее проведении излучение на детектор приходит из суммарной площади радиусом более 100 м при высокой скорости пролета. Таким образом, основным направлением развития радиометрических методов поисков кимберлитовых тел на территории ААП является увеличение чувствительности гамма-съемки, которая может быть достигнута в результате перехода к наземной гамма-спектрометрии, благодаря приближению детектора к объекту исследования.

Сейсмометрические методы. Кимберлитовые трубки ввиду своих малых размеров по горизонтали и субвертикального расположения являются нетрадиционными объектами для сейсмической разведки, и применение стандартных методов отраженных волн по методике общей глубинной точки (МОВ-МОГТ) и методов преломленных волн (МПВ) для их прямых поисков неэффективно (Калинин и др., 1987). Для поисков кимберлитовых тел применяются различные методы сейсмической томографии (Романов, Колонин, 1997), а также технология высокоразрешающей сейморазведки методом многократных перекрытий (Петрашень, Рудаков, 1996). Данные методы незначительно отличаются от стандартных сейморазведочных работ и обладают присущими им ограничениями при реализации в сложных ландшафтно-геологических условиях, что влечет за собой высокие трудовые и временные затраты и снижает эффективность их применения в полном разведочно-заверочном цикле.

Применительно к трубкам взрыва ААП были опробованы различные методы активной сейморазведки (Разработка ..., 1989). По результатам этих работ были выделены две группы критериев трубок: волновые и структурные. К волновой группе были отнесены динамические и кинематические эффекты, а к структурной — особенности вмещающей среды, обусловленные процессом образования кимберлитовых диатрем.

К основным поисковыми критериям волновой группы при интерпретации сейсмических данных были отнесены:

- образование зоны тени;
- увеличение интенсивности низкочастотных компонент, сужение полосы частот и нарушение когерентности спектров;
- локальные аномалии времен прихода отраженных и преломленных волн;
- локальное прекращение корреляции мелких горизонтов во вмещающих породах.

К структурным поисковым критериям была отнесена приуроченность трубок взрыва к разломным зонам. Эти зоны, как правило, являются сложно-построенными, широкими (до 2-3 км), протяженными и представляют собой структуры растяжений.

При поисковых работах с использованием активной сейсморазведки возникает ряд трудностей. Так, по волновой группе признаков в одинаковой степени могут быть обнаружены как трубки взрыва, так и палеодолины. Выделение кимберлитовых тел по структурным критериям осложняется линейными размерами трубок взрыва. Кроме того, существует и методические затруднения, заключающиеся в том, что большинство методов активной сейсморазведки нацелены на выделение горизонтальных границ в земной коре. Трубки взрыва напротив, имеют вертикальное строение, что существенно снижает эффективность поисковых работ традиционными сейсмическими методами.

Развиваемый в последние годы метод ММЗ, в отличие от традиционных сейсмических методов, практически не позволяет определять горизонтальные границы и при этом, позволяет с хорошим разрешением выделять вертикальные и субвертикальные границы скоростных неоднородностей. Согласно работе (Горбатиков, Цуканов, 2011) метод ММЗ основан на свойстве фундаментальной моды волн Релея возрастать в окрестности низкоскоростных неоднородностей геологической среды и убывать в окрестности высокоскоростных. При этом неоднородность может находиться на некоторой глубине, а соответствующие вариации микросейсм могут быть зарегистрированы на поверхности Земли.

Проведенные натурные исследования показали, что метод ММЗ позволяет исследовать строение трубок взрыва на глубинах от 50 м до нескольких километров (Горбатиков и др., 2009; Данилов, 2011; Попов и др., 2013).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Трубка Чидвинская входит в состав Чидвинско-Ижмозерского кимберлитового поля

расположенного в 30 км к северо-востоку от г. Архангельска (рис. 1) и насчитывающего в своем составе шесть трубок, образующих цепочку длиной 20 км с направлением на север-северо-восток (Еременко, 2004а, 2004б).

По своим размерам трубка Чидвинская относится к весьма крупным (1810 × 580 м) и в плане имеет неправильную гантелеобразную форму. Трубка обладает убогой алмазонасностью и промышленного значения не имеет. Однако небольшой объем опробования ставит под сомнение достоверность количественной оценки содержания алмазов в трубке Чидвинская, поэтому перспективы перевода трубки в категорию с промышленной алмазонасностью остаются (Ларченко и др., 2004).

