

## Работы молодых ученых

УДК 550.34

### СТРОЕНИЕ ТРУБКИ «ПИОНЕРСКАЯ» АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСА ПАССИВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

© 2017 К.Б. Данилов<sup>1</sup>, Н.Ю. Афонин<sup>1</sup>, А.И. Кошкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный Исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН,  
Архангельск, 163000; e-mail: danilov\_kostea@mail.ru

<sup>2</sup>Федеральный Исследовательский центр Единая геофизическая служба РАН,  
Архангельск, 163000

В настоящее время на территории Архангельской области разрабатываются два алмазных месторождения, и при этом существует потенциал для открытия новых. Однако, трубки взрыва являются сложным объектом для поисков. В данной статье представлены результаты исследования, направленного на выбор более эффективных методов поиска и изучения структуры трубок взрыва. С этой целью был опробован комплекс пассивных сейсмических методов. В качестве объекта исследования была выбрана трубка «Пионерская» Архангельской алмазоносной провинции. Опробованный комплекс методов включает: пассивную сейсмическую интерферометрию, метод микросейсмического зондирования и метод отношения горизонтальных компонент микросейсм к вертикальным (H/V). По результатам тестирования предлагаемого комплекса удалось уверенно выделить ряд важных границ исследуемого объекта. Последнее показывает принципиальную применимость предлагаемого комплекса методов для исследования структуры и скоростных характеристик трубок взрыва Архангельской алмазоносной провинции.

*Ключевые слова:* микросейсм, пассивные сейсмические методы, зондирование, трубки взрыва.

#### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день Архангельская алмазоносная провинция (ААП) является второй после Якутии территорией Российской Федерации с разведанными запасами коренных месторождений алмазов. На территории ААП, помимо двух коренных месторождений (им. М.В. Ломоносова и им. В.П. Гриба), известно более 50 трубок взрыва и силлов (Богатиков и др., 1999; Головин, 2003; Синицын и др., 1992) (рис 1а).

Для поиска трубок взрыва в основном применяется комплекс магниторазведочных и электроразведочных методов (Кутинов, Чистова, 2004). Однако в последнее время эффективность поисковых работ существенно снижается (Стогний, Коротков, 2010). Снижение эффективности обусловлено тем, что трубки взрыва не всегда

могут быть однозначно выделены электроразведочными и магниторазведочными методами (Кутинов, Чистова, 2004). Трудности поиска обусловлены: эрозией наиболее намагниченной кратерной части, слабой намагниченностью наиболее продуктивных пород, возможными малыми размерами трубок, наличием объектов «помех», вероятностью пропуска слабых магнитных аномалий даже при высокоточной магниторазведке, отсутствием определенных параметров, характерных именно трубкам взрыва (Кутинов, Чистова, 2004).

Перечисленные выше факты говорят о необходимости создания нового подхода к поиску трубок взрыва. По результатам обобщения геолого-геофизических данных по различным трубкам взрыва в работе Милашев (1984) сделан вывод о том, что характерным признаком всех

трубок взрыва является их строение в виде конуса обращенного вершиной вниз. Сложность использования данного параметра заключается в том, что для многих методов сложно восстановить глубинное строение трубки с достаточной детальностью. В частности, использование активных сейсмических методов оказывается нецелесообразным, в связи с высокой трудоемкостью и слабой чувствительностью к субвертикальным неоднородностям (Суворов, 1993). По результатам апробации методов сейсморазведки на трубках взрыва ААП было показано, что трубки взрыва проявлялись также как и палеодолины, что существенно снизило эффективность работ (Кутинов, Чистова, 2004). Кроме того следует учесть что многие северные территории являются заповедными. Данное обстоятельство существенно ограничивает возможные виды техногенной деятельности.

Таким образом, становится очевидным, что для поиска и исследования трубок взрыва необходимо применять методы соответствующие следующим требованиям. Во-первых, методы должны быть простые в реализации. Во-вторых, методы должны быть направлены на выявление в среде субвертикальных объектов с горизонтальными размерами меньшими глубины их залегания. В третьих, методы должны оказывать минимальное влияние на окружающую среду.

Минимизация трудоемкости и техногенного воздействия на окружающую среду и повышение информативности может быть обеспечено использованием пассивных сейсмических методов (Горбатиков и др., 2008, 2009; Данилов 2011;

Николаев, 1997; Eddy, Ekström, 2014; Lin et al., 2012). Отсутствие контролируемого источника зондирующего сигнала накладывает определенные ограничения на применимость тех или иных пассивных методов, поэтому необходимо проводить тщательную проверку конкретных методов поиска и изучения трубок взрыва.

