

## Работы молодых ученых

УДК 550.34

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТРУБКИ ВЗРЫВА им. М.В. ЛОМОНОСОВА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

© 2011 К.Б. Данилов

*Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск, 163000; e-mail: danilov\_kostea@mail.ru*

В статье рассмотрен вопрос поиска трубок взрыва Архангельской алмазоносной провинции с помощью метода микросейсмического зондирования. В основу метода положен статистический подход к анализу микросейсмических колебаний. В работе представлены различные варианты дополнительной обработки исходных данных.

*Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, кимберлитовые трубки взрыва.*

#### ВВЕДЕНИЕ

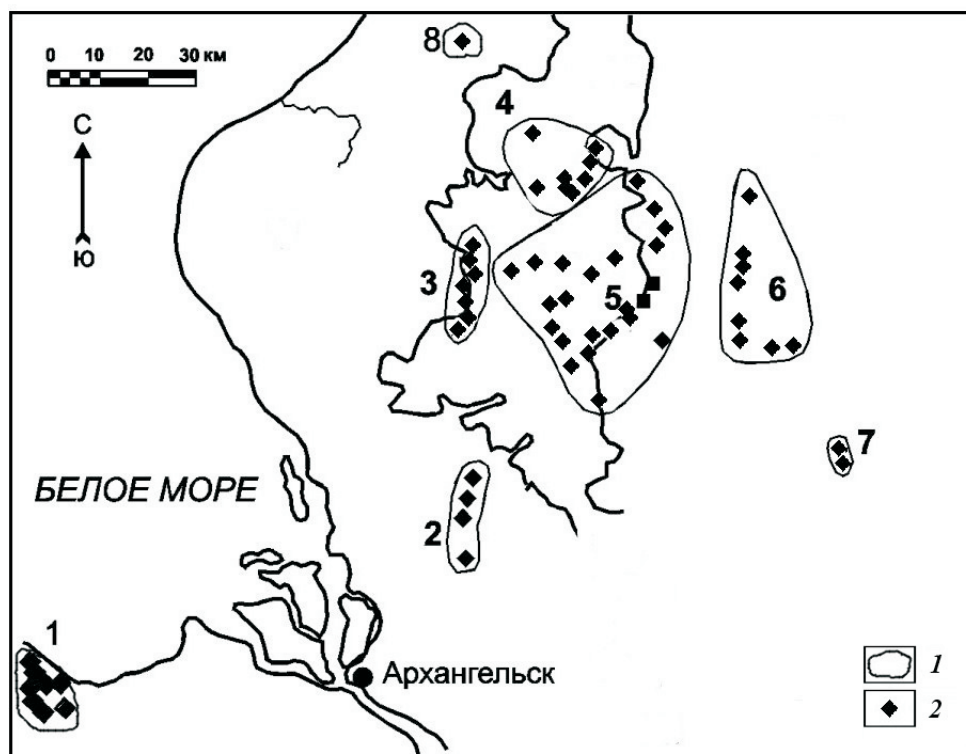
На территории Архангельской области расположена и разрабатывается Архангельская алмазоносная провинция (ААП) (Еременко, Ненахов, 2002).

Первые признаки наличия трубок взрыва на Севере Русской плиты были обнаружены в 1936 г., когда на Онежском полуострове Белого моря в районе села Ненокса гидрологическая скважина под четвертичными отложениями вскрыла экзотические брекчии. В 1968 г. в рамках планового геологического картирования в районе Неноксы была проведена наземная магнитная съемка. По результатам съемки был установлен ряд магнитных аномалий, одна из которых совпадала с находкой экзотических брекчий. При крупно-объемном опробовании было установлено минералогическое присутствие алмазов (Синицын и др., 1992). Так было положено начало изучению и разработке нового месторождения алмазов на территории Архангельской области. На данный момент ААП состоит из пяти кимберлитовых полей: Золотицкое, Кепинское, Верхотинское, Ижмозерское, Ненокское. В ААП также входит Сояно-Пинежский базальтовый комплекс (Еременко, Ненахов, 2002), включающий Туринское, Полтинское и Мельское поля (рис. 1).

