

ДАНИЛОВ Константин Борисович

**ВЫЯВЛЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В
ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
НИЗКОЧАСТОТНЫХ МИКРОСЕЙСМ
(НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА РАН)

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук, доцент

Французова Валентина Ивановна

Официальные оппоненты:
член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор Российской академии наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Собисевич Алексей Леонидович,

Кандидат технических наук,
заместитель генерального
директора по науке
ООО "Градиент"

Биряльцев Евгений Васильевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук (Кар НЦ РАН) г. Петрозаводск

Защита состоится _____ в _____ на заседании диссертационного совета Д002.050.01, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте idg.chph.ras.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.050.01
кандидат физико-математических наук



Виноградов Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В последние десятилетия большое внимание уделяется комплексному изучению платформенных территорий. Архангельская область, расположенная на севере Русской плиты Восточно-Европейской платформы, является хорошим полигоном для апробации и разработки различных сейсмических методик. Геофизические задачи, рассматриваемые в диссертационной работе, связаны с чрезвычайно важной проблемой – освоения новых месторождений полезных ископаемых на территории Севера Русской плиты. Наличие алмазоносных, бокситовых и других месторождений полезных ископаемых на территории Архангельской области, как части этой территории, повышает актуальность проведения исследований и дает практическую значимость работе.

Территория Севера Русской плиты исследована различными геолого-геофизическими методами, в том числе, и сейсморазведкой. Но подавляющий объем работ был сосредоточен в местах, перспективных на новые месторождения углеводородов и алмазов. Как следствие, многие геологические карты согласуются друг с другом в общем плане. При этом, зачастую, на них отмечаются различные положения границ структурных элементов, разломных нарушений и даже названия. В свою очередь, достоверная информация о строении земной коры используется во многих задачах практической деятельности. В частности, при анализе результатов сейсмического мониторинга с целью прогнозирования природных и техногенных катастроф и уменьшения их последствий.

На сегодняшний день Архангельская алмазоносная провинция (ААП) является второй после Якутии территорией Российской Федерации с разведанными запасами коренных месторождений алмазов. На территории ААП, кроме двух коренных месторождений алмазов (им. М.В. Ломоносова и им. В.В. Гриба), известно около 90 трубок и силлов щелочных ультраосновных пород [Головин Н.Н., 2004].

Особенностью залегания кимберлитовых трубок ААП является перекрытие толстым слоем (до 100 м) рыхлых отложений (песок, глина). Глубина залегания основного тела трубок порядка 600 м. Размеры примерно такие: внизу, у основания, 100 м, наверху 300 м – форма в виде перевернутого конуса [Милашев, 1984]. Основными факторами, снижающими эффективность поиска коренных месторождений алмазов в пределах ААП, являются [Ключников, 2003; Кутинов, Чистова, 2004]:

- наличие сплошного покрова перекрывающих пород переменной мощности (четвертичные образования и палеозойские отложения);
- высокая литолого-фациальная изменчивость и неоднородность перекрывающей толщи как по латерали, так и по вертикали, особенно, это касается четвертичных осадков;
- значительные вариации физических свойств, вмещающих и перекрывающих диатремы, пород;

- слабая контрастность в физических полях кимберлитовых тел;
- несовершенство методик обработки и интерпретации геофизических материалов при поисках, слабо выражающихся в аномальных физических полях, кимберлитовых тел;
 - эрозия наиболее намагниченной кратерной части трубок;
 - возможные малые размеры трубок;
 - наличие объектов «помех»;
 - вероятность пропуска слабых магнитных аномалий, даже при высокоточной магниторазведке;
 - практическое отсутствие определенных параметров, свойственных именно трубкам взрыва.

Перечисленные выше факты говорят о необходимости дополнительного изучения земной коры Севера Русской плиты. Решение данной задачи путем дополнительных геолого-геофизических работ не всегда эффективно. Этому способствуют наличие обширной труднодоступной территории, что обуславливает, в свою очередь, высокие затраты на проведение подобных работ. Следует отметить и такой методический фактор, как сложность выделения вертикальных заглубленных тел по данным большинства традиционных методов. Вертикальными телами в данном случае являются границы структурных элементов, разломные нарушения и трубки взрыва. Для дополнительного исследования территории Севера Русской плиты целесообразно использовать более дешевые методики, позволяющие получать необходимую информацию с минимальными затратами.

В последнее время, большое внимание уделяется пассивным методам исследования земной коры, среди которых отметим методы, использующие в качестве полезного сигнала микросейсмические колебания. Относительно простая и дешевая реализация методов, основанных на анализе микросейсм, обусловлена постоянным наличием зондируемого сигнала [Николаев, 1997; Горбатилов и др., 2006; Юдахин и др., 2008; Данилов, 2011].

Среди существующих методов выделим метод микросейсмического зондирования, предложенный А.А. Горбатиловым [Горбатилов, 2006]. Указанный метод обладает рядом важных преимуществ. Анализ пространственных вариаций амплитудно-частотных характеристик микросейсм позволяет достигнуть более высокого пространственного разрешения, чем многие методы сейсмической томографии. Кроме того, автономность и малогабаритность современных комплектов сейсмических станций обуславливают возможность реализации метода на труднодоступных и ранимых территориях, в том числе арктических.

Метод микросейсмического зондирования был успешно опробован на ряде геологических объектов в различных частях земного шара [Горбатилов, и др., 2007, 2008, а,в,г, 2009; Gorbatikov et al., 2013], для северных территорий подобной апробации не проводилось.

В силу указанных причин, начатые исследования по изучению структуры земной коры и поиску трубок взрыва с использованием метода микросейсмического зондирования, весьма актуальны.

Цель диссертационной работы – определить возможности метода микросейсмического зондирования по исследованию трубок взрыва и субвертикальных структур земной коры на Севере Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря.

Основными задачами исследования являются:

определить предел применимости метода микросейсмического зондирования, обусловленный нестабильностью микросейсмических колебаний;

разработать программное обеспечение для обработки микросейсмических колебаний;

провести экспериментальную апробацию метода микросейсмического зондирования на таких объектах, как структурные элементы, разломные нарушения и трубки взрыва в пределах территории Севера Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря;

определить особенности проявления различных геологических объектов по данным метода микросейсмического зондирования;

показать возможность использования метода микросейсмического зондирования для выявления локальных участков, потенциально связанных с трубками взрыва

показать возможность использования метода микросейсмического зондирования для уточнения информации о строении земной коры.

Научная новизна и практическая значимость. Метод микросейсмического зондирования впервые рассматривался как инструмент исследования территорий Севера Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря. В диссертационной работе определен круг вопросов, решаемых методом микросейсмического зондирования, связанных с уточнением строения земной коры исследуемой территории. Показаны примеры решения данных задач.

В диссертационной работе исследована точность определения спектральных амплитуд и относительной интенсивности микросейсм при накоплении микросейсмического сигнала за различные периоды времени. Полученные результаты позволили более обоснованно интерпретировать выделяемые зоны интенсификации как скоростные неоднородности геологической среды.

Показаны возможности метода микросейсмического зондирования при исследовании трубок взрыва Архангельской алмазонасной провинции и строения земной коры Севера Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря.

В диссертационной работе были исследованы трубки взрыва М.В. Ломоносова и Пионерская Золотицкого, С10 Ненокского и Чидвинская Ижмозерского полей ААП. Также проведены работы на «ложной» магнитной аномалии.

В работе проведено уточнение глубинного строения Онежско-Кандалакшского рифта, Архангельского и Карельского выступов, Лешуконского рифта, Товского выступа, Керецко-Пинежского рифта. А также исследован локальный участок на острове Земля Александры арх. Земля Франца-Иосифа.

Для оперативной обработки полевого материала был разработан программный комплекс ДАК [Попов, Данилов, Иванова, 2011], позволяющий обрабатывать записи микросейсм. Особенностью данного программного обеспечения в использовании общей с WSG (программный комплекс для обработки сейсмических записей) базы данных, что значительно облегчает и ускоряет работу с микросейсмическими записями. Программный комплекс был использован при исследовании земной коры Эльбруса и его предгорья методом микросейсмического зондирования, что подтверждается актом о внедрении № 125/307 от 24.02.12, выданным в КБГУ им. Х.М. Бербекова.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности зондирования земной коры Севера Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря.

Обоснованность результатов определяется использованием калиброванной аппаратуры, подтверждается статистическим анализом и повторяемостью результатов и экспериментальными исследованиями.