Комплекс перекрывающих пород представлен четвертичными рыхлыми отложениями, выполненными в основном песками, суглинками, торфом и песчано-галечными образованиями. Мощность перекрывающих отложений варьирует от 1.5 м в северной и до 35.3 м в южной частях трубки. Средняя мощность четвертичных отложений 9.4 м.

В вертикальном разрезе трубка Чидвинская представляет собой двухкорневую диатрему с общим раструбом в приповерхностной части. Верхнюю часть трубки выполняют образования кратерной фации и разделяются на две пачки, верхнюю и нижнюю суммарной мощностью 123.5 м (Еременко, 2004).

Верхняя пачка сложена туфогенно-осадочными породами, представленными разнозернистыми песчаниками с примесью магматического материала, туфопесчаниками, туффитами и туфами. Нижняя пачка распространена в северной части трубки и выполнена туффитами с редкими прослоями туфов и туфопесчаников.

Жерловая фация сложена автолитовыми брекчиями, туфо- и ксенотуфобрекчиями, которые формируют два рудных столба. Граница между ними проводится в средней части зоны пережима. Положение двух столбов в плане отвечает северному и южному раздувам трубки.

Контакты между породами жерловой части и вмещающими отложениями довольно четкие, практически всегда наблюдаются зоны эндо- и экзоконтактов мощностью до 10 м.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования особенностей геофизических полей в районе трубки Чидвинская проводились с помощью наземной гамма-спектрометрической съемки, профильной эманационной съемки, а также метода ММЗ.