Поля, в свою очередь, состоят непосредственно из трубок взрыва. Хотя на сегодняшний день трубки взрыва ААП достаточно хорошо изучены широко применяемыми геофизическими методами, такими как магнито- и электроразведка (Губайдулин, 2001; Кутинов, Чистова, 2004), они не всегда могут быть однозначно выделены. Факторами, препятствующими поиску кимберлитовых трубок взрыва, являются следующие (Кутинов, Чистова, 2004):

- эрозия наиболее намагниченной кратерной части трубок;
- слабая намагниченность наиболее продуктивных пород;
- возможные малые размеры трубок;
- наличие объектов «помех»;
- вероятность пропуска слабых магнитных аномалий, даже при высокоточной магниторазведке;
- практическое отсутствие определенных параметров, свойственных именно трубкам взрыва.

Существует еще и проблема, обусловленная выбором методики изучения земной коры. Эффективность традиционных методов зондирования земной коры во многом зависит от правильности выбора методики из существующего разнообразия геофизических методов



**Рис. 1.** Схема размещения магматических пород ААП: 1 – кимберлитовые поля (1 – Ненокское, 2 – Ижмозёрское, 3 – Золотицкое, 4 – Верхотинское, 5 – Кепинское, 6 – Турьинское, 7 – Полтинское, 8 – Мельское); 2 – трубки взрыва.

изучения строения Земли (Рябинкин, 1981). Подбор методики в каждом конкретном случае требует получение ряда априорных сведений об исследуемом объекте и вмещающей среде. Так, при изучении объектов со сложным строением (большие наклоны и несогласия отражающих границ) целесообразнее применять метод регулируемого направленного приема. При изучении криволинейных границ метод отраженных волн (МОВ) позволяет получить более детальные данные, по сравнению с методом преломленных волн (МПВ); в свою очередь, горизонтально-слоистые среды благоприятны для применения МПВ. Комплексирование МПВ с другими геофизическими методами (МОВ, акустический каротаж, вертикальное сейсмическое профилирование) позволяет повышать точность интерпретации данных. Для изучения вертикально падающих границ с резкой дифференциацией скоростей применяется метод проходящих волн (МПП). Немаловажно и то, что в МПП приемник и источник должны располагаться по разные стороны от изучаемой границы. Различные особенности изучаемой структуры учитываются и при реализации метода обращенных годографов (Рябинкин, 1981).

Приведенные факты говорят о том, что для корректного выбора традиционных, зарекомендовавших себя методов изучения геологической среды желательным является применение предварительных,

простых в реализации методов, позволяющих получать требуемую априорную информацию об изучаемом объекте. Одним из таких методов является метод микросейсмического зондирования (ММЗ) (Горбатиков и др., 2008).

ММЗ был успешно опробован при изучении погребенной трубки взрыва Марусиновская в республике Беларусь (Горбатиков и др., 2009), и мы решили применить его для изучения алмазных трубок взрыва ААП.

Целью данной работы является проверка возможностей выделения трубок взрыва ААП и изучения их структуры с помощью ММЗ на примере трубки им. М.В. Ломоносова. Исследуемая трубка относится к Золотицкому кимберлитовому полю ААП (рис. 1), приуроченному к зоне глубинного разлома субмеридианального простирания (Еременко, Ненахов, 2002).

#### МЕТОД МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

ММЗ основан на том, что спектральные амплитуды волн Рэлея на определенных частотах увеличиваются при прохождении низкоскоростных неоднородностей и уменьшаются при прохождении высокоскоростных. Важным предположением для реализации метода является то, что вертикальная компонента смещений в микросейсмическом шуме

представлена, в основном, вертикальной компонентой смещения фундаментальной моды волны Рэлея, и то, что источники микросейсм распределены в пространстве достаточно равномерно. При этом сама неоднородность может находиться на определенной глубине, а соответствующие изменения интенсивности ощущаться на поверхности. О глубине залегания неоднородности можно судить по тому, что волна наиболее ярко «реагирует» на неоднородность при ее залегании на глубине, близкой к половине длины волны (Горбатиков и др., 2008).