Личный вклад автора заключается в постановке и проведении экспериментов, обработке полученных данных и анализе полученных результатов. Автором предложена методика анализа стабильности микросейсм, результаты которой выносятся на защиту. Автор принимал участие в установке стационарной сейсмической станции ZFI (о. Александры арх. Земля Франца-Иосифа), данные которой использовались для анализа стабильности микросейсм. В работе по созданию программного комплекса выполненного с соавторами, автор участвовал на этапах: разработки принципиальной структуры, отладки и тестирования на реальных данных.

Защищаемые положения:

1. Точность определения спектральных амплитуд и относительной интенсивности микросейсм слабо зависит от пункта наблюдения и может быть повышена путем накопления сигнала до 4 часов, при оптимальном периоде накопления 1.5 часа, позволяющим определять относительную интенсивность микросейсм с точностью 1 дБ для частот 0.5 – 1.5 Гц и 2 дБ - для частот 1.5-8 Гц. Как следствие, соответствующими значениями определяется шаг по шкале интенсивности.

2. Трубки взрыва Архангельской алмазоносной провинции проявляются по данным метода микросейсмического зондирования в виде деформированного конусообразного тела, перевернутого вершиной вниз. При этом метод позволяет достаточно надежно выделять и проследивать рудовмещающие зоны тектонических нарушений в вендском цоколе и уточнять параметры трубок. Поисковая глубинность составляет порядка 1-2 км.

3. По данным метода микросейсмического зондирования на Севере Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря достаточно уверенно проявляются характерные структуры верхней части земной коры (до 15 км), в том числе: субвертикальные границы структурных элементов, разломные нарушения различного характера.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Пятое научные чтения памяти Ю.П. Булашевича «Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей». Екатеринбург, 2009; Международный симпозиум «Экология Арктических и приарктических территорий». Архангельск, 2010; XVI Международная конференция «Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы». Воронеж, 2010; XII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Пермь, 2011; Международная конференция «Развитие академической науки на родине М.В. Ломоносова». Архангельск, 2011; IV Международная молодежная научная конференция «Экология 2011». Архангельск, 2011; XIII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Екатеринбург; Экология и геологические изменения в окружающей среде Северных регионов. Архангельск, 2012; Девятая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», Ереван, 2014; V Международная молодежная научная конференция «Экология-2015».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 30 работ, в том числе 7 статей в журналах из списка ВАК.

Исследования проводились в рамках тем НИР лаборатории с № гос. регистрации 0120.0952768 и № 0410-2014-0031, Гос. контрактов № 14.740.11.0195 и № 8331, гранта Президента МК – 6178.2012.5.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, 61 рисунков, 3 таблиц, заключения. Объем работы 181 страница, библиография включает 172 наименования.

В первой главе проведен обзор геолого-геофизических сведений о строении земной коры Севера Русской плиты, активных сейсмических методов и методов сейсмической томографии. В главе обоснован выбор метода микросейсмического зондирования (ММЗ). Рассмотрены физические явления, на которых основан метод и методические особенности его реализации.

Во второй главе представлено описание, использованной в работе, аппаратуры и программного комплекса ДАК.

Третья глава посвящена исследованию временной нестабильности микросейсм. В работе рассчитаны точность определения спектральных амплитуд и точность относительной интенсивности в зависимости от периода накопления микросейсм в различных пунктах рассматриваемой территории.

Четвертая глава посвящена изучению структурных особенностей проявления трубок взрыва Архангельской алмазонасной провинции по данным ММЗ. В первой части главы описаны геофизические предпосылки и практика поиска трубок взрыва. Во второй части главы обсуждаются результаты полевых работ на трубках М.В. Ломоносова и Пионерская Золотицкого, С10 Ненокского и Чидвинская Ижмозерского полей ААП, а также на «ложной» магнитной аномалии.

В пятой главе рассматриваются вопросы применимости ММЗ для исследования структурных элементов Севера Русской плиты по результатам исследований вдоль четырех профилей, расположенных в пределах Карельского выступа, Онежско-Кандалакшского рифта, Архангельского выступа, Керецко-Пинежский рифта, Товского выступа и Лешуконского рифта.

Шестая глава посвящена экспериментальной проверке применимости ММЗ на северной оконечности шельфа Баренцева моря, на примере острова Александры архипелага Земля Франца-Иосифа. В шестой главе в первой части дан краткий обзор известной по публикациям геолого-геофизической информации по исследуемому объекту. Во второй части главы представлены результаты экспериментальных работ.

Основные выводы сформулированы в конце каждой главы и в заключении.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, кандидату физико-математических наук, доценту Валентине Ивановне Французовой. Автор благодарит за ценные консультации и плодотворную дискуссию кандидата физико-математических наук Горбатикова Андрея Вениаминовича. Особенную признательность за совместную работу над программным обеспечением автор выражает Попову Дмитрию Владимировичу. Признательность автор адресует члену-корреспонденту РАН, доктору геол.-мин. наук, профессору Феликсу Николаевичу Юдахину, а также члену-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук Николаеву Алексею Всеволодовичу. За творческое общение и дискуссии по отдельным вопросам работы автор признателен сотрудникам лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН к.т.н. Г.Н. Антоновской, д.ф.-м.н. Н.К. Капустян., к.ф.-м.н. Е.В. Шаховой, к.т.н. А.Н. Морозову, к.г.-м.н. Н.В. Вагановой, к.г.-м.н. И.М. Басакиной, сотрудникам ИФЗ РАН д.ф.-м.н. члену-корреспонденту РАН, профессору РАН А.Л. Собисевичу, д.т.н., профессору Л.Е. Собисевичу, д.ф.-м.н., профессору А.Д. Завьялову, к.ф.-м.н. Р.А. Жосткову, а также сотруднику НИГП ЦНИГРИ, к.г.-м.н. В.В. Третьяченко. За ценные замечания автор благодарит д.г.-м.н. В.И. Макарова, д.г.-м.н. Ю.Г. Кутинова, к.ф.-м.н. Ю.К. Долманцева. За совместную работу и всестороннюю помощь автор благодарит Д.Е. Горлова, сотрудников Геофизической службы РАН Я.В. Конечную, А.С. Анисимова, Е.В. Иванову.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 дана общая характеристика геологического строения севера Русской плиты Восточно-Европейской платформы: глубинное строение, основные результаты сейсмических исследований. В частности, дана характеристика Беломорского, Кольского и Карельского мегаблоков, Архангельской алмазоносной провинции [Макаров, 1996; Юдахин и др., 2003; Кутинов, Чистова, 2004], описаны основные характеристики микросейсмического поля колебаний [Рыкунов, 1967; Винник, 1968; Бат, 1980; Vonnefoy-Claudet, 2006] основные направления, использующие микросейсмизм как зондирующий сигнал [Горбатиков и др., 2008, д]. В главе приведен краткий обзор активных

сейсмических методов и методов сейсмической томографии [Гурвич, Знаменский, 1990; Николаев, 1997; Яновская, 1997]. В главе обоснован выбор метода микросейсмического зондирования (ММЗ). Рассмотрены физические явления, на которых основан метод и методические особенности его реализации.

Геологическая среда на территории Архангельской области имеет сложное строение. Земная кора раздроблена на отдельные блоки с различными скоростными свойствами, в ее верхней части преобладает вертикальная делимость. В геологической среде наблюдается изменчивость скоростных неоднородностей среды и вариаций их в пространстве и во времени. Такие вариации характерны как для крупномасштабных, так и для локальных неоднородностей коры и мантии.

Активные сейсмические методы и методы томографии хорошо зарекомендовали себя. Но активные сейсмические методы достаточно трудоемкие при их реализации и нацелены в основном на субгоризонтальные границы. Методы томографии, преимущественно, анализируют сигнал волны от удаленных источников, что затрудняет исследование локальных объектов.

Таким образом, для повышения эффективности геофизических исследований требуется метод простой в реализации, нацеленной преимущественно на субвертикальные неоднородности и характеризующийся минимальным вмешательством в окружающую среду. Данным требованиям соответствует метод микросейсмического зондирования (ММЗ).

