

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОСЕЙСМ ДЛЯ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ**

Ф.Н. Юдахин<sup>1,2</sup>, Н.К. Капустян<sup>1,3</sup>, В.И. Французова<sup>1,4</sup>, Г.Н. Антоновская<sup>1</sup>,  
Е.В. Шахова<sup>1</sup>, К.Б. Данилов<sup>1</sup>, Е.В. Иванова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск, Россия;*

<sup>2</sup>*Архангельский научный центр УрО РАН, г. Архангельск, Россия;*

<sup>3</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;*

<sup>4</sup>*Геофизическая Служба РАН, г. Обнинск, Россия*

До недавнего времени микросейсмические колебания определялись как помехи, осложняющие полезные сигналы при проведении исследований методами сейсмологии взрывов и землетрясений. В ИЭПС АНЦ УрО РАН предложены защищенные двумя патентами способы использования этих "помех" для решения различных научных и практических задач. Одним из важнейших преимуществ микросейсмических исследований является то обстоятельство, что количество микроимпульсов, регистрируемых на поверхности Земли, чрезвычайно велико, поэтому имеется возможность за короткие сроки без особых затрат получать большую экспериментальную информацию для анализа.

**Методика сейсмического микрорайонирования.** Микросейсмические колебания грунта представлены суперпозицией волновых полей разных типов и от широкого набора