Сформулированным требованиям соответствует комплекс пассивных сейсмических методов исследований глубинного строения, включающий: метод микросейсмического зондирования (ММЗ) (Горбатиков и др., 2008), метод пассивной сейсмической интерферометрии (Shapiro, Campillo, 2004) и метод отношения горизонтальных компонент микросейсм к вертикальным компонентам (H/V) (Nakamiga, 1989). ММЗ позволяет выделять компактные скоростные неоднородности с субвертикальными границами, что обуславливает его принципиальную применимость для исследования трубок взрыва. На практике метод ММЗ был успешно опробован на таких трубках как «Марусиновская» (республика Беларусь) (Горбатиков и др., 2009), «трубка им. М.В. Ломоносова» (ААП) (Данилов 2011; Французова, Данилов, 2016), С10 (ААП) (Попов и др., 2013) и «Чидвинская» (ААП) (Киселев и др., 2016). С помощью метода пассивной сейсмической интерферометрии можно восстановить скоростную модель, что позволяет определить скоростные характеристики и основные слои исследуемой среды (Afonin et al., 2017; Campillo, 2006; Poli et al., 2013; Shapiro, Campillo, 2004; Shapiro et al., 2005). Метод H/V направлен на выявление формы

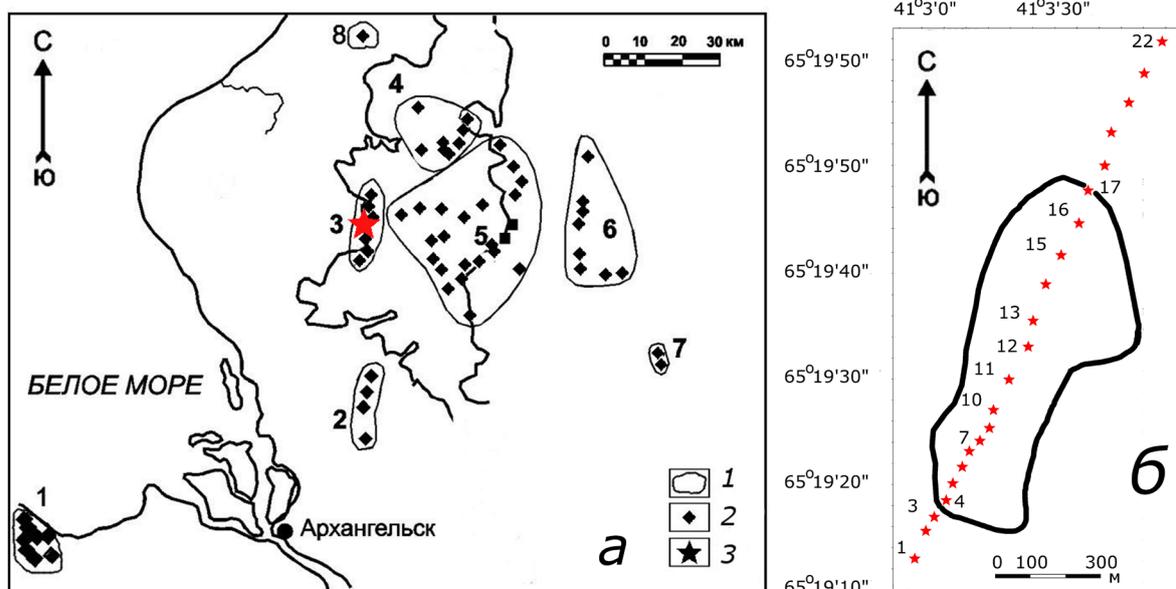


Рис. 1. Расположение трубок взрыва Архангельской алмазоносной провинции (а) и план исследуемой трубки Пионерская (Вержак и др., 1987)<sup>1</sup> с нанесенными пунктами замеров микросейсм (б).

<sup>1</sup>Вержак В.В., Медведев В.А., Веричев Е.М. и др. Отчет о результатах разведки кимберлитовых трубок месторождения им. Ломоносова в 1983-1987 гг. Архангельск: ПГО «Архангельскгеология» Беломорская геологоразведочная экспедиция, 1987. 2534 с.

контрастных горизонтальных границ в среде (Lane et al., 2008; Nakamura 1989). Таким образом, предлагаемый комплекс методов позволяет определять достаточное количество параметров, характеризующих глубинное строение.

Все перечисленные методы имеют схожую систему наблюдений при проведении полевых работ. Кроме того, современные комплексы сейсмических станций являются автономными и малогабаритными, что существенно упрощает реализацию данных методов на труднодоступных территориях.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Метод микросейсмического зондирования.