Гамма-спектрометрическая съемка. Наземные гамма-спектрометрические исследования

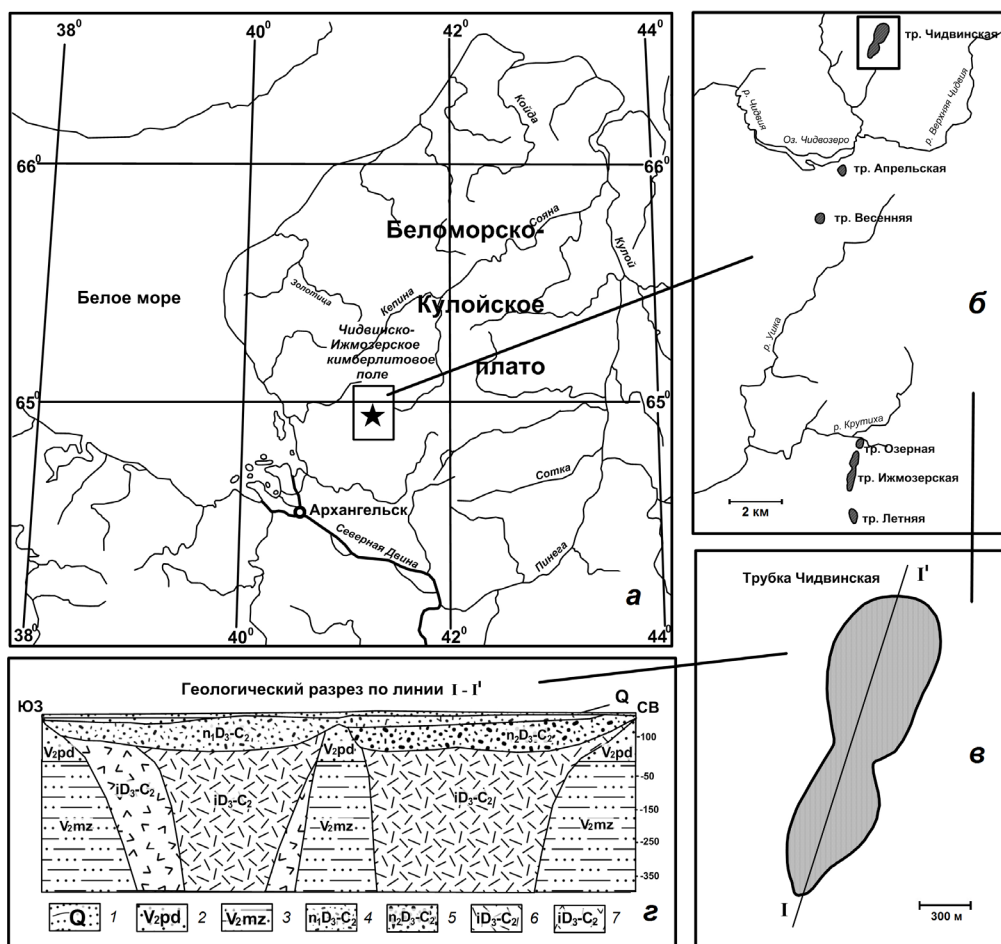


Рис. 1. Расположение трубок взрыва Чидвинско-Ижмозерского кимберлитового поля (а, б) и строение трубки Чидвинской (в, з), разрез по А.В. Еременко (2004): 1 — четвертичные отложения (супеси, суглинки, пески, глины); 2 — падушская свита венда (песчаники, аргиллиты, алевролиты); 3 — мезенская свита венда (алевролиты, аргиллиты, песчаники); 4 — верхняя пачка кратерной фации (туфопесчаники с прослоями туфов и туффитов); 5 — нижняя пачка кратерной фации (туффиты с прослоями туфов); 6 — автолитовые брекчии жерловой фации; 7 — ксенотуфобрекчии жерловой фации.

в районе трубки Чидвинской выполнялись в пешеходном варианте с использованием высокоточного мобильного сцинтилляционного гамма-спектрометрического комплекса RS-700 (Канада). Комплекс RS-700 имеет усовершенствованный цифровой спектрометр (ADS) с высоким разрешением (1024 канала), позволяющий в режиме реального времени выполнять измерения общей радиоактивности местности в срс, а так же раздельного измерения концентрации суммарного урана (ppm), тория (ppm) и калия (%). Комплекс оборудован встроенным GPS-приемником, позволяющим осуществлять точную привязку каждого измерения. В комплексе используется программное обеспечение RAD Assist, благодаря которому возможно проводить обработку данных непосредственно в полевых условиях.

Маршрутная съемка проводилась по относительно равномерной сети с шагом 50–100 м. Измерения выполнялись на высоте 1.2 м над поверхностью земли. В общей сложности, в ходе

гамма-спектрометрической съемки в районе трубки Чидвинская комплексом RS-700 было отработано более 16 800 точек измерений по каждому из определяемых параметров. Для построения изолиний распределения гамма-спектрометрических показателей использовалась программа ГИС — Golden Software Surfer 9. Интерполяция исходных данных выполнялась методом Кригинга (Kriging), позволяющим минимизировать дисперсию ошибки измерения, являющейся функцией от измеряемых весов. Минимизация дисперсии уменьшает среднюю квадратическую ошибку отклонения оцененного значения от возможного (Силкин, 2008).

Эманиационная съемка. Измерения объемной активности радона (ОАР) в почвенном воздухе на трубке Чидвинской проводились автоматизированным радиометром радона PPA-01M-03 по профилю, пересекающему северный столб трубки в направлении северо-запад — юго-восток. 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. Измерения ОАР выполнялись в 16 точках наблюдения, расположенных относительно равномерно друг от друга на расстоянии ~70 м по всем элементам профиля.

Для измерения ОАР в почвенном воздухе проводилось бурение шурфов мотобуром на глубину 0.5–0.7 м и диаметром 0.2 м. На взрыхленное дно шурфа устанавливался газоприемник, который присыпался грунтом и уплотнялся, дальнейшее измерение проводилось согласно методики (Методика..., 2006).

Микросейсмическое зондирование. Замеры микросейсм проводились по профилю, пересекающему северный столб трубки Чидвинская. В центральной части профиль ММЗ совпадал с маршрутом эманационной съемки (рис. 2).

Согласно работе (Горбатиков и др., 2008) последовательные замеры микросейсм производились одновременно передвигной и опорной станциями. Профиль ММЗ состоял из 19 пунктов измерений микросейсм. Общая длина профиля составила 1414 м. Длительность измерений в каждом пункте составляла 2 часа, шаг между пунктами 50–150 м. Для измерения микросейсм

использовалась сейсмическая аппаратура производства Gularp (Великобритания).

При обработке первоначально рассчитывались спектры мощности для каждого пункта замеров по данным передвигной и опорной станциям. По полученным значениям для каждого пункта замеров (i) на каждой рассматриваемой частоте (f) рассчитывалась относительная интенсивность микросейсм по формуле:

$$I_{fi} = 20 \lg \frac{A_{fi}^p}{A_{fi}^o},$$

где A_{fi}^p, A_{fi}^o — спектральные амплитуды на частоте (f) по записи в i -м пункте соответственно передвигной и опорной станций.