Метод реализуется в предположении, что вклад в вертикальную компоненту микросейсмического поля в диапазоне от 0.03 Гц до 1.5 Гц обеспечивается в большей мере фундаментальными модами волны Рэлея и частично объемными волнами. В свою очередь при взаимодействии фундаментальной моды волны Рэлея с низкоскоростной неоднородностью на земной поверхности наблюдается увеличение интенсивности колебаний, при взаимодействии с высокоскоростной неоднородностью – уменьшение. С целью устранения влияния временного тренда интенсивность микросейсм рассчитывается относительно опорной станции по формуле:

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

Где I_{fi} – относительная интенсивность микросейсм; f – анализируемая частота; i – пункт замеров микросейсм; A_{fi}^p и A_{fi}^o – спектральные амплитуды записей передвижной и опорной станций соответственно. Для определения статистически устойчивого спектра в каждом пункте наблюдения производится накопление сигнала в течение 1.5 часов. По результатам математического моделирования было показано, что волны наиболее контрастно реагирует на неоднородности, залегающие на глубине примерно 0.4 от длины волны. Так зондируемая глубина рассчитывается по формуле

$$H(f) \approx 0.4 V_R(f) / f$$

где $H(f)$ – зондируемая глубина; $V_R(f)$ – скорость фундаментальной волны Рэлея на частоте f .

Результатом обработки данных по методу микросейсмического зондирования является диаграмма распределения относительной интенсивности микросейсм (I_{hi}) вдоль профиля и по глубине. Зоны пониженных значений I_{hi} отражают высокоскоростные зоны, зоны повышенных значений I_{hi} - низкоскоростные зоны [Горбатиков, Цуканов, 2011].

Согласно результатам математического моделирования [Горбатиков, Цуканов, 2011] ММЗ позволяет выделять объекты с размерами около 0.07 от глубины их залегания с разрешающей способностью по горизонтали примерно 0.6 от глубины залегания. С учетом того, что трубки взрыва ААП перекрыты слоем в 50-100 м, ММЗ позволяет выделять трубки с горизонтальным размером более 7 м и исследовать глубинное строение тел с горизонтальными размерами более 30-60 м. Так как разведанные трубки имеют размеры более 50 м, а промышленно алмазоносные – 400-600 м [Губайдулин, 2001; Кутинов, Чистова, 2004; Стогний, Коротков, 2010], ММЗ применим для поиска трубок ААП.

Шаг замеров может выбираться, исходя из того, что наибольшая достоверность исследований достигается при условии попадания в зону разрешения 3-5 пунктов замеров. Таким образом, для максимального качества данных шаг между пунктами замеров должен составлять 10-30 м. В случаях, когда заведомо известны размеры исследуемого объекта, шаг может быть увеличен.

В качестве недостатков ММЗ можно отметить низкую разрешающую способность по вертикали и необходимость использования дисперсионной кривой фазовой скорости основной моды волн Релея для определения глубин. В плане проведения работ по ММЗ на Севере Русской плиты, на данный момент, открытым вопросом является возможность применения ММЗ на территории водных акваторий.

При этом ММЗ позволяет:

- использовать фоновые микросейсм в качестве зондирующего сигнала;
- производить изучение геологической среды на глубинах от нескольких метров до десятков километров;
- получать разрезы с приемлемым разрешением (по горизонтали 0,6, а по вертикали 1 глубина от глубины залегания разрешаемых неоднородностей);
- определять центры объектов с размерами, меньшими разрешающей способности метода;
- определять субвертикальные границы объектов с линейными размерами, сравнимыми с глубиной их залегания.

Представляется, оптимальной для ММЗ, возможность комплексирования его с методами, позволяющими определять горизонтальные границы и скоростные разрезы. ММЗ может дополнять и уточнять информацию, полученную по данным сейсмотомографии и сейсморазведки. Применение ММЗ на рекогносцировочном этапе позволит оперативно получать априорную информацию об исследуемом объекте и более уверенно планировать комплекс основных геолого-геофизических работ.

В главе 2 представлено описание используемой сейсмической аппаратуры и используемого программного обеспечения.

При апробации ММЗ для геологических особенностей Архангельской области использовалась сейсмическая аппаратура с различными характеристиками. Это велосиметры фирмы Guralp, Англия (CMG-40T, CMG-6TD, CMG-3ESP) и маятники отечественного производства (СМЗ-КВ, СМЗ-ОС). В качестве регистраторов – GSR-24 (Швейцария) и UGRA, КБС (Россия). Наиболее удобным вариантом при проведении исследований ММЗ являются датчики CMG-6TD с встроенным регистратором. Использование комплекта-регистратор UGRA с маятниками СМЗ-КВ является неплохим вариантом, минусами являются трудности транспортировки СМЗ-КВ и более длительное время на их установку.

Для обработки данных был создан программный комплекс ДАК [Попов, и др., 2013]. Причиной создания данного программного комплекса послужило практическое отсутствие специализированного программного продукта для обработки записей микросейсм по методу микросейсмического зондирования. В связи с необходимостью разносторонней обработки больших объемов данных было организовано взаимодействие программы ДАК с базой данных программного комплекса обработки сейсмических данных WSG [Красилов, Пойгина, 2005].

Алгоритм обработки данных по ММЗ в программе ДАК представляет собой гибкую цепочку действий, настраиваемую обработчиком. Структура обработки данных представлена на схеме (рис. 1), где тонкими стрелками указаны альтернативные или необязательные шаги в алгоритме. Основу обработки данных по ММЗ составляет расчет относительной интенсивности микросейсм по данным передвижной и опорной станций. Требуемую величину можно рассчитать по двум алгоритмам. Первый, согласно методике [Горбатилов и др., 2008,2], производит нормирование данных передвижной станции на данные опорной. Второй алгоритм обработки данных исключает из процесса обработки нормирование станций [Попов и др., 2013]. Это позволяет обработать данные в случае сбоя (потери данных) во время нормирования станций.



Рисунок 1 – Структура обработки данных по ММЗ в ДАК (Попов, и др., 2013)

В программном комплексе ДАК реализован ряд процедур [Попов и др., 2013]. Процедура «огибания» позволяет выделить узкополосные пики из общего набора значений в спектре. Использование процедуры «усреднения» наоборот исключает пиковые значения и приводит к среднему значению для полосы частот в спектре. Процедура выравнивания волновых форм сводит к минимуму смещения нулевого уровня колебаний маятника. Использование различных процедур позволяет подобрать наиболее оптимальный набор параметров для обработки. Функция кэширования запоминает результаты отбраковки и позволяет их использовать при других параметрах обсчета спектров. Программный комплекс позволяет производить обработку при использовании нескольких передвижных станций. Малые системные требования позволяют использовать ДАК как в лабораторных, так и в полевых условиях.

На сегодняшний день программный комплекс ДАК является самостоятельным, многофункциональным инструментом, позволяющим обрабатывать данные, полученные методом микросейсмического зондирования. Лаконичный интерфейс программы, в свою очередь, существенно облегчает процесс обработки. Наличие альтернативного алгоритма расчета, возможности обработки спектров и выравнивания волновых форм позволяет повысить качество интерпретируемого материала, при этом программный комплекс ДАК может легко дополняться и видоизменяться в связи с его многоуровневой организацией.

Глава 3 посвящена вопросу точности определения спектральных амплитуд и относительной интенсивности микросейсм на территории Архангельской области при накоплении сигнала. Данные работы важны в виду того, что относительная интенсивность является информативным параметром, определяемым в методе микросейсмического зондирования. При этом ранее определялся только период

стационарности микросейсм, который, в подавляющей части исследуемых территорий, составлял 1.5 часа, но в некоторых пунктах достигал и 4 часов.

Для анализа привлекались записи стационарных сейсмических станций Архангельской сейсмической сети: Земля Франца-Иосифа (ZFI), Тамица (TMC), Климовская (KLM). На записях станций выбиралось по 30 отрезков записей длительностью более 4 часов. При этом к выбранным данным предъявлялись требования их регистрации при штатной работе аппаратуры и отсутствия видимых шумовых воздействий на волновые формы в подавляющей продолжительности записи. По выбранным отрезкам вертикальных каналов рассчитывались средние значения амплитудных спектров в определенных диапазонах частот в 5 минутных окнах. Для анализа рассматривались результаты по накоплениям сигналов длительностью в 30, 60, 90 и 240 минут.

Для каждого отрезка накопления рассчитывалось его среднее значение и среднеквадратическая погрешность, по которым оценивалась относительная погрешность для каждого рассматриваемого отрезка записи. В диссертационной работе показано, что абсолютная погрешность определения относительной интенсивности микросейсм прямо пропорциональна относительной погрешности определения спектральной амплитуды.

По результатам проведенных работ выявлено, что наиболее оптимальным является период наблюдения в течение 90 минут. При накоплении сигнала 90 минут [Danilov, 2017]:

- для частот 0.5-1.5 Гц точность определения относительной интенсивности близка к 1 дБ;

- на частотах 1.5-8.5 Гц погрешность менее 2 дБ для станций KLM, ZFI;

- наибольшая погрешность наблюдается по данным станции TMC до 8 дБ.