В соответствии с работой (Горбатиков, Цуканов, 2011), метод микросейсмического зондирования основан на свойстве фундаментальной моды волн Рэлея, взаимодействовать с заглубленной неоднородностью геологической среды. В окрестности низкоскоростной неоднородности, фундаментальная мода волны Рэлея увеличивает свою интенсивность и уменьшает интенсивность в окрестности высокоскоростной неоднородности среды. При этом неоднородность может находиться на некоторой глубине, а соответствующие вариации микросейсм могут быть зарегистрированы на поверхности Земли. Метод реализуется при допущении, что вертикальная компонента микросейсмического поля определяется преимущественно вкладом фундаментальной моды волн Рэлея. При этом волны Рэлея в зависимости от длины волны вовлекают в колебательное движение слои от первых метров, до сотен километров.

Технология измерений и обработки данных включает (Горбатиков и др., 2008):

- последовательные замеры микросейсм одновременно передвигной и опорной станциями;
- расчет распределения интенсивности микросейсм относительно опорной станции по профилю;
- привязка полученных значений к соответствующей глубине.

Пересчет частот в соответствующие глубины производится по формуле (Горбатиков, Цуканов, 2011):

$$H(f) = kV_r(f)/f, \quad (1)$$

где  $H(f)$  — глубина слоя, для которого строится изображение;  $V_r(f)$  — фазовая скорость волны Рэлея;  $f$  — частота в спектре микросейсмического сигнала;  $k$  — численный коэффициент, приблизительно равный 0.4–0.5.

На основе полученных спектров строится диаграмма распределения относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля и по

глубине, которое отражает наличие аномалий скоростных свойств в исследуемой среде. Зоны с пониженной интенсивностью микросейсм определяют участки с повышенными скоростными свойствами, а зоны с повышенной интенсивностью — участки пониженных скоростей (Горбатиков и др., 2008).

Для пересчета частот в глубины в работе использовалась скоростная модель трубок взрыва Зимнебережного района<sup>1</sup>.

**Пассивная сейсмическая интерферометрия.** Метод пассивной сейсмической интерферометрии, позволяет восстановить эмпирическую функцию Грина исследуемой среды из сейсмического шума (Campillo, 2006; Shapiro, Campillo, 2004; Wapenaar, Draganov, 2010). Практическая реализация данного метода, основана на расчете взаимно-корреляционных функций сейсмического шума по формуле (Wapenaar, Draganov, 2010):

$$C(r_1, r_2, \tau) = \int_{-t}^t a(r_1, t) b(r_2, t - \tau) dt, \quad (2)$$

где  $t$  — время;  $\tau$  — временной сдвиг;  $a, b$  — записи сейсмометров;  $r_1, r_2$  — координаты сейсмометров.

Согласно (Wapenaar, Draganov, 2010), взаимно-корреляционная функция приблизительно равна эмпирической функции Грина исследуемой среды:

$$C(r_1, r_2, \tau) \approx G(r_1, r_2, \tau). \quad (3)$$

Микросейсмический шум состоит в основном из поверхностных волн Рэлея (Bath, 1974). Эмпирическая функция Грина, восстановленная из такого волнового поля, представлена, преимущественно, поверхностно-волновой частью. Следовательно, по дисперсионным кривым функций Грина можно восстановить скоростной разрез поперечных сейсмических волн исследуемой среды.

**Метод H/V.** В основе данного метода лежит анализ трехкомпонентных записей сейсмического шума, направленный на выявление и оценку его резонансной частоты (Lane et al., 2008). Резонансная частота определяется посредством анализа отношения спектров горизонтальных компонент микросейсм к вертикальной. Данный метод использовался для оценки мощности осадочного чехла, картирования поверхности кристаллического фундамента, а также для выявления разломов во многих работах (Delgado et al., 2000; Ibs-von Seht, Wohlenberg, 1999; Parolai et al., 2002 и др.).

Для двухслойной модели среды, резонансная частота  $n$ -й моды, в зависимости от мощности верхнего слоя, определяется выражением (Lane et al., 2008):

$$f_m = \frac{(2n + 1)V_s}{4Z}, \quad (4)$$

где  $V_s$  — средняя скорость поперечных волн в верхнем слое;  $Z$  — мощность верхнего слоя.

В работе (Nakamura, 1989) показано, что резонансная частота фундаментальной моды может быть определена из отношения спектров горизонтальных и вертикальной компонент микросейсм:

$$f_{r0} = \sqrt{\frac{S^2(\omega)_{NS} + S^2(\omega)_{WE}}{2S^2(\omega)_V}}, \quad (5)$$

где  $S(\omega)_{NS}$ ,  $S(\omega)_{WE}$  — спектры горизонтальных компонент микросейсм;  $S(\omega)_V$  — спектр вертикальной компоненты микросейсм.