На следующем этапе производился пересчет частот (f) в соответствующие глубины (h) по формуле $h(f) = K V_r(f)/f$, где $h(f)$ — глубина слоя зондируемого сигналом на частоте f , $V_r(f)$ — фазовая скорость волны; K — численный коэффициент, приблизительно равный 0.4–0.5.

Таким образом, был получен набор значений относительной интенсивности микросейсм I_{hi} . Результатом обработки являлась диаграмма

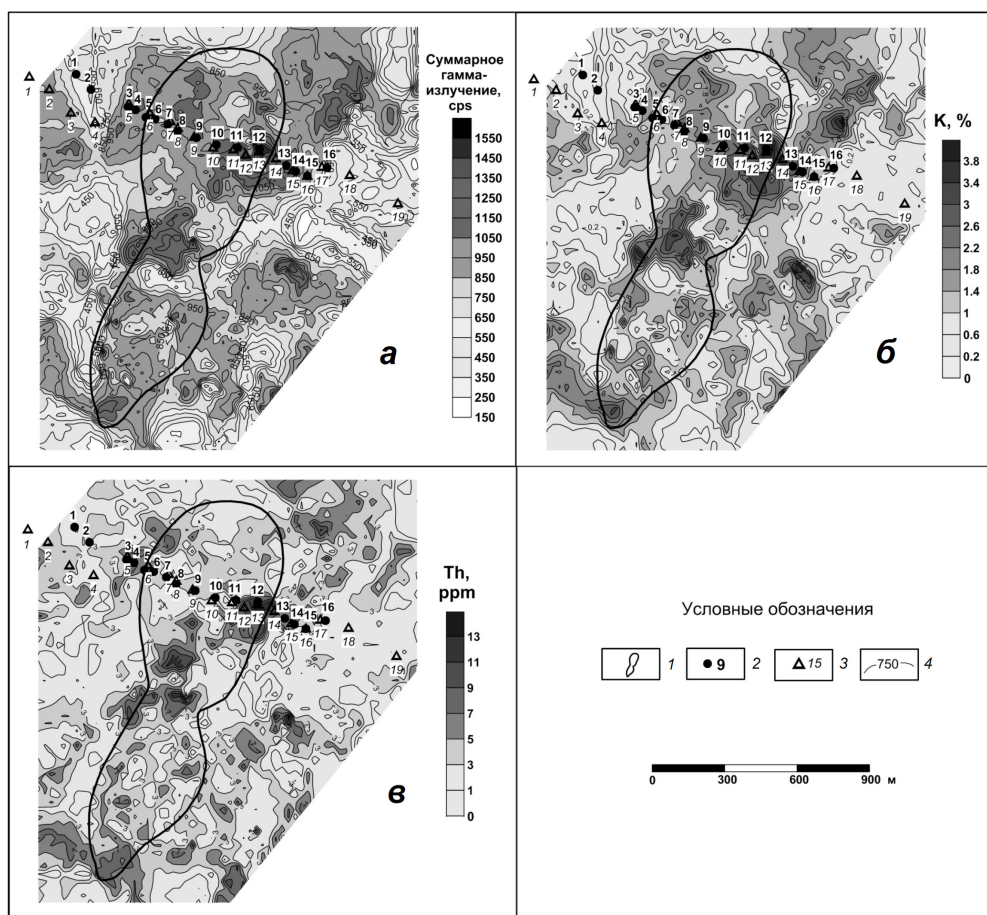


Рис. 2. Распределение суммарной гамма-активности (а), калия (б) и тория (в) в районе трубки Чидвинская: 1 — контур трубки Чидвинская; 2 — точки измерения ОАР в почвенном воздухе; 3 — точки измерения микросейсм; 4 — изолинии радиометрических показателей.

распределения относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля и по глубине (I_{hi}). Данное распределение отражает относительное изменение скоростных свойств в среде. Зоны с пониженной интенсивностью микросейсм определяют участки с повышенными скоростными свойствами, а зоны с повышенной интенсивностью — участки пониженных скоростей (Горбатилов и др., 2008; Горбатилов, Цуканов, 2011).

Записи микросейсм обрабатывались по методике ММЗ в программном комплексе ДАК (Попов и др., 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано на рис. 2а, общая радиоактивность пород изменяется в широких пределах от 172 до 1585 ср. Распределение повышенных значений гамма-поля имеет несколько более широкую конфигурацию, чем контур трубки. Наиболее контрастный и большой по площади участок повышенных значений гамма-поля приурочен к северной части трубки Чидвинская и локализован в пределах северного столба, где мощность перекрывающих четвертичных отложений минимальна и составляет около 1.5 метров. Здесь значения суммарной радиоактивности достигают более 1500 ср.