Данный факт, возможно, связан с особенностями деловой активности в пункте установки станции TMC.

Точности определения относительной интенсивности микросейсм можно повысить на 15-40 % путем увеличения длительности измерений до 240 минут.

Основываясь на результатах математического моделирования [Горбатиков, Цуканов, 2011] минимальный градиент в 1 дБ соответствует градиенту скоростей поперечных волн 10-15 %. Таким образом, приведенные выше факты свидетельствуют о возможности использования ММЗ [Danilov, 2017].

В главе 4 продемонстрирована возможность использования микросейсмических колебаний для поиска и изучения трубок взрыва Архангельской алмазоносной провинции (ААП). Рассмотрены геофизические предпосылки и признаки трубок взрыва как объектов поиска.

ААП состоит из пяти кимберлитовых полей: Золотицкое, Кепинское, Верхотинское, Чидвинско-Ижмозерское, Ненокское [Еременко, Ненахов, 2002]. Все продуктивные трубки взрыва расположены на территории Зимнего Берега Архангельской области.

По величине разведанных запасов Архангельская алмазоносная провинция (ААП) является второй в России. Но на данный момент отмечается резкое снижение эффективности поисковых работ [Стогний, Коротков, 2010].

Характерной чертой трубок взрыва является их строение в форме конуса, обращенного вершиной вниз [Милашев, 1984]. Кроме того, трубки имеют достаточно малые размеры по горизонтали (от 50 м до 1 км) и перекрыты мощным слоем осадочных отложений (50 м -100 м) [Губайдулин, 2001; Кутинов, Чистова, 2004], что существенно затрудняет их поиск. Также следует учитывать и то, что часть территорий ААП располагается в пределах заповедников, что затрудняет техногенную деятельность. Как следствие, для поиска и разведки трубок взрыва целесообразно использовать методы простые в реализации, нацеленные на выделение субвертикальных неоднородностей, характеризующиеся минимальным вмешательством в окружающую среду. Данным требованиям соответствует метод микросейсмического зондирования (ММЗ) [Горбатиков и др., 2008].

Метод микросейсмического зондирования опробован на четырех трубках взрыва: трубка им. М.В. Ломоносова и Пионерская (входят в состав месторождения им. М.В. Ломоносова), Чидвинская (Чидвинско-Ижмозерского поля) и С10 (Ненокского поля). При поиске трубок взрыва главными объектами-помехами являются приповерхностные неоднородности и ложные магнитные аномалии [Кутинов, Чистова, 2004]. Чтобы проверить, как данные объекты влияют на результаты метода, были обследованы: ложная магнитная аномалия G23 и северный борт трубки Ломоносова, примыкающий к палеодолине.

По результатам проведенных работ (рис. 2) показано, что по данным метода микросейсмического зондирования трубки взрыва проявляются как в виде высокоскоростных, так и в виде низкоскоростных неоднородностей. Также встречаются блоки трубок, близкие по своим свойствам к вмещающей среде. Но во всех случаях трубки проявились в форме деформированного конуса на глубинах до 2 км [Киселев и др., 2016; Франгузова, Данилов, 2016].

Во вмещающей среде трубок Ломоносова, Чидвинская и С10 (рис. 2) уверенно проявились контролирующие их разломные нарушения. Отсутствие разломных нарушений на профиле, пересекающем трубку Пионерская (рис. 1б), объясняется тем, что профиль направлен параллельно разломным нарушениям, отмеченным в работе [Стогний, Коротков, 2010]. Из представленных данных можно сделать вывод о том, что ММЗ позволяет выделять и картировать рудовмещающие разломы.

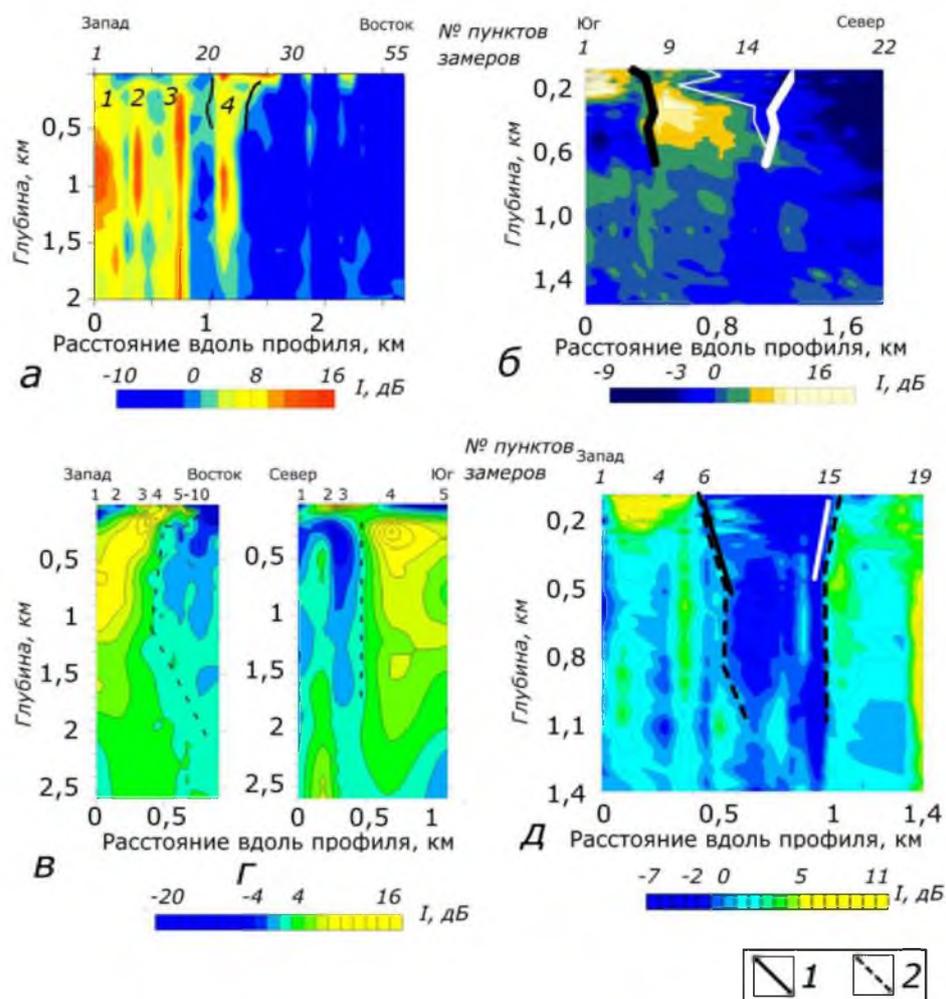


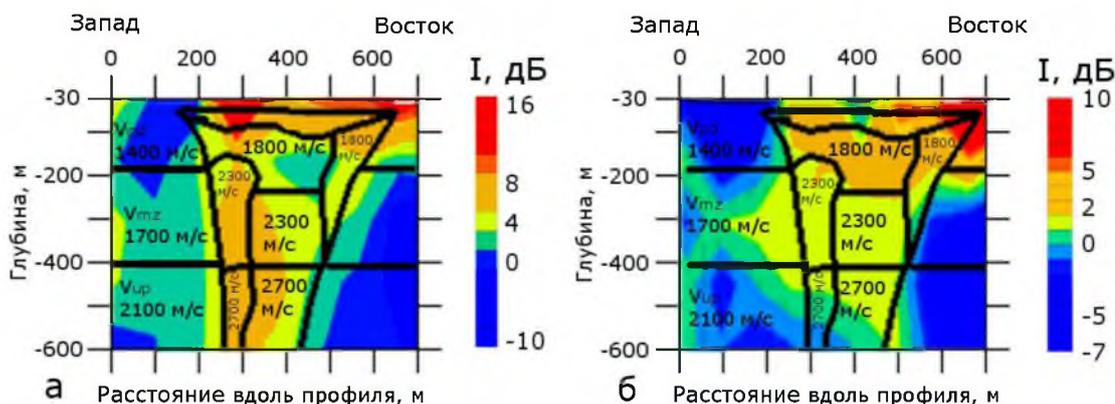
Рисунок 2 - Результаты обработки данных вдоль профилей пересекающих трубки взрыва: а – Ломоносова; б – Пионерская; в,г – С10; д – Чидвинская; 1 – граница трубок и фаз внедрения по данным бурения [Вержак и др., 1987]; 2 – выделяемые аномалии.