Таким образом, если известна скорость поперечных волн в верхнем слое, мощность данного слоя, согласно выражениям (4) и (5) определяется по формуле:

$$Z = \frac{V_s}{\sqrt{\frac{S^2(\omega)_{NS} + S^2(\omega)_{WE}}{2S^2(\omega)_V}}}, \quad (6)$$

Ограничением применимости данного метода является условие:

$$\rho_1 V_{s1} \leq 2\rho_2 V_{s2}, \quad (7)$$

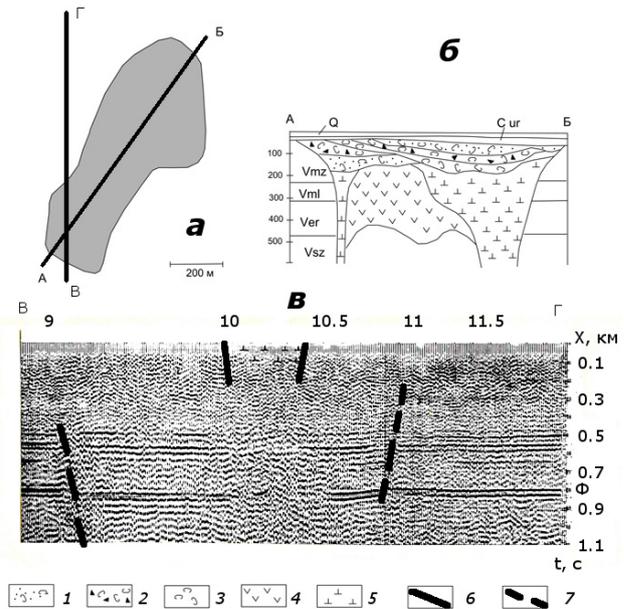
где  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  — скорости поперечных волн в первом и во втором слое;  $\rho_1, \rho_2$  — плотности в первом и втором слое соответственно. Иными словами, акустический импеданс в верхнем слое должен быть как минимум в два раза ниже, чем в нижнем слое.

### ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ

Трубка «Пионерская» входит в состав месторождения им. М.В. Ломоносова и является самой крупной из промышленно алмазоносных трубок Золотицкого поля (Стогний, Коротков, 2010). Размеры трубки «Пионерская» составляют около 1000×500 м (рис. 1). В вертикальном разрезе трубка представляет собой две сближенные трубки с общим раструбом и относится к двухкорневым диатремам (рис 2).

Над трубкой Пионерская первоначально образовалась туфогенно-осадочная толща над южным подводящим каналом (Ларченко и др., 2004). Позднее, при образовании северного подводящего канала, она была прорвана при взрыве. Образовавшийся кратер был выполнен более поздней туфогенно-осадочной толщей.

Жерловую фацию трубки заполняют автолитовые брекчии, ксенотуфобрекчии и порфиоровые разности пород, слагающие отдельные рудные столбы. Вмещающая песчано-глинистая толща верхнего венда представлена отложениями



**Рис. 2.** Геологическое строение трубки Пионерская (Вержак, Гаранин, 2005) (а, б) и ее отображение по данным МОГТ (Вержак и др., 1987)<sup>1</sup> (в); 1–3 — кратерная фация: 1 — туфогенно-осадочная толща сложенная преимущественно туфопесчаниками с прослоями туфоалевролитов, 2 — туфобрекчии вмещающих пород, 3 — туфогенная толща, песчаные туфы; 4–5 — жерловая фация: 4 — лито-кристаллокластический туффизитовые брекчии (туфо- и ксенотуфобрекчии) I-ой фазы внедрения, 5 — автолитовый туффизитовые брекчии II-ой фазы внедрения; 6 — зона потери корреляции в пределах трубки Пионерская; 7 — разломные нарушения.

усть-пинежской, мезенской и падунской свит песчано-глинистого состава (Ларченко и др., 2004).

Комплекс перекрывающих пород представлен четвертичными и каменноугольными отложениями средней суммарной мощностью около 50 м, которые сплошным чехлом залегают над вендскими отложениями.

У трубки также сохранилась кратерная часть, сложенная осадочно-вулканогенными образованиями двух основных типов пород — туфогенных и туфогенно-осадочных суммарной мощностью около 120 м. В верхней части жерловой фации преобладают ксенотуфобрекчии, нижняя часть сложена автолитовыми брекчиями (Ларченко и др., 2004).

По данным метода общей глубинной точки<sup>1</sup> (МОГТ) трубка «Пионерская» проявилась в виде зоны потери корреляции (рис 2в).

### МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Измерения микросейсм производились вдоль профиля длиной 1850 м, направленного с юга на север (рис. 1). Над трубкой расположены пункты 4–17. Шаг между пунктами измерения

составлял 50–100 м. Для измерения микросейсм использовалась сейсмическая аппаратура производства Guralp CMG-6TD (Великобритания): частотный диапазон 1–100 Гц, чувствительность 2000В\*м/с, масса 2 кг. При измерениях аппаратура устанавливалась непосредственно на дневную поверхность и ориентировалась по сторонам света.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

По данным ММЗ (рис. 3) наиболее отчетливо проявляется первая фаза внедрения трубки, представленная ксенотуфобрекцией, в виде низкоскоростной аномалии (положительные значения относительной интенсивности микросейсм). Вторая фаза, представленная автолитовой брекцией, проявляется в виде слабоконтрастной зоны. Низкоскоростная часть трубки выделяется на глубинах 70–100 м в пунктах 7–10 и на глубинах от 300 до 600 м в пунктах 6–13. Повышенные скоростные свойства пород второй фазы внедрения отмечались ранее в известных моделях трубок взрыва Архангельской алмазонасной провинции (Губайдулин, 2001а).

На глубинах 600–1200 м по данным ММЗ отображается южный корень трубки (пункты 5–9). По данным ММЗ видно смещение в южном направлении корня трубки на глубине 800 м. Ввиду отсутствия информации о строении трубки

на глубинах более 600 м (Вержак и др., 1987)<sup>1</sup> данное предположение пока не подтверждено.

Во вмещающей среде с юга от трубки выделяются контрастная низкоскоростная зона на глубинах до 250 м и слабоконтрастная низкоскоростная среда на глубинах 700–1400 м. Вмещающая среда с юга от трубки взрыва на глубинах 300–700 м и на всех глубинах к северу от трубки характеризуется как высокоскоростная.

Для более детального анализа полученного изображения исследуемой трубки была произведена обработка данных по пунктам 5–19 для глубин от 70 м до 500 м (рис. 4). Пункты 1–4 были исключены из обработки, так как контрастная неоднородность в приповерхностной области может существенно исказить средний уровень относительной интенсивности микросейсм в верхних слоях. Пункты 20–22 не были использованы в обработке в связи с отсутствием необходимости в столь существенном выходе за пределы трубки и однородным строением вмещающей среды с севера от трубки. В результате обработки (рис. 4) получено, что тело трубки отличается от вмещающих пород и характеризуется диапазоном интенсификации микросейсм от –2 дБ до 6 дБ, а вмещающая среда от –7 дБ до –2 дБ.

Результатом дисперсионного анализа эмпирических функций Грина, является скоростная модель (рис. 3), на которой наблюдается уменьшение скорости на глубинах от 150 до 550 м, что