Пространственное распределение повышенных значений общего гамма-излучения верхних горизонтов в районе трубки Чидвинской образует линейную аномалию северо-восточного простираения, выходящую на пределы контура трубки. За пределами этой области средние значения радиоактивного фона составляют порядка 800–900 ср. Содержание калия в районе трубки Чидвинской колеблется в диапазоне от менее 0.3 до 3.8 % (рис. 2б). Пространственная картина распределения содержания 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 (рис. 2в). Максимальные значения тория локализованы на небольших по площади участках и 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, можно отметить, что 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 Чидвинской.

Значения ОАР в почвенном воздухе по профилю, пересекающему северный столб трубки Чидвинская изменяются в пределах 114–1312 Бк/м³ (рис. 2, 3а). Значения ОАР по профилю изменяются с определенной закономерностью. В пределах контура трубки вариации ОАР незначительны от 185 до 312 Бк/м³. На границах трубки Чидвинская 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 ²²²Rn 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 вмещающими породами развиты трещиноватые разломные зоны с повышенной газопроницаемостью, приводящие к образованию наблюдаемых аномальных концентраций ОАР в почвенном воздухе.

Для расчетов обработки данных ММЗ привлекались значения, взятые со скоростной модели трубок взрыва месторождения им. М.В. Ломоносова (Кутинов, Чистова, 2004). По данным работы (Кутинов, Чистова, 2004) скоростные свойства среды в районе Чидвинско-Ижмозерского кимберлитового поля и месторождения им. М.В. Ломоносова являются близкими. На рис. 3 показано, что в центре профиля выделяется высокоскоростное трубчатое тело под пунктами наблюдения 6–15. Выделенная высокоскоростная зона в целом совпадает с известными границами исследуемой трубки взрыва. В восточной части высокоскоростная зона оказалась несколько шире известной границы трубки по геологоразведочным данным. Наблюдаемое различие может быть объяснено либо разрешающей способностью метода, либо развитием во вмещающих породах экзоконтактового метаморфизма с высокоскоростными свойствами. Также возможно наличие локального раздува трубки в восточном борту.

Наблюдаемое трубчатое тело сужается с глубиной и уверенно прослеживается до глубин 1 км. Борты трубчатого тела практически вертикальные. Выделяемое тело можно разбить на два блока, с повышенными (восточный блок) и пониженными (западный блок) скоростными свойствами. По относительной интенсивности микросейсм блоки различаются на 3–5 дБ, что