Также из всех представленных материалов видно, что по данным ММЗ проявляются различные блоки трубок. Данный факт указывает на то, что метод потенциально перспективен для детального изучения трубок. В частности, на примере трубки С10 видно, что ее западная сторона срезана на глубинах 70-150 м., в то время как восточная сторона трубки приближается к поверхности менее чем на 70 м. Очевидно, что данная информация может быть полезна не только при доизучении объектов, но и при определении пунктов бурения заверочных скважин.

Ложные магнитные аномалии и примыкающие к трубкам взрыва приповерхностные неоднородности являются основными объектами - помехами для большинства применяемых методов поиска трубок. В виду высокой разрешающей способности по горизонтали и способности локализовывать различные неоднородности метод микросейсмического зондирования менее зависим от подобных помех. Проведенные экспериментальные работы подтвердили данное предположение. Так, под ложной аномалией было выделено низкоскоростное тело в приповерхностной части. Трубочного тела в районе ложной магнитной аномалии не отобразилось. Северный борт трубки Ломоносова

отобразился на данных ММЗ уверенно и хорошо согласовался с данными бурения.

С целью проверки достоверности детальной картины, полученной по данным ММЗ, было произведено сопоставление результатов ММЗ с известными геолого-геофизическими данными. В виду того, что ММЗ отражает распределение физических параметров в среде, справедливо провести сравнение результатов ММЗ с физическими моделями. Для трубок взрыва месторождения им. Ломоносова известны скоростная [Кутинов, Чистова, 2004] и физико-геологическая модели [Губайдуллин, 2001]. На рисунке 6 показано сопоставление результатов ММЗ со скоростной моделью трубки взрыва, где наблюдается приемлемое согласие. При этом по интенсивности микросейсм в трубке выделяются различные зоны с равными значениями скоростей продольных волн. Можно предположить, что трубка в центральной части имеет наиболее консолидированный характер, что отражается в виде низкоинтенсивной зоны (высокоскоростной зоны) на глубинах от 100 до 300 м по данным первого профиля. Наиболее раздробленная часть трубки взрыва, в свою очередь, приурочена к западному борту трубки.



а – профиль 1; б – профиль 2

V_{pd} , V_{mz} , V_{up} – слои венда: падунский, мезенский, устьпинежский

Рисунок 3 – Глубинные разрезы относительной интенсивности микросейсмического поля вдоль профилей, пересекающих трубку взрыва им. М.В. Ломоносова, с наложением скоростной модели трубки взрыва

При сопоставлении результатов ММЗ с физико-геологической моделью [Губайдуллин, 2001] также были выделены все три блока трубки. Верхний слой проявляется на глубинах от 100 до 200 м в виде высокоскоростного слоя на первом профиле и в виде низкоскоростного слоя на втором профиле. На глубинах более 200 м отдельные слои трубки выделяется по данным только первого профиля. При этом наиболее низкоскоростная часть трубки выделяется с запада, что согласуется с данными физико-геологической модели.

Более полное совпадение результатов первого профиля и известных физических моделей можно объяснить тем, что первый профиль проходит близко к корню трубки и дает наиболее полную информацию о строении трубки им. Ломоносова.

На рисунке 4 показано наложение границ, выделенных по данным геоэлектрических исследований [Стогний, Коротков, 2010], на результаты ММЗ. Следует отметить совпадение зоны повышенной проводимости внутри трубки с зоной повышенных значений интенсивности микросейсм в западной части трубки. С запада от трубки зона разгрузки минерализованных вод, выделенная электроразведкой, характеризуется повышенными значениями относительной интенсивности микросейсм. Последнее, скорее всего, обусловлено раздробленным строением зоны разгрузки минерализованных вод. Непосредственно под зоной разгрузки минерализованных вод выпуклая часть нижнего слоя (глубина 100-200м) описывается верхней частью контрастных высокоинтенсивных зон. Из чего можно предположить, что выпуклая часть нижнего слоя обусловлена поднятием, сопровождающимся разломными процессами. Вертикальные контрастные низкоскоростные зоны, прослеживаются до глубин более чем 2 км. Вероятно, контрастные зоны обусловлены тектоническими нарушениями, выполняющими роль подводящих каналов для зоны разгрузки минерализованных вод. Таким образом, данные ММЗ согласуются с результатами электроразведки и дополняют их картированием подводящих каналов трубки взрыва и зон разгрузки минерализованных вод.

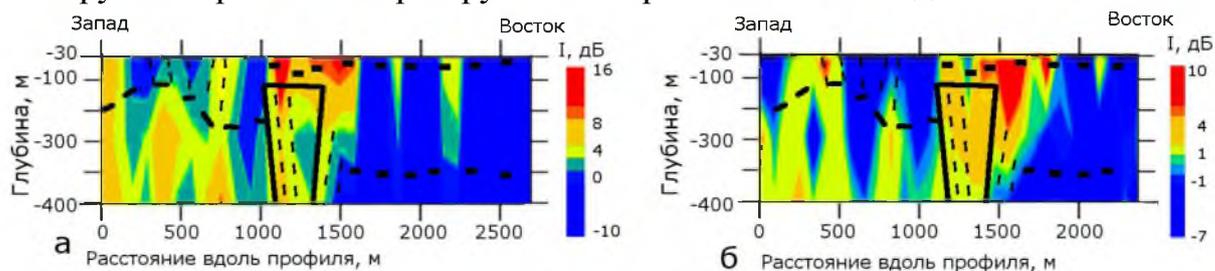


Рисунок 4 – Глубинные разрезы относительной интенсивности микросейсмического поля вдоль профилей, пересекающих трубку взрыва им. М.В. Ломоносова глубиной до 400 м, с наложением границ выделенных по данным электроразведки [Стогний, Коротков, 2010]

Представленные результаты показывают, что ММЗ отражает детальную структуру трубки взрыва и вмещающей среды, дополняет применяющиеся на практике геофизические методы.

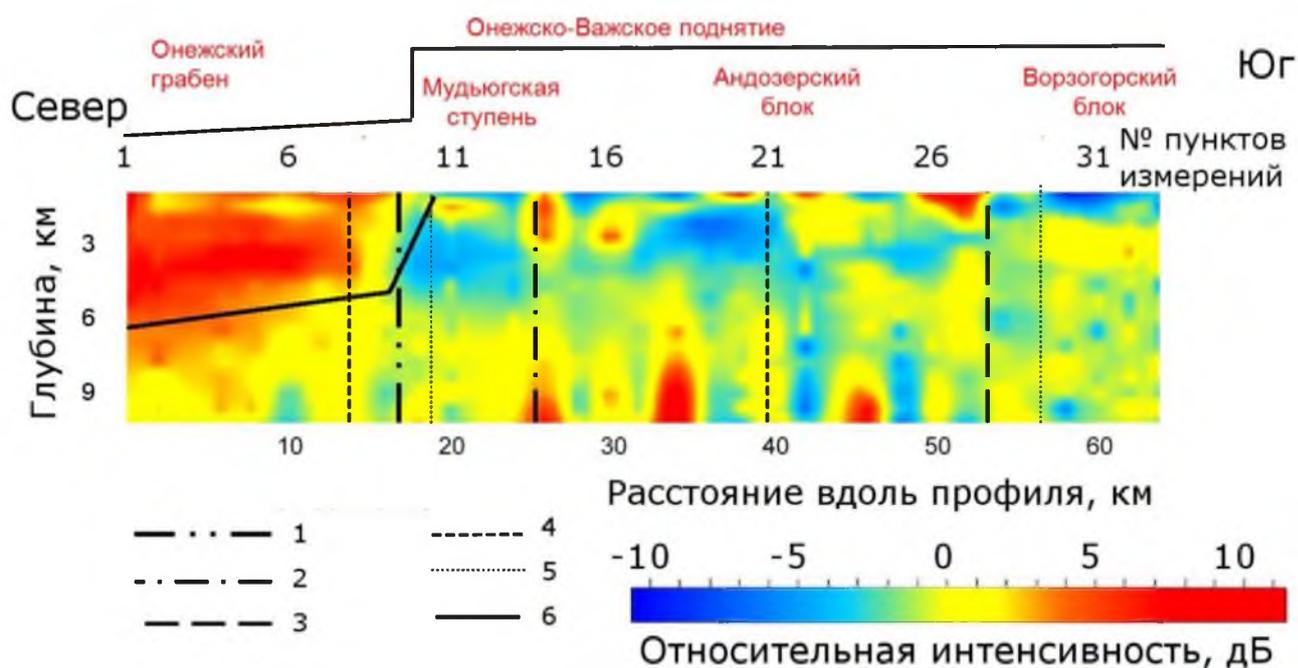
Проведенные работы показали, что трубки взрыва Архангельской алмазонасной провинции проявляются по данным метода микросейсмического зондирования в виде деформированного конусообразного тела, перевернутого вершиной вниз. Данные, получаемые с помощью ММЗ, могут быть использованы для уточнения глубинного строения трубок взрыва ААП и, в частности, для определения пунктов заверочного бурения. При этом метод позволяет достаточно надежно выделять и прослеживать рудовмещающие зоны тектонических нарушений в вендском цоколе. Поисковая глубинность составляет порядка 1-2 км. При этом ММЗ позволяет определять отсутствие трубчатого тела в районе ложных аномалий и исследовать трубки, примыкающие к приповерхностным неоднородностям.