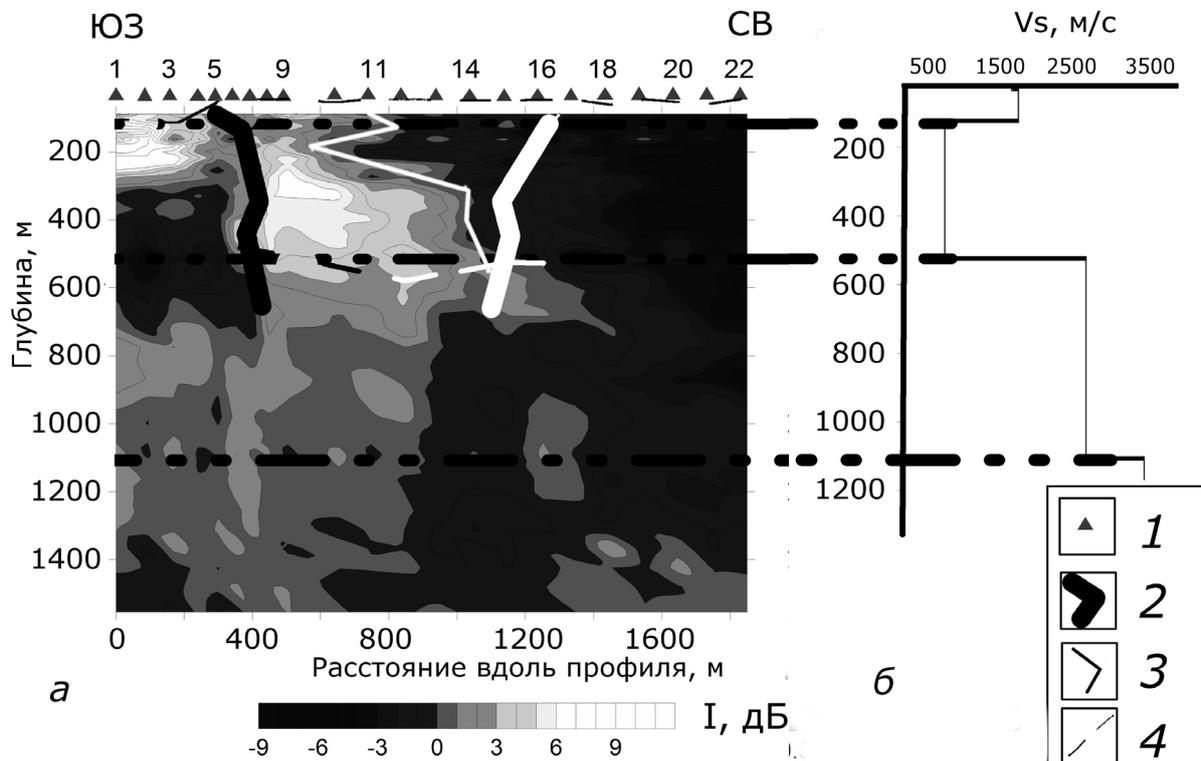


Рис. 3. Результаты обработки данных по методу ММЗ (а) и скоростная модель по данным пассивной интерферометрии (б): 1 — пункты замеров микросейсм, 2 — борта трубки взрыва (Вержак и др., 1987)<sup>1</sup>, 3 — границы разделения различных фаз внедрения (Вержак и др., 1987)<sup>1</sup>, 4 — границы, выделенные методом N/V.

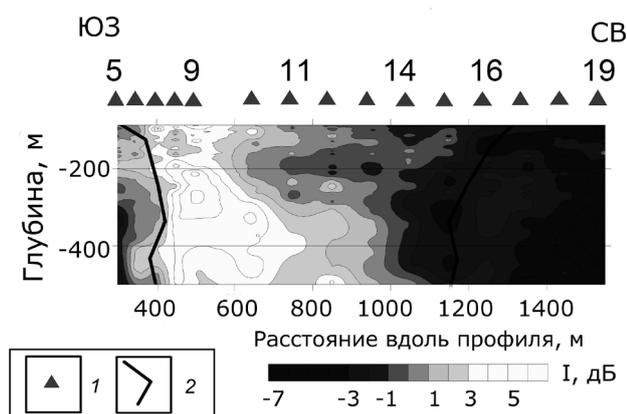


Рис. 4. Геофизический разрез вдоль профиля, пересекающего трубку взрыва «Пионерская» по данным метода микросейсмического зондирования: 1 — пункты замеров микросейсм, 2 — борта трубки взрыва (Вержак и др., 1987)<sup>1</sup>.

вероятно обусловлено прохождением волн через низкоскоростную часть трубки. Граница на глубине порядка 1100 м, предположительно, соответствует верхней границе кристаллического фундамента, что близко к известным данным (Губайдулин, 2001б; Тектоническая ..., 2010).

В результате обработки данных методом Н/V, выявлены две горизонтальные границы. Первая граница расположена на глубине 35–50 м, с опусканием в южной части профиля до 100 м. Данная граница, вероятно, соответствует нижней части четвертичных отложений, что согласуется с известными данными (Вержак, Гаранин, 2005). В районе трубки, наиболее контрастной является граница на глубине 500–580 м. Данная граница соответствует нижней части трубки (рис. 3).

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты, полученные различными методами, хорошо согласуются друг с другом (рис. 3). Так, граница на глубине 500–580 м, выделенная методом Н/V (рис. 3а), соответствует нижней границе исследуемой трубки, выделенной по данным ММЗ. Согласно скоростной модели, полученной в результате инверсии дисперсионной кривой функции Грина нижняя граница исследуемой трубки проявляется на глубинах 550–580 м. (рис. 3б). Выделенная граница также согласуется с результатами ранее проведенных исследований<sup>2</sup>. Слой пониженных скоростей

<sup>2</sup>Егоркин А.В. Строение земной коры и верхней мантии вдоль профилей Чешская губа — Пай-Хой, Белое море — Воркута, Двинская губа — р. Мезень, р. Онега — Чешская губа, р. Вага — Белое море. Отчет камеральной партии СРГЭ о результатах региональных сейсмических исследований ГСЗ, МОВЗ, проведенных в 1985–1987 гг. на севере Европейской

(рис. 3б) соответствует низкоскоростному телу первой фазы внедрения трубки (рис. 3а), а кристаллический фундамент, выделенный на глубине 1100 м, соответствует известным данным как по глубине (Тектоническая ..., 2010), так и по скорости поперечных волн, известных из ранее проведенных сейсморазведочных исследований (Егоркин, 1987).