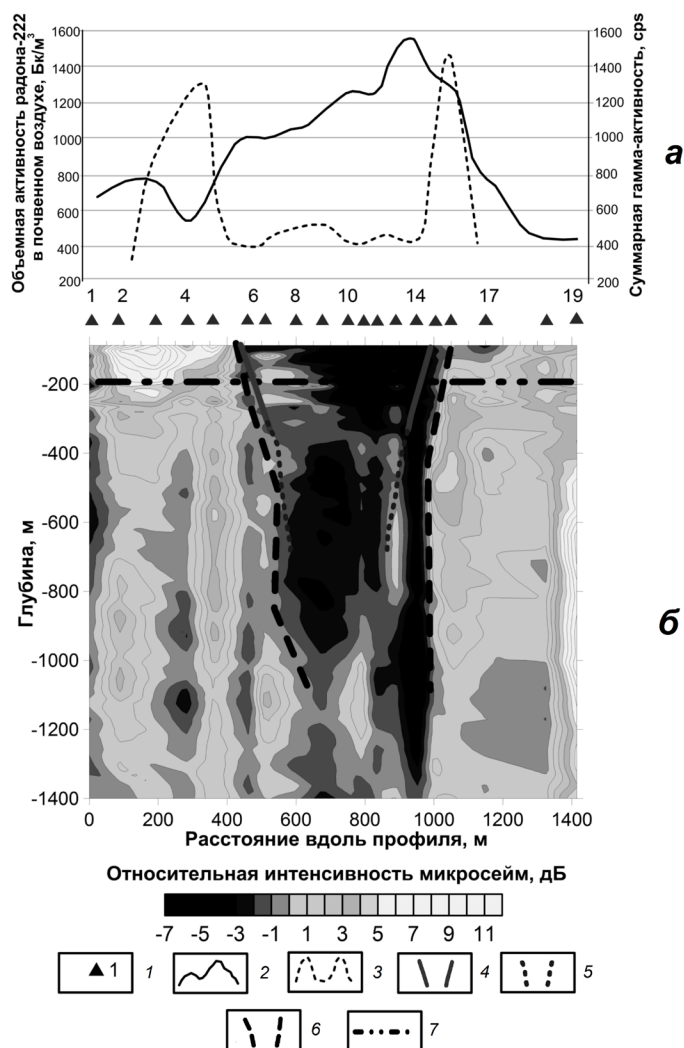


Рис. 3. Радиометрические показатели вдоль профиля, пересекающего трубку Чидвинская (а), и глубинный разрез распределений относительной интенсивности микросейсм (б): 1 — точки измерений микросейсм; 2 — кривая изменения суммарной интенсивности гамма-излучения, cps; 3 — кривая изменения ОАР в почвенном 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.

согласно работе (Gorbatikov et al., 2013) может быть обусловлено изменением скоростных свойств на 30–50%. Граница, разделяющая западный и восточный блоки, имеет наклон примерно 45° на глубинах до 400 м. Глубже 400 м все границы трубчатого тела практически вертикальные.

Трубчатое тело ограничено с запада и востока контрастными вертикальными зонами с низкоскоростными свойствами, которые вероятно обусловлены разрывными нарушениями. Данные разрывные нарушения прослеживаются на глубинах 200–1000 м под пунктами наблюдения 5, 15 и 16. Также вертикальные низкоскоростные зоны наблюдаются и на удалении от трубчатого тела на 300–400 м к западу и востоку. Наблюдаемые низкоскоростные зоны обладают высокой разрешающей способностью. Так, на глубине 800 м низкоскоростные зоны имеют

ширину 100 м, что существенно меньше стандартной величины разрешающей способности ММЗ, ориентировочно равной половине глубины залегания неоднородности (Горбатиков, Цуканов, 2011). Данное явление согласно работе (Gorbatikov et al., 2013) может объясняться раздробленным составом среды. Учитывая последнее можно более уверенно интерпретировать наблюдаемые линейные низкоскоростные контрастные зоны как разрывные нарушения.

Разрывные нарушения на глубинах более 1000 м не выделяются. В верхней части разреза на глубинах менее 200 м разломные зоны могут принимать более локализованную в пространстве форму и иметь меньший контраст относительно вмещающей среды. Наиболее контрастная разломная зона, наблюдается в пунктах 18–19 и выделяется на всех исследуемых глубинах, имея смещение к западу на глубине 200 м.

В приповерхностной области наиболее низкоскоростное тело наблюдается на глубинах от 40 до 200 м под пунктами 2–5 и имеет конусообразное строение.

Согласованное изменение углов наклона и контрастности выделенных зон происходит на глубине примерно 200 м, которая соответствует границе падунской и мезенской свит верхнего венда.

При сопоставлении результатов полученных различными геофизическими методами наблюдается согласованное изменение параметров. По радиометрическим и сейсмометрическим данным трубка Чидвинская обладает характерными чертами:

- увеличение суммарной интенсивности гамма-поля в пределах контура кимберлитовой трубки;

- формирование аномалий ОАР в приконтактовой области;

- высокоскоростные свойства алмазонасных автолитовых брекчий и ксенотуфобрекчий, слагающих трубочное тело.

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. При этом наблюдается уменьшение суммарного гамма-излучения от западного к восточному блоку трубочного тела в 1.5 раза. Столь значимые изменения суммарной интенсивности гамма-излучения и скоростных свойств среды, могут косвенно свидетельствовать о различном вещественном составе западного и восточного блоков трубки. Данное различие может указывать либо на разные фазы внедрения, либо на то, что выделяемые блоки подвергались разнообразным вторичным (физическим, метаморфическим, эрозийным) процессам после образования кимберлитовой трубки.

Аномальные концентрации радона, наблюдаемые нами на границах трубки Чидвинской, соответствуют контрастным линейным низкоскоростным зонам. По выделенным разломным структурам, по всей видимости, происходит миграция радона и возможно других глубинных газов. Высокоскоростной характер трубочного тела указывает на его консолидированное строение, обуславливающее меньшую конвективную составляющую в миграции радона и как следствие наблюдаемые низкие значения ОАР в пределах данной области.

Таким образом, по данным ММЗ уверенно выделяются основные элементы глубинного строения трубки взрыва и вмещающей среды, которые отражаются на формировании радиометрических показателей на дневной поверхности.

Полученные результаты позволяют утверждать об эффективности предложенного комплекса методов при дальнейших исследованиях кимберлитовых трубок.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных радиометрических и сейсмометрических исследований, включающих гамма-спектрометрию, радоновую съемку и метод микросейсмического зондирования в районе трубки Чидвинская Чидвинско-Ижмозерского кимберлитового поля АПП сводятся к следующему:

Методом наземной гамма-спектрометрической съемки установлено, что трубка Чидвинская на фоне вмещающих отложений выделяется повышенными значениями суммарной интенсивности гамма-излучения, а также повышенным содержанием калия, особенно в северной части с минимальной мощностью перекрывающих четвертичных отложений.

Аномальные концентрации радона, фиксируемые по бортам трубки, вероятно, обусловлены зоной дробления горных пород вокруг трубки, которые проявляются в виде контрастных низкоскоростных зон по данным ММЗ.

Методом ММЗ произведено уточнение глубинного строения трубки и вмещающей среды. Трубка Чидвинская проявляется в виде высокоскоростного тела.

Получено экспериментальное доказательство того, что трубка взрыва проявляется по результатам радиометрических исследований и ММЗ. Согласованность полученных результатов друг с другом и с известной геолого-геофизической информацией говорит о возможности данного комплекса методов при изучении пространственного строения кимберлитовых трубок.

Работа выполнена в рамках ФНИР №АААА-А16-116052710106-8 «Радиоизотопные исследования природных и техногенных процессов трансформации окружающей среды Европейского Севера».

Список литературы

- Арбузов С.И., Рихванов Л.П.* Геохимия радиоактивных элементов. Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического института, 2009. 315 с.
- 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.

- Горбати́ков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е.* Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование с помощью микросейсм // *Физика Земли*. 2008. № 7. С. 66–84.
- Горбати́ков А.В., Цуканов А.А.* Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. 2011. № 4. С. 96–112.
- Данилов К.Б.* Применение метода микросейсмического зондирования для изучения трубки взрыва им. М.В. Ломоносова (Архангельская алмазоносная провинция) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2011. № 1. Вып. 17. С. 231–237.
- Еременко А.В.* Особенности геологического строения, вещественного состава и геодинамики формирования трубок взрыва Ижмозерского поля Архангельской алмазоносной провинции. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Москва, 2004. 24 с.
- Еременко А.В.* Особенности состава хромшпинелидов трубок взрыва Ижмозерского поля Архангельской алмазоносной провинции как отражение геодинамики их формирования // *Вестник Воронежского университета. Геология*. 2004. № 1. С. 84–92.
- Зверев В.Л., Кравцов А.И., Илупин И.П. и др.* Изотопы урана в кимберлитовом магматизме Восточной Сибири // *ДАН*. 1979. Т. 245. № 4. С. 946–950.
- Калинин О.И., Литвиненко А.И., Миляев В.Л. и др.* Применение сейсморазведки при поисках кимберлитовых трубок в алмазоносных районах Якутии // *Методы разведочной геофизики. Рудная сейсморазведка*. Л.: НПО Рудгеофизика, 1987. С. 84–91.
- Контарович Р. С., Цыганов В.А.* Проблемы и перспективы развития геофизических технологий при поисках коренных месторождений алмазов. // *Геофизика*. 2000. № 4. С. 52–57.
- Коротков Ю.В.* Поиск скрытых кимберлитовых тел с использованием импульсной индуктивной электроразведки в Архангельской алмазоносной провинции. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Москва, 2011. 26 с.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, ИПП «Правда Севера», 2004. 281 с.
- Лапин А. В., Толстов А.В.* О геохимических типах кимберлитов // *Щелочной магматизм и его рудоносность*. Киев: изд-во «Логос», 2007. С. 139–142.
- 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.
- Методика экспрессного измерения объемной активности ^{222}Rn в почвенном воздухе с помощью радиометра радона типа РРА*. Москва: ЦМИИ ГП «ВНИИФТРИ». 2006. 16 с.
- Разработка и внедрение методики сейсмических исследований при поисках кимберлитовых трубок в Юго-Восточном Беломорье*. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1989. 87 с.
- Петрашень Г.И., Рудаков А.Г.* Основные проблемы метода многократных перекрытий ОГТ и технологичных методик обработки его данных // *Геофизика*. 1996. № 1. С. 3–13.
- Попов Д.В., Данилов К.Б., Жостков Р.А. и др.* Обработка цифровых записей микросейсм в программном комплексе ДАК // *Сейсмические приборы*. 2013. Т. 49. № 2. С. 44–57.
- Романов М.Е., Колонин А.Г.* Криволинейно-лучевая кинематическая и амплитудная сейсмотомография. Новосибирск: ИМ СО РАН, 1997. 40 с.
- Рыбальченко А.Я., Рыбальченко Т.М., Силаев В.И.* Теоретические основы прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов туффизитового типа // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. Вып. 1 (5). Сыктывкар. 2011. С. 54–66.
- Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 286 с.
- Силкин К.Ю.* Геоинформационная система GoldenSoftwareSurfer 8: Учебно-методическое пособие для вузов. Воронеж: изд-во Воронежского ГУ, 2008. 66 с.
- Смыслов А.А.* Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1974. 231 с.
- Сорокин В.М., Яценко А.К.* Возмущение квазистационарного электрического поля в атмосфере над сейсмоактивными районами // *Химическая физика*. Т. 19. № 6. 2000. С. 71–80.
- Стогний В.В., Коротков Ю.В.* Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Издательство «Малотиражная типография 2D», 2010. 121 с.
- Суеркулов Э.А., Осмонбетов О.К., Киселев Г.П.* Эффективность аэрогамма-спектрометрической съемки в Киргизии // *Разведка и охрана недр*. 1985. № 5. С. 57–59.
- Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В. и др.* Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз). М.: НИА-Природа, 2005. 540 с.