Основными затруднениями, которые возникают при применении данного метода, являются случайный состав микросейсмического поля и его временные вариации. Данные особенности преодолеваются, в первую очередь, исходя из того, что микросейсм в основном состоят из поверхностных волн. Как следствие, можно ожидать, что на записях вертикального канала будут преобладать волны Рэлея. Для устранения влияния временных вариаций микросейсм используется система, включающая опорную и передвижную станции. Записи опорной станции также могут использоваться как «эталонные» при отбраковке данных передвижной станции.

Источниками поверхностных волн в низкочастотном диапазоне являются акватории морей и океанов, их влияние ощущается на удалении сотен километров (Монахов, 1977). Данный факт делает предлагаемый метод весьма привлекательным в связи с постоянным, практически повсеместным присутствием необходимого зондирующего сигнала. Сама спецификация метода позволяет говорить о его применимости для выделения трубок взрыва, так как метод нацелен на выделения субвертикальных неоднородностей в силу того, что волны Рэлея распространяются параллельно поверхности.

На первом этапе обработки нами производилась отбраковка данных по волновым формам и спектрам записей микросейсм. Далее выполнялось построение обобщенных спектров и рассматривалась каждая частота в указанном диапазоне в отдельности. В настоящей работе при обработке данных был рассмотрен диапазон частот от 0.4 до 4 Гц, разбитый на 552 поддиапазона. Для каждого поддиапазона на всех пунктах измерений рассчитывалась относительная интенсивность микросейсм —  $I_i$ , которая реагирует на скоростные неоднородности.

$$I_i = 20 * \lg \frac{A_{ip}}{A_{io}},$$

где  $A_{ip}$  — спектральная амплитуда по записи в  $i$ -м пункте передвижной станции на рассматриваемой частоте,  $A_{io}$  — спектральная амплитуда по записи в  $i$ -м пункте опорной станции на рассматриваемой частоте.

На следующем этапе производился расчет глубин  $h$ :

$$h = \alpha/2,$$

$$\alpha = \tilde{v}/v,$$

где  $\alpha$  — длина волны,  $\tilde{v}$  — скорость волны Рэлея,  $v$  — частота.

Таким образом, по результату обработки данных были построены диаграммы распределения относительной интенсивности микросейсм в координатах «глубина — расстояние вдоль профиля». На диаграммах цветом отражено значение относительной интенсивности микросейсм. Согласно используемому методу (Горбатиков и др., 2008) области с повышенными скоростными свойствами характеризуются пониженными значениями относительной интенсивности. Области с пониженными скоростными свойствами наоборот проявляются на диаграммах как области с повышенной относительной интенсивностью.

## СПОСОБЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ

ММЗ относится к группе «статистических», следовательно, и результаты обработки носят вероятностный характер. В ММЗ при обработке необходимо добиться статистически устойчивых во времени данных, когда можно утверждать о преобладании рэлеевских волн над волнами другого типа. Приемами минимизации искажающего влияния являются накопление сигнала и отбраковка записей по спектральным характеристикам и волновым формам. В результате при правильной организации полевых работ и качественной отбраковки данных для анализа используются записи, представленные преимущественно волнами Рэлея. При этом, влияние искажающих факторов (зашумленность записи микросейсмических колебаний волнами не рэлеевской природы) абсолютно полностью не исключается. Как следствие, дополнительные приемы выделения полезной информации могут оказаться весьма полезными. К таким приемам относится обработка спектров полученных в результате суммирования.