Низкоскоростное тело первой фазы внедрения трубки вызывает повышение интенсивности микросейсм на 5–9 дБ (рис. 3). Согласно (Gorbatikov et al., 2013), это обусловлено изменением скорости приблизительно в два раза. По результатам дисперсионного анализа функций Грина наблюдается тот же порядок в изменении значений скоростей. Представленные расчеты носят оценочный характер. Тем не менее, совпадение порядка наблюдаемых контрастов указывает на достоверность данных двух независимых методов. Кроме того, данный пример показывает, что локализованные контрастные скоростные неоднородности оказывают существенное влияние на результаты расчета эмпирических функций Грина. Помимо согласованности, в полученных результатах имеются и различия. Так, граница кристаллического фундамента не была обнаружена при обработке данных методом микросейсмического зондирования (рис. 3). Это связано с тем, что данный метод направлен на выявление в среде контрастных субвертикальных границ, а граница кристаллического фундамента расположена горизонтально.

#### ВЫВОДЫ

Использованный комплекс методов позволил локализовать в пространстве первую фазу внедрения трубки «Пионерская». Борта и нижняя граница первой фазы внедрения известны из результатов бурения<sup>1</sup>. В свою очередь, уверенное совпадение результатов тестирования и данных бурения указывает на перспективность предложенного комплекса методов.

Результаты опробованных методов дополняют друг друга. Так дисперсионная кривая, определяемая по эмпирическим функциям Грина, необходима для привязки по глубине результатов обработки методами ММЗ и Н/V. В свою очередь локальные скоростные неоднородности, выделяемые по ММЗ и границы, выделяемые по методу Н/V, позволили объяснить природу низкоскоростного слоя, выделенного в результате инверсии дисперсионных кривых эмпирических функций Грина. Таким образом, предложенный комплекс методов перспективен

части СССР (в двух книгах). Листы R-39, 40, 41, 42; Q-37, 38, 39, 40, 41; P-37, 38. Москва, 1987, 188 с.

не только для исследований трубок взрыва, но и для различных критических зон, описанных в работе (Parsekian et al., 2015).

По данным опробованного комплекса, северный борт трубки проявился слабоконтрастно. Данный факт указывает на возможное наличие слабоконтрастных трубочных тел. Как следствие, становится очевидной необходимость поиска путей повышения чувствительности используемых методов. В частности, чувствительность данных ММЗ может быть повышена путем увеличения периода накопления (Danilov, 2017). Определенный потенциал в этом направлении имеет подбор схемы замеров: выход за пределы трубочного тела, пересечение контролирующих неоднородностей и т.д. (рис. 4). Таким образом, показано, что требуется производить дальнейшие работы по апробации и совершенствованию предложенного комплекса методов.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-35-80015 «мол\_эв\_а».

#### Список литературы

- 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.
- Вержак Д.В., Гаранин К.В.* Экологические проблемы освоения месторождений алмаза Архангельской алмазоносной провинции и некоторые пути их решения // Геология алмаза — настоящее и будущее. Воронеж: изд-во ВГУ, 2005. С. 246.
- Головин Н.Н.* Геологическое строение, минеральный состав и условия образования щелочно-ультраосновных пород Кепинской площади (Архангельская алмазоносная провинция): Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Москва, 2003. 31 с.
- Горбатиков А.В., Ларин Н.В., Моисеев Е.И., Беляшов А.В.* Применение метода микросейсмического зондирования для изучения строения погребенной трубки взрыва // ДАН. 2009. Т. 428. № 4. С. 52–530.
- Горбатиков 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.
- Горбатиков А.В., Цуканов А.А.* Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.
- Губайдуллин М.Г.* Физико-геологические модели поисковых объектов: монография // Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Геоэкологические проблемы. Екатеринбург: УрО РАН, 2001а. С. 57–63.
- Губайдуллин М.Г.* Региональные геолого-геофизические модели литосферы // Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Геоэкологические проблемы. Екатеринбург: УрО РАН, 2001б. С. 48–56.
- 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.
- Киселев Г.П., Данилов К.Б., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В.* Радиометрические и сейсмометрические исследования кимберлитовой трубки Чидвинская (Архангельская алмазоносная провинция) // Вестник КРАУНЦ: Науки о Земле. 2016. Вып. 30. № 2. С. 43–53.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: ИПП «Правда Севера», 2004. 281 с.
- 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.
- Милашев В.А.* Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.
- Николаев А.В.* Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 4–38.
- 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.
- Синицын А.В., Дауев Ю.М., Гриб В.П.* Структурное положение и продуктивность кимберлитов Архангельской провинции // Геология и геофизика. 1992. № 10. С. 74–83.
- Стогний В.В., Коротков Ю.В.* Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Издательство «Малотиражная типография 2D», 2010. 121 с.
- Суворов В.Д.* Глубинные сейсмические исследования в Якутской кимберлитовой провинции. Новосибирск: Наука, 1993, 136 с.
- Тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий масштаб 1:1500000 // Главные редакторы М.Г. Леонов, Г.С. Казанин. М.: ООО «ИПП Куна», 2010.