- Цыганов В.А., Контарович Р.С., Могилевский В.Е. и др.* Современные аэрогеофизические технологии — как основа геологических и прогнозно-минералогических карт нового поколения // Сб. научных трудов «Конгресс выпускников геологического факультета МГУ 26 мая 2004 г.» / Отв. ред. Хмелевский В. К. М.: МГУ, 2004. С 151–158.
- Яковлев Е.Ю., Киселев Г.П., Дружинин С.В.* Неравно-весный уран в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская месторождения им. М.В. Ломоносова // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия Естественные науки. № 1. 2016. С. 19–28.
- 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». М.: ИГЕМРАН, 2015. С. 289–291.
- Ahrens L.H., Cherry R.D., Erlank A.J.* Observation on the Th–U relationship in zircons from granitic rocks and from kimberlites // *GeochimCosmochimActa*, 1967. № 31. P. 2379–2387.
- Gorbatikov A.V., Montesinos F.G., Arnos J. et al.* New Features in the Subsurface Structure Model of El Hierro Island (Canaries) from Low-Frequency Microseismic Sounding: An Insight into the 2011 Seismo-Volcanic Crisis // *Surveys in Geophysics*. 2013. V. 34. № 4. P. 463–489.
- Lutt, B.G., Mineeva I.G.* Uranium and thorium in Kimberlites of Siberia // *Geochemistry International*, 1973. № 11. P. 1721–1724.
- Mwenifumbo C.J., Kjarsgaard B.A.* Gamma-ray logging and radioelement distribution in the Fort de la corne kimberlite pipe 169 // *Exploration and Mining Geology*. 1999. № 8 (12). P. 137–147.
- Paul D.K., Gale N.H., Harris P.G.* Uranium and thorium abundances in Indian kimberlites // *GeochimicaetCosmochimicaActa*. 1977. № 41 (2). P. 335–339.

RADIOMETRIC AND SEISMIC INVESTIGATION OF THE CHIDVINSKAYA KIMBERLITE PIPE (ARKHANGELSK DIAMONDIFEROUS PROVINCE)

G.P. Kiselev, K.B. Danilov, E.U. Yakovlev, S.V. Druzhinin

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, 163000

The authors studied the Chidvinskaya diamond pipe of the Arkhangelsk diamondiferous province using ground geophysical methods, which included high-precision gamma-spectrometric survey, radon emanation survey in soil air, and microseismic sounding method. The investigation revealed that the pipe appears as a high-velocity body and the host medium shows low-velocity that is typical for rocks with excessive cleavage. Increased levels of total gamma-ray radiation in the near surface layer were observed within the pipe contour; they exceeded the background values by 2–4 times. Anomalous radon emanation in the soil air were found at the pipe boundaries. The microseismic sounding revealed a gas-penetrable structure with excessive cleavage in the near-contact zone.

Keywords: gamma-spectrometric survey, radon, microseisms, Chidvinskaya pipe, Arkhangelsk diamondiferous province.