В главе 5 представлены результаты исследования особенностей уточнения строения земной коры Севера Русской плиты по данным метода

микросейсмического зондирования. Исследования проходили вдоль четырех профилей Кянда-Ворзогоры, Палово-Самодед, Самодед-Малиновка и Гриба-Ижма [Французова, и др., 2013; Danilov, 2017]. Их общая протяженность составляет 250 км. Всего профили включают в себя 104 пункта замеров микросейсм.

Профиль Кянда–Ворзогоры проходит по Онежскому грабену и Онежско-Важскому поднятию.

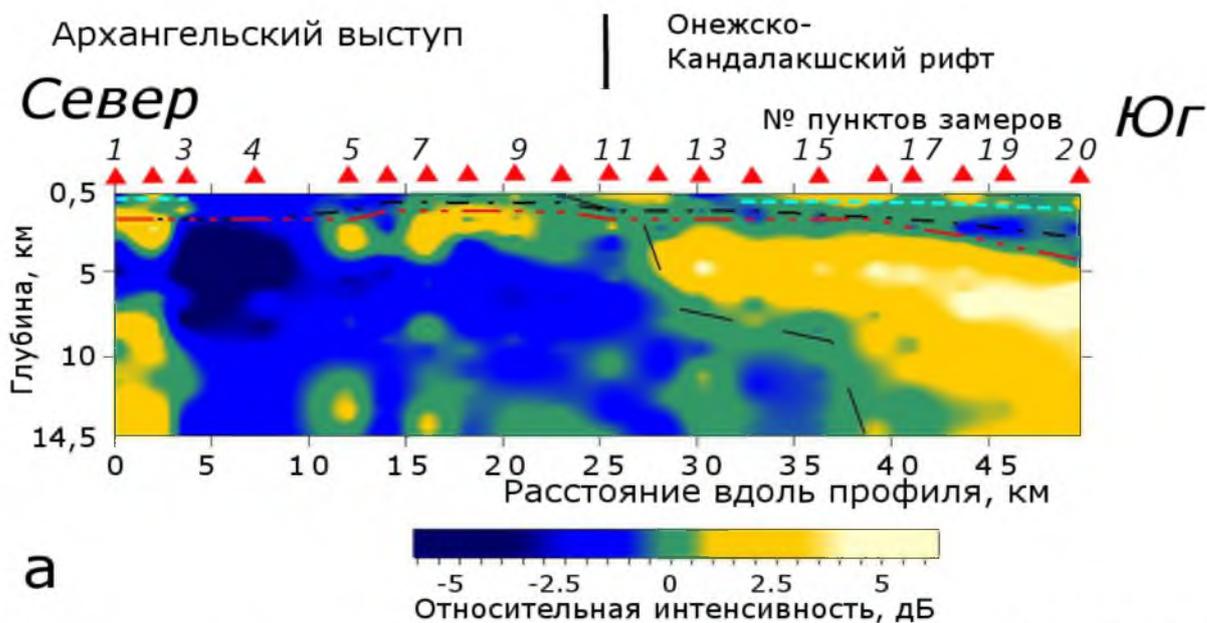
Разрез земной коры до глубин 10 км (рис. 5) можно разделить на ряд блоков, которые согласуются с данными о строении геологической среды. Также обращает на себя внимание чередование в нём довольно узких вертикальных полос–блоков. Изменчивость интенсивности микросейсм в приповерхностном слое не обнаруживает достаточно определённого соответствия с более глубокими блоками [Французова, и др., 2013].



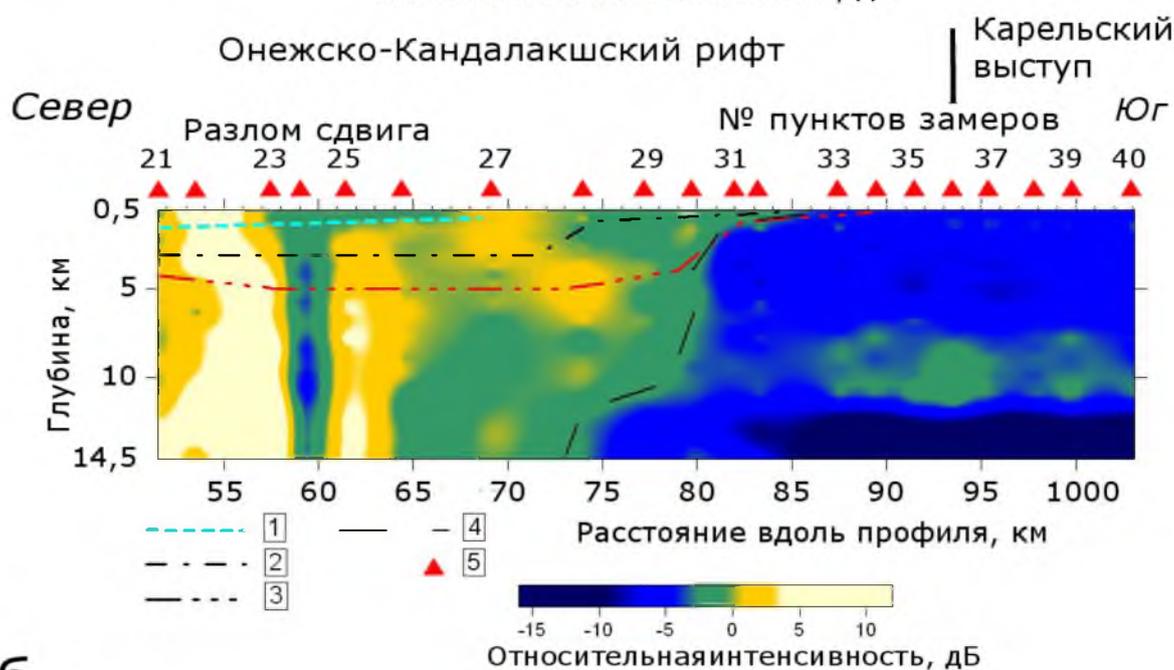
1- 5 – разломы: 1-3 – разделяющие структуры соответственно 1, 2, 3 порядка, 4 – сбросо-сдвигового характера, 5 – предполагаемые долгоживущие, рудоконтролирующие; 6 – граница кристаллического фундамента (Отчет..., 2009).

Рисунок 5. - Глубинные разрезы относительной интенсивности микросейсмического поля вдоль профиля Кянда-Ворзогоры [Французова и др., 2013]

В связи с вышесказанным, возникает вопрос о глубинности блоков и ступеней Онежско–Важского поднятия: они могут быть исключительно приповерхностными и не иметь глубинных корней. Более определённой является граница между этим поднятием и Онежским грабеном. [Французова и др., 2013].



а



б

а – профиль Палово-Самодед; б – профиль Самодед-Малиновка; 1 – граница поверхности рифейских отложений [Результаты ..., 2004]; 2 – граница кристаллического фундамента [Результаты ..., 2004]; 3 – граница кристаллического фундамента [Тектоническая карта ..., 2010]; 4 – глубинная граница Архангельского выступа и Онежско-Кандалакшского; 5 – пункты замеров.