- Французова В.И., Данилов К.Б.* Структура трубки взрыва им. М.В. Ломоносова Архангельской Алмазодобывающей Провинции // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 71–78.
- Afonin N., Kozlovskaya E., Kukkonen I., DAFNE/FINLAND Working Group.* Structure of the Suasselkä postglacial fault in northern Finland obtained by analysis of local events and ambient seismic noise // Solid Earth. 2017. № 8. P. 531–544. doi:10.5194/se-8-531-2017, 2017.
- Bath M.* Spectral analysis in geophysics. Amsterdam. Elsevier. 1974. P. 432–443.
- Eddy C.L., Ekström G.* Local amplification of Rayleigh waves in the continental United States observed on the USArray // Earth and Planetary Science Letters. 2014. V. 402. P. 50–57.
- Campillo M.* Phase and correlation of «random» seismic fields and the reconstruction of the Green function // Pure and Applied Geophysics. 2006. V. 163. P. 475–502. doi:10.1007/s00024-005-0032-8.
- Danilov K.B.* The structure of the Onega downthrown block and adjacent geological objects according to the microseismic sounding method // Pure and Applied Geophysics. 2017. doi: 10.1007/s00024-017-1542-x.
- Delgado J., López Casado C., Giner J. et al.* Microtremors as a geophysical exploration tool: Applications and limitations // Pure and Applied Geophysics. 2000. V. 157. P. 1445–1462.
- Gorbatikov A.V., Montesinos F.G., Arnosó 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. P. 463–489. doi 10.1007/s10712-013-9240-4.
- Ibs-vonSeht M., Wohlenberg J.* Microtremors measurements used to map thickness of soft soil sediments // Bulletin of the Seismological Society of America. 1999. V. 89. P. 250–259.
- Lane J.W., White E.A., Steele G.V., Cannia J.C.* Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method // Theses. Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Philadelphia. 2008. P. 1–13.
- Lin F.C., Tsai V.C., Ritzwoller M.H.* The local amplification of surface waves: A new observable to constrain elastic velocities, density, and anelastic attenuation // JGR. 2012. V. 117. B06302. doi:10.1029/2012JB009208.
- Nakamura Y.A.* Method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. V. 30. №1. P. 25–33.11.
- Parolai S., Bormann P., Milkert C.* New relationships between  $V_s$ , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for Cologne Area (Germany) // Bulletin of the Seismological Society of America. 2002. V. 92. P. 2521–2527.
- Parsekian A.D., Singha K., Minsley B.J. et al.* Multiscale geophysical imaging of the critical zone // Rev. Geophys. 2015. V. 53. P. 1–26. doi:10.1002/2014RG000465.
- Poli P., Campillo M., Pedersen H., POLENET/LAPNET Working Group.* Noise directivity and group velocity tomography in a region with small velocity contrasts: the northern Baltic shield application to the northern Baltic Shield // Geophys. J. Int. 2013. V. 192. P. 413–424, doi:10.1093/gji/ggs034.
- Shapiro N.M., Campillo M.* Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // Geophys. Res. Lett. 2004. 31. L07614. doi:10.1029/2004GL019491.
- Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.* High-Resolution Surface-Wave tomography from ambient seismic noise // Science. 2005. V. 307. P. 1615–1618.
- Wapenaar K., Draganov D.* Tutorial on seismic interferometry // Journal of Geophys. 2010. V. 75. № 5. P. 75A195–75A209.

ДАНИЛОВ и др.

## STRUCTURE OF PIONERSKAYA BRECCIA PIPE AT THE ARKHANGELSK DIAMOND-BEARING AREA BASED ON DATA ON PASSIVE SEISMIC METHODS

**К.В. Danilov<sup>1</sup>, N.Yu. Afonin<sup>1</sup>, A.I. Koshkin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*FRC CAI RAS; e-mail: danilov\_kostea@mail.ru;*

<sup>2</sup>*FRC GS RAS*

Today, two diamond fields are being developed within the Arkhangelsk region, and new fields will likely be discovered. However, breccia pipes are hard to be discovered. This article presents the results of investigation aimed at more efficient methods of discovering and study of breccia pipe structure. In order to achieve this goal, we tested a complex of passive seismic methods. The authors used Pionerskaya breccia pipe as a test object at the Arkhangelsk diamond-bearing area. The tested suit of methods includes passive seismic interferometry, microseismic sounding, and H/V method. The testing allowed the authors to draw important boundaries of the studied object. Thus, it is possible to use the introduced suit of methods for investigation of structure and velocity properties of the breccia pipes at the Arkhangelsk diamond-bearing area.

*Keywords: microseisms, passive seismic methods, sounding, breccia pipes.*