Для проверки эффективности и выбора наиболее оптимального приема повышения информативности спектров полученных в результате суммирования профили были обработаны в трех вариантах:

- с применением процедуры огибания спектров;
- с применением процедуры усреднения спектров;
- без применения дополнительных процедур.

Процедура огибания спектров сводится к оценке пикового значения спектральных

амплитуд в определенном окне частот и смещением на соседнее окно с последующим соединением найденных пиковых значений. Процедура усреднения спектров подразумевает последовательный расчет среднего значения по определенному количеству смежных значений, с последующим смещением на половину рассматриваемого окна. Как следствие, от использования процедуры огибания справедливо ожидать вычленения узкополосных пиков из общего набора значений. Использование процедуры усреднения позволяет выделить наиболее вероятное значение из набора соседних спектральных амплитуд.

### МЕТОДИКА РАБОТ И АППАРАТУРА

В ходе полевых работ замеры микросейсмических колебаний проводились вдоль параллельных профилей, расположенных в крест простирания трубки им. М.В. Ломоносова (рис. 2), с выносом профилей за пределы исследуемого объекта на расстояния, сравнимые с размерами трубки, которые составляют ~ 400 × 500 м<sup>1</sup>. Профиля, пересекали исследуемую трубку взрыва в субширотном направлении, с шагом между пунктами замеров 100 м, дистанцией между профилями – 100-200 м. Время регистрации микросейсмических колебаний в каждом пункте составляло 1 час. Длина первого профиля – 800 м, профили 2, 3 – 1200 м, профили 4 – 1000 м (рис. 2). Профили располагались так, что, два из них проходили севернее исследуемого тела. В качестве опорной станции использовалась сейсмическая станция КБС (Россия) с велосиметрами СМЗ-КВ (Россия), в качестве передвижной станции использовалась сейсмическая станция GSR-24 (Швейцария) с велосиметром СМГ-40Т (Великобритания).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки записей микросейсм, полученные при проведении ММЗ представлены на рис. 3-6. На всех профилях четко проявляются согласующиеся друг с другом две низкоскоростные зоны. Первая низкоскоростная зона выделяется на профиле 1 в точке 6 (рис. 2, 3), на профиле 2 – в точках 5-8 (рис. 2, 4), на профиле 3 – в точках 2-8 (рис. 2, 5), на профиле 4 – в точках 5-9 (рис. 2, 6); вторая зона выделяется на всех профилях, кроме профиля 1, и ограничивается точками с 11 по 13 (рис. 2, 4-6). Выделенные низкоскоростные зоны наиболее отчетливо прослеживаются до глубины 1.5 км и разделяются высокоско-

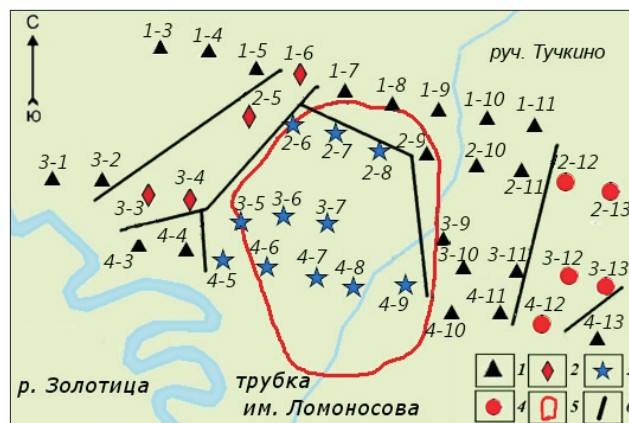


Рис. 2. Расположение профилей, пунктов замеров микросейсмических колебаний и выделенных зон: 1 – высокоскоростные зоны; 2 – часть первой низкоскоростной зоны с наименьшими скоростными свойствами; 3 – часть первой низкоскоростной зоны с промежуточными скоростными свойствами; 4 – вторая низкоскоростная зона; 5 – трубка взрыва; 6 – границы выделенных зон. Цифрами обозначены номера пункты замеров.

ростной зоной. На профиле 3 (рис. 2, 5) можно отметить воронкообразную форму первой зоны. Внутри первой низкоскоростной зоне выделяется части с наименьшими и промежуточными скоростными свойствами.

На рис. 3 показано, что с востока от первой зоны среда обладает более высокими скоростными свойствами, чем с запада. Первая низкоскоростная зона на профиле 1 аналогична второй зоне на профилях 2, 3, 4 (рис. 2-5) – глубокая, узкая, контрастная, низкоскоростная. Предположительно подобным образом проявляются разрывные нарушения северо-восточного направления. Возможно, что область с наибольшей интенсивностью микросейсм на профиле 3 вызвана пересечением разломов.

Поверхность трубки лежит на глубинах от 50 до 70 м. В горизонтальном сечении форма трубки до глубин 200 м практически не меняется. В связи с этим, исследуемая площадь была разбита на участки с различными скоростными свойствами пород, залегающих на глубине от 100 до 200 м (рис. 2). На рис. 2 показано, что области с различными скоростными свойствами внутри первой низкоскоростной зоны действительно относятся к разным объектам. Так, ее часть с наименьшими скоростными свойствами не является трубкой взрыва и прилегает к ее западному и северо-западному бортам. Возможно, что зона наименьших скоростей является либо разрывным нарушением, либо участком трещиноватости прибортовой части трубки. К трубке взрыва относится часть первой низкоскоростной зоны с промежуточными скоростными свойствами и неоднородным строением (рис. 2, 3-6).

Полученные результаты подтверждают то,

<sup>1</sup> Отчет о результатах разведки кимберлитовых трубок месторождения им. Ломоносова в 1983-1987 гг. // ПГО «Архангельскгеология», Беломорская геолого-разведочная экспедиция, Архангельск, 1986. 83с.

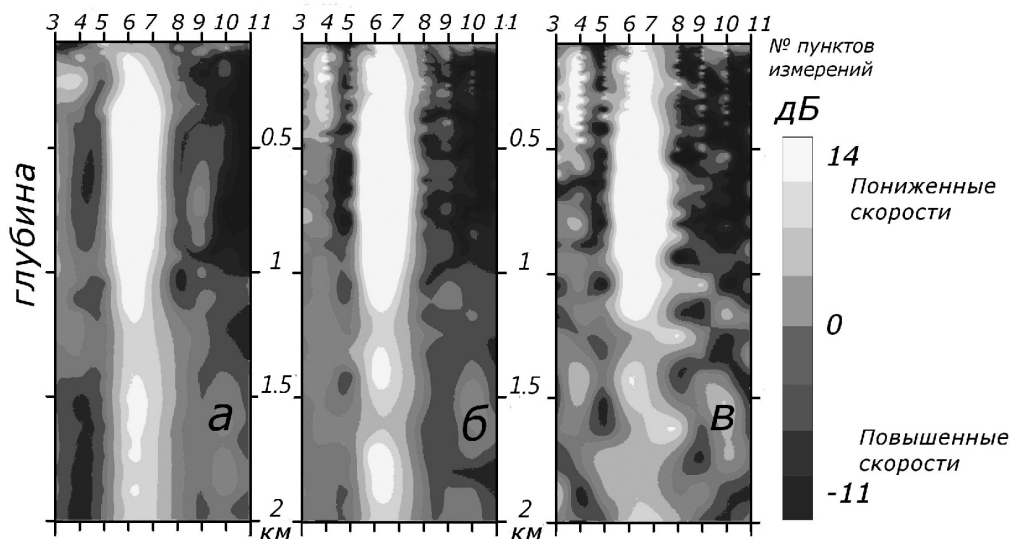


Рис. 3. Структура верхних слоев земной коры вдоль профиля 1 с применением дополнительных методов обработки данных: *а* – огибание; *б* – усреднение; *в* – без обработки.

что трубки взрыва ААП по скоростным свойствам незначительно отличаются от вмещающих пород (Кутинов, Чистова, 2004), и при этом наблюдается смена структуры среды от горизонтально-слоистой во вмещающих породах к гетерогенной внутри трубки<sup>2</sup>. Получено согласие с известными фактами и в том, что трубки взрыва сопровождаются параллельными и радиальными разрывными нарушениями (Губайдуллин, 2001; Кутинов, Чистова, 2004). Разломы проявляются на диаграммах в виде контрастных низкоскоростных зон (рис. 3–6). Одним из параметров выделения трубки взрыва является различие по форме, структуре и линейным размерам зоны промежуточной интенсификации микросейсм на разных профилях<sup>2</sup>.

Результаты, полученные при выполнении работ на профилях 2 и 4 (рис. 2, 4, 6) показывают, что по бортам трубки выделяются подзоны, характеризующиеся повышенной интенсивностью микросейсм. Предполагается, что подобным образом проявляются различные фазы внедрения, отличающиеся друг от друга как составом, так и упругими свойствами. Данное предположение согласуется с известными данными о строении трубки взрыва им. М.В. Ломоносова<sup>1</sup>.

Все заключения о структуре изучаемой среды были сделаны нами исходя из обобщенной интерпретации результатов различных процедур обработки. Сравнение диаграмм полученных при использовании различных процедур обработки

спектров показало, что усреднение позволяет избежать разобщенности данных. Этот факт указывает на актуальность использования процедуры усреднения. Но при выделении области, соответствующей трубке взрыва, эффективнее использовать огибание спектров. Одним из объяснений полученного вывода может служить гетерогенное строение трубки взрыва и наиболее контрастное отличие от вмещающей среды по скоростным свойствам лишь отдельных включений. Подобные включения, в силу малых линейных размеров, проявляются на спектрах в виде узкополосных пиков, которые выделяются с помощью процедуры огибания спектров.

Кроме того, процедуры огибания и усреднения позволяют преодолеть разброс в данных, вызванный тем, что на скоростную неоднородность реагирует не конкретное значение, а диапазон длин волн.

Следует отметить, что возможно повышение качества получаемых данных за счет увеличения времени регистрации микросейсмических колебаний в каждой точке до 90 минут. Данный шаг позволит повысить точность измерений и избежать влияния медленного тренда микросейсмических колебаний (Горбатиков, Степанова, 2008).

Для получения более детальной информации о трубке взрыва и вмещающих породах целесообразно произвести дополнительные полевые работы как по расширению замеренных профилей, так и по уплотнению сети наблюдения.

## ВЫВОДЫ

1. Метод микросейсмического зондирования показал возможность выделения трубок взрыва

<sup>2</sup> Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка и внедрение методики сейсмических исследований при поисках кимберлитовых трубок в Юго-Восточном Беломорье» НПО «Рудгеофизика». Ленинград, 1989 С. 87.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

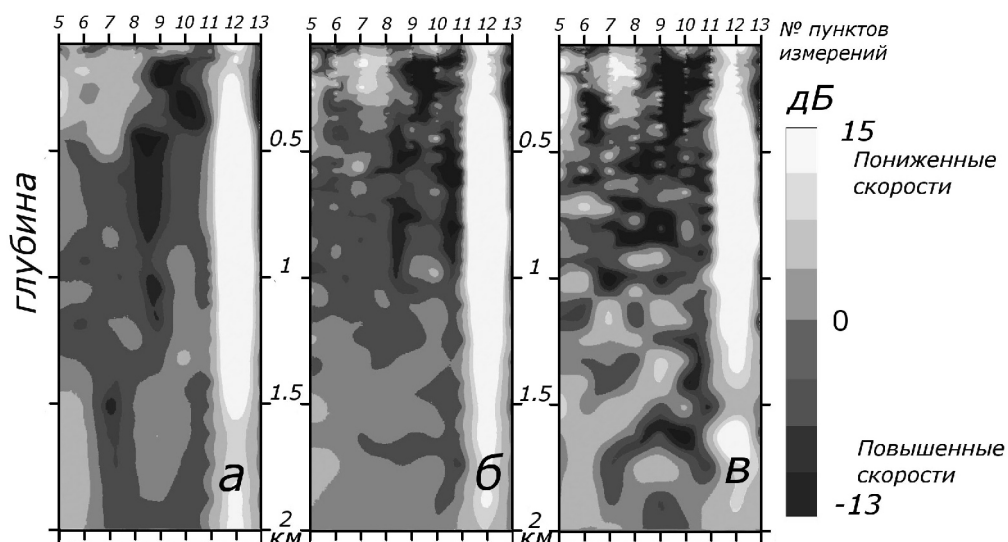


Рис. 4. Структура верхних слоев земной коры вдоль профиля 2 с применением дополнительных методов обработки данных. Обозначения см. на рис. 3.

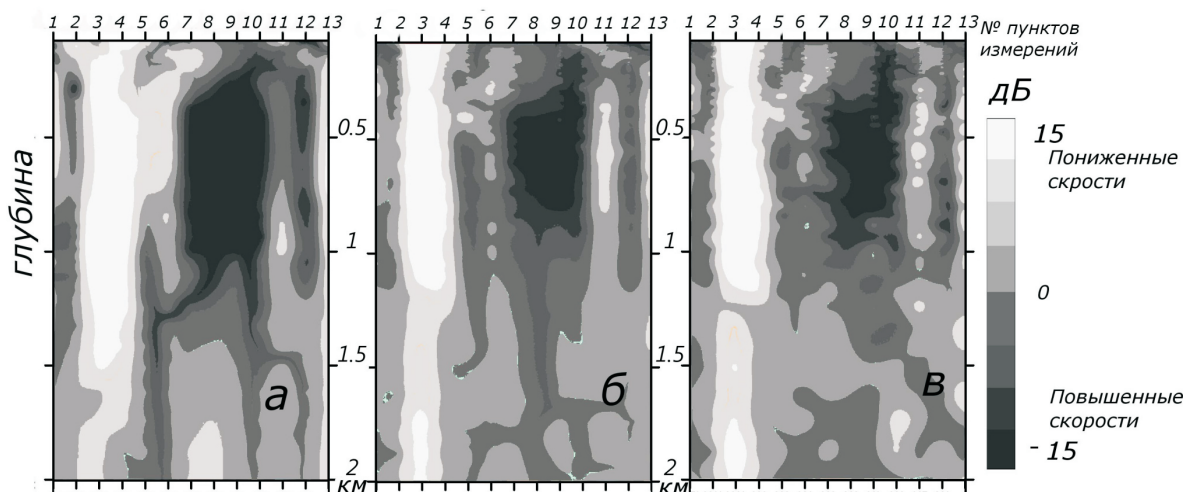


Рис. 5. Структура верхних слоев земной коры вдоль профиля 3 с применением дополнительных методов обработки данных. Обозначения см. на рис. 3.

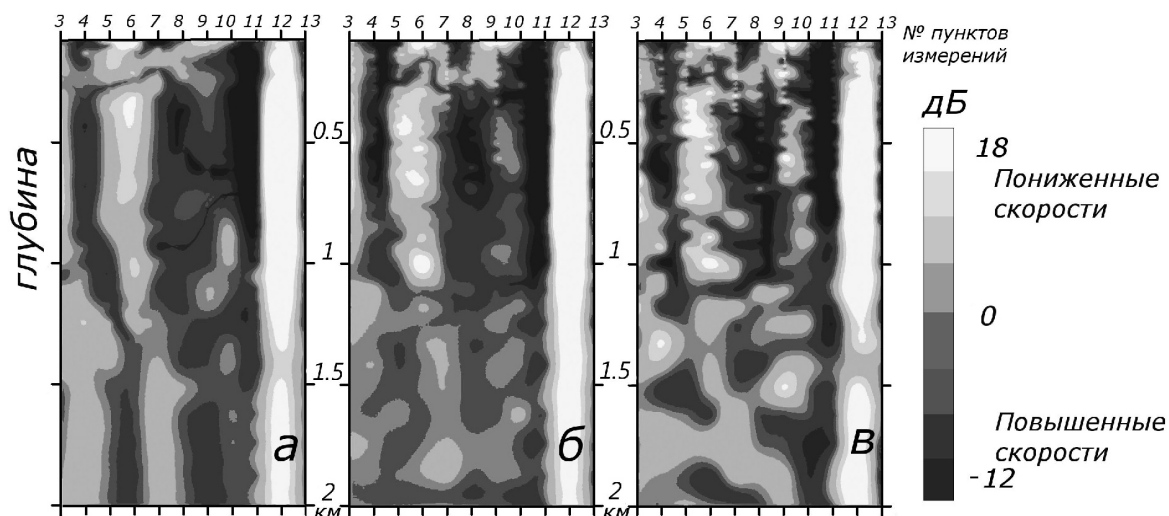


Рис. 6. Структура верхних слоев земной коры вдоль профиля 4 с применением дополнительных методов обработки данных. Обозначения см. на рис. 3.

и изучения их структуры на территории Зимнебережного района Архангельской алмазоносной провинции. При этом основными параметрами являются: отличие скоростных свойств пород трубки взрыва от вмещающих пород, изменение структуры строения среды (т.е. наличие случайных локальных изменений скоростных свойств), форма выделяемого объекта (существенное различие по линейным размерам и глубине залегания на различных профилях).

2. При использовании ММЗ дополнительным маркером трубки взрыва может служить ее приуроченность к разрывным нарушениям (Губайдулин, 2001; Кутинов, Чистова, 2004), которые проявляются в виде областей со значительно большей интенсивностью, чем трубки взрыва.

3. С целью облегчения интерпретации данных и более надежной локализации трубок взрыва целесообразно при обработке использовать процедуру огибания спектров, полученных после суммирования.

4. Для повышения качества материала необходимо увеличить время регистрации микросейсм в одной точке до 90 минут.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 4 и гранта РФФИ 10-05-00497-а.

#### Список литературы

- 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. 526-530.
- Горбатиков А.В., Степанова М.Ю.* Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов // Физика Земли. 2008. № 1. С. 57-67.
- 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.
- Губайдулин М.Г.* Физико-геологические модели поисковых объектов // Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Геоэкологические проблемы / Отв. ред. Ф.Н. Юдахин Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 57-63.
- Еременко А.В., Ненахов В.М.* Геология и геодинамическая модель формирования трубок взрыва Архангельской алмазоносной провинции // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. 2002. № 1. С. 36-42.
- 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, ОАО «ИПП Правда Севера», 2004. 268 с.
- Монахов Ф.И.* Низкочастотный сейсмический шум Земли. М.: Наука, 1977. 96 с.
- Рябинкин Л.А.* Методы и модификации сейсморазведки // Сейсморазведка. М.: Недра, 1981. 464 с.
- Синицын А.В., Дауев Ю.М., Гриб В.П.* Структурное положение и продуктивность кимберлитов Архангельской провинции // Геология и геофизика. 1992. № 10. С. 74-83.

## A METHOD OF MICROSEISMIC SOUNDING TO STUDY THE LOMONOSOV PIPE EXPLOSION, ARKHANGELSK DIAMONDIFEROUS PROVINCE

**K.B. Danilov**

*Institute of Ecological Problems in the North of UB RAS, Arkhangelsk, 163000*

The article describes disclosing of tubes caused by the explosion in Arkhangelsk Diamondiferous Province using a method of microseismic sounding. The method is based on statistical approach for analyzing of microseismic field. The paper provides various options for additional processing of benchmark data.

*Keywords: microseismic sounding, kimberlite pipe explosion.*