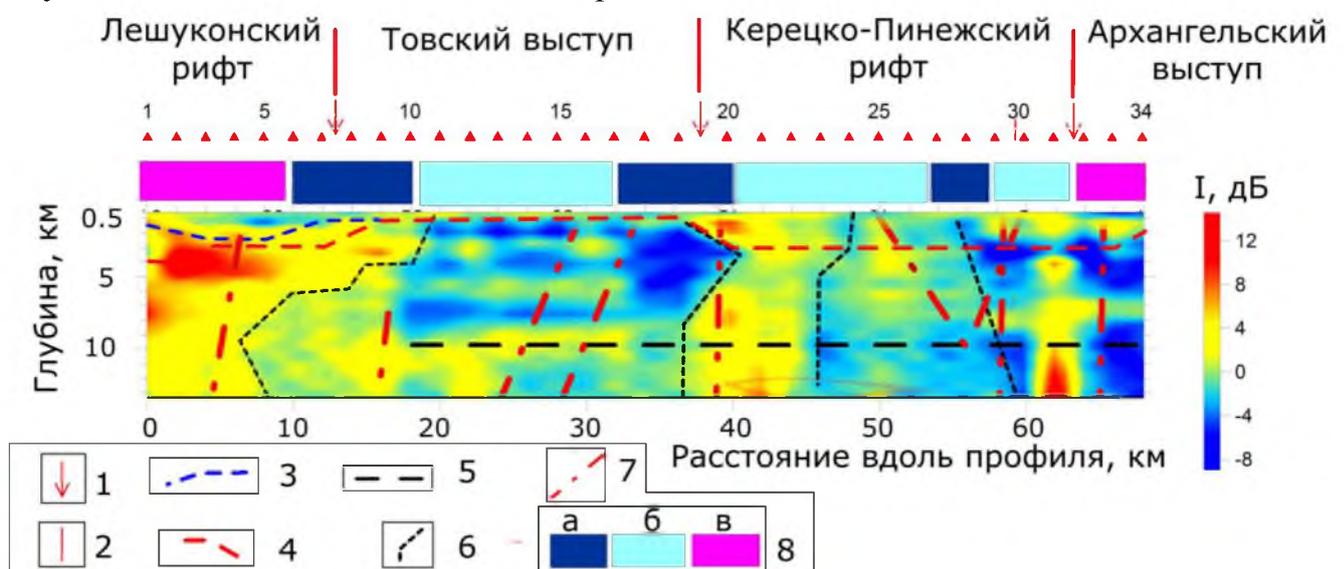
Рисунок 6 – Глубинный разрез распределений относительной интенсивности микросейсм [Danilov, 2017]

Профиль Палово-Самодед проходил по южному краю Архангельского выступа и северо-восточному краю Онежско-Кандалакшского рифта (Онежского грабена). Профиль Самодед-Малиновка является продолжением профиля Палово-Самодед и пересекает центральную и южную части Онежско-Кандалакшского рифта и выходит в северный борт Карельского выступа. Результаты обработки

показаны на рисунке 6. При обработке привлекались данные ГСЗ по профилю «Рубин» [Костюченко и др., 2004].

Из рисунка 6 видно, что известным границам в земной коре соответствуют определенные зоны относительной интенсивности микросейсм. В кристаллическом фундаменте выделяется низкоскоростной блок с контрастом 3-5 дБ, соответствующий Онежско-Кандалакшскому рифту. В центре данного блока выделяется серия вертикальных зон с контрастом более 15 дБ, соответствующих разлому сдвига [Danilov, 2017].

Профиль Гриба –Ижма пересекает Лешуконский рифт, Товский выступ, Керецко-Пинежский рифт и выходит в Архангельский выступ. На данные обработки вынесены известные геофизические данные. На рисунке 7 наблюдается согласие геолого-геофизической информации зон относительной интенсивности микросейсм. По данным ММЗ выделяется низкоскоростной блок с контрастом 3-5 дБ соответствующий Лешуконскому рифту. Наиболее контрастно проявилась глубинная часть неотектонического разлома.

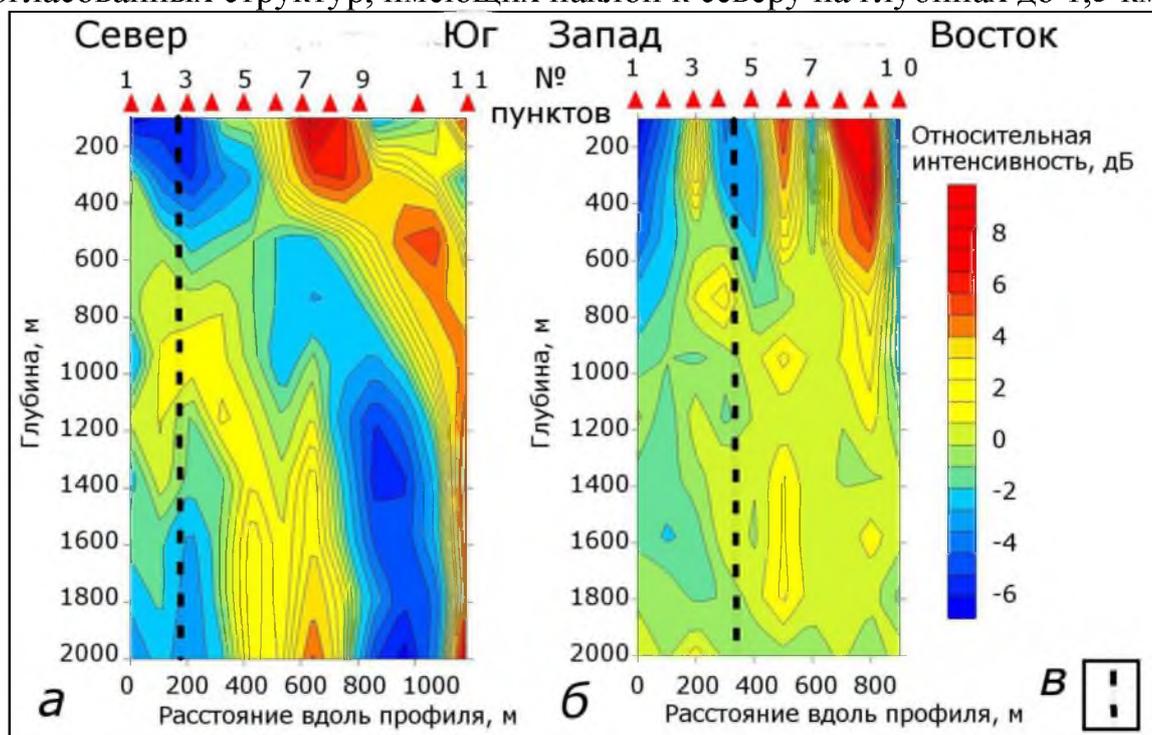


1, 2 – положение разломных структур на поверхности земной коры по данным [Тектонической карты, 2010]: 1- крупные разломы сбросы разграничивающие структурные элементы; 2 – разлом активизированные на неотектоническом этапе; 3, 4 – кристаллический фундамент по данным: 3- геофизических исследований [Результаты ..., 2004]; 4 - тектонической карты [Тектонической карты, 2010]; 5 – граница в земной коры отмеченная на профиле АГАТ-5 [Егоркин, 1987]; 6 – субвертикальные границы скоростных зон, выделенные по результатам применение ММЗ; 7 – границы выделенные по данным МТЗ [Третьяков, 1991]; 8 – интенсивность магнитного поля [Геологическое строение ... 2008]: а- пониженная, б- средняя, в – повышенная.

Рисунок 7 – Глубинный разрез распределений относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля Гриба – Ижма

Полученные данные согласуются с имеющейся геолого-геофизической информацией и уточняют строение земной коры и осадочного чехла. ММЗ позволил получить такую информацию как: субвертикальные границы структурных элементов и разломные нарушения. Таким образом, показана возможность проведения детализации строения осадочного чехла и земной коры на территории Севера Русской плиты по данным ММЗ.

Глава 6 посвящена экспериментальной проверке применимости ММЗ на северной оконечности шельфа Баренцева моря на примере острова Александры архипелага Земля Франца-Иосифа. Работы проводились вдоль двух профилей, направленных в крест простирания, протяженность профилей составляла примерно 1 км [Французова, Данилов, 2013]. Согласно данным [Dibner, 1998] в районе проводимых работ располагается дайка и разломное нарушение, что говорит о неоднородности земной коры. По данным ММЗ (рис. 8) выделяется серия согласованных структур, имеющих наклон к северу на глубинах до 1,5 км.



а – первый профиль; б – второй профиль; в – линия пересечения разрезов;
 Рисунок 8 – Глубинные разрезы относительной интенсивности микросейсм вдоль
 профиля на о. Александры архипелага Земля Франца-Иосифа
 [Французова, Данилов, 2013].

Проведенные работы показали применимость ММЗ на севере шельфа Баренцева моря.

Заключение.

Промышленное освоение северных территорий и добыча полезных ископаемых обуславливает необходимость владения достоверной геолого-геофизической информацией. Территории Севера Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря достаточно обширные, зачастую труднодоступные и характеризуются ранимостью экологической среды. При геофизическом исследовании подобных территорий наиболее перспективно привлечение пассивных геофизических методов. На данный момент нерешенными вопросами являются: повышение эффективности поиска трубок взрыва ААП, уточнение глубинного строения структурных элементов, более точная локализация разломных нарушений. Решение перечисленных задач

требует высокой чувствительности метода к наличию вертикальных границ в земной коре. Подобным набором возможностей обладает метод микросейсмического зондирования, предложенный сотрудником ИФЗ РАН к.ф.-м.н. А.В. Горбатиковым.

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1) Точность определения спектральных амплитуд и относительной интенсивности микросейсм слабо зависит от пункта наблюдения и может быть повышена путем накопления сигнала до 4 часов, при оптимальном периоде накопления 1.5 часа. Период накопления сигнала в 1.5 часа позволяет определить спектральные амплитуды микросейсмических колебаний с погрешностью 4-6% (0.5-1.5 Гц) и 10 - 45% (1.5-8.5 Гц), а относительную интенсивность микросейсм с точностью 1 дБ для частот 0.5 – 1.5 Гц и 2 дБ - для частот 1.5-8 Гц. Как следствие шаг по шкале интенсивности определяется как 1 соответствующими значениями.

2) Разработанное программное обеспечение ДАК позволяет обрабатывать записи микросейсм по методу микросейсмического зондирования.

3) По результатам исследования показано, что трубки взрыва проявляются по данным метода микросейсмического зондирования как в виде высокоскоростных, так и низкоскоростных зон. При этом отдельные блоки могут иметь свойства, близкие к свойствам вмещающей среды.

4) Общим признаком трубок взрыва является наличие трубчатого тела. При этом на всех примерах удавалось проследивать строение трубки до глубин 1-2 км. Выделение глубинных блоков позволяет более уверенно интерпретировать исследуемый объект как трубку взрыва.

5) Метод позволяет достаточно надежно выделять и проследивать рудовмещающие зоны тектонических нарушений в вендском цоколе и уточнять параметры трубок.

6) Показана возможность изучения внутреннего строения трубки взрыва.

7) Результаты метода микросейсмического зондирования дополняют данные электроразведки.

8) Метод микросейсмического зондирования может быть успешно использован для уточнения строения земной коры Севера Русской плиты и северной оконечности шельфа Баренцева моря, поиска трубок взрыва Архангельской алмазоносной провинции и для исследования их строения.

9) По данным метода микросейсмического зондирования наиболее контрастно выделяются вертикальные зоны. Горизонтальные зоны прослеживаются в случае наличия вертикального смещения, либо при изменении характера распределения относительной интенсивности микросейсм.

10) В кристаллическом фундаменте структурные элементы отличаются по степени интенсификации и характеру распределения неоднородностей внутри них. Разломы проявляются в виде вертикальных контрастных зон повышенной интенсивности микросейсм.

11) Проведено уточнение глубинного строения Онежско-Кандалакшского, Лешуконского и Керецко-Пинежского рифтов, а также Архангельского, Карельского и Товского выступов.

12) Дальнейшее развитие начатых работ может происходить в направлении оптимального комплексирования методов исследования земной коры. Цель комплексирования - дополнить результаты метода микросейсмического зондирования скоростным разрезом поперечных волн и горизонтальными границами исследуемого участка земной коры.

13) Для повышения качества полевого материала требуется уделить особое внимание совершенствованию методических основ проведения полевых работ.

14) Представляется перспективной проверка практической применимости использования более широкого диапазона частот для исследования нижних слоев земной коры и верхних слоев осадочного чехла. При этом важно проводить изучение особенностей проявления объектов «помех» при поиске трубок взрыва.

Публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях рекомендуемых ВАК

1. **Данилов, К. Б.** Адаптация метода микросейсмического зондирования для выделения кимберлитовых трубок взрыва на территории Архангельской области / К. Б. Данилов // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные и точные науки. – 2010. - № 4, - С. 10-14.

2. **Данилов, К.Б.** Применение метода микросейсмического зондирования для изучения трубки взрыва им. М.В. Ломоносова (Архангельская алмазоносная провинция) / К.Б. Данилов // "Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле" - 2011. - № 1. - Вып. 17. - С. 231-237.

3. Французова, В.И. Скоростные неоднородности земной коры Юго-Восточного Беломорья по данным метода микросейсмического зондирования / В.И. Французова, В.И. Макаров, **К.Б. Данилов** // Геофизические исследования. – 2013. - том 14. - № 3. - С. 46-54.

4. Попов, Д.В. Обработка цифровых записей микросейсм в программном комплексе ДАК / Д.В. Попов, **К.Б. Данилов**, Р.А. Жостков, З.И. Дударов, Е.В. Иванова // Сейсмические приборы.- 2013.- Том 49, № 2.- С. 44- 57.

5. Киселев, Г.П. Радиометрические и сейсмометрические исследования кимберлитовой трубки Чидвинская (Архангельская алмазоносная провинция) / Г.П. Киселев, **К.Б. Данилов**, Е.Ю. Яковлев, С.В. Дружинин // Вестник КРАУНЦ: Науки о Земле. – Вып. 30 - № 2 -2016 – С. 43-53

6. Французова, В.И. Структура трубки взрыва имени М.В. Ломоносова Ахангельской алмазоносной провинции по аномалиям микросейсмического поля / В.И. Французова, **К.Б. Данилов** // Вулканология и сейсмология - 2016 – № 5 – С. 71-78.

7. **Danilov, K.B.** The structure of the Onega downthrown block and adjacent geological objects according to the microseismic sounding method / К.В. Danilov // Pure and Applied Geophysics. 2017. DOI: 10.1007/s00024-017-1542-x.

В сборниках и материалах конференций 21 статья, в том числе:

1. Французова В.И., Структура осадочного чехла о. Земля Александры арх. Земля Франца-Иосифа / В. И. Французова, К. Б. Данилов // Геодинамика. - 2013. - № 2(15). - С. 353-355.
2. Французова В. И., Зондирование земной коры северо-запада Русской платформы фоновыми микросейсмами / В. И. Французова, К. Б. Данилов // Геодинамика. – 2013. – № 1 (14). – С. 102–109.
3. Французова, В.И, Низкочастотное просвечивание земной коры Севера Русской плиты с использованием фоновых микросейсм / В.И. Французова, В.Н. Макаров, К.Б. Данилов, А.В. Горбатиков // Проблемы сейсмоtectоники. - Матер. Всероссийской конф. с межд. участием. - М.: ИФЗ, 2011. - С. 511-515.
4. Данилов, К.Б. Особенности проявления кимберлитовых тел в сейсмических полях (на примере трубки им. М.В. Ломоносова) / К.Б. Данилов, Ф.Н. Юдахин, В.И. Французова, Н.К. Капустян, Е.В. Шахова, Б.Г. Басакин // Экология Арктических и приарктических территорий: материалы международного симпозиума - Институт экологических проблем Севера УрО РАН. - 2010. -С 233-236.
5. Юдахин, Ф.Н. Использование микросейсм для научных и практических целей / Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, В.И. Французова, Г.Н. Антоновская, Е.В. Шахова, К.Б. Данилов, Е.В. Иванова // Структура, свойства, динамика и минералогия литосферы Восточно-Европейской платформы: Мат. XVI межд. конф., Научная книга. - Т II. - Воронеж: 2010. - С 393-397.
6. Данилов, К.Б. Выделение трубки взрыва Ненокского поля Архангельской алмазоносной провинции помощью метода микросейсмического зондирования / К.Б. Данилов // IV международная молодежная научная конференция «Экология – 2011» (6-11 июня 2011 года): материалы докладов. – Архангельск, - 2011. – 312 с.
7. Данилов, К.Б. Локализация трубки взрыва по результатам микросейсмического зондирования / К.Б. Данилов // Двенадцатая Уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. - Пермь: ГИ УрО РАН, - 2011. - С. 62-66.
8. Данилов, К.Б. Выделение кимберлитовых тел на основе анализа микросейсмических колебаний (на примере трубки им. Ломоносова, Архангельская обл.) / К.Б. Данилов, Е.В. Шахова // IV международная молодежная научная конференция «Экология – 2011» (6-11 июня 2011 года): материалы докладов. – Архангельск. - 2011. - С. 15-17.
9. Попов, Д.В. Использование оригинального программного комплекса ДАК для обработки цифровых записей микросейсм / Д.В. Попов, К.Б. Данилов, Е.В. Иванова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2011. - С.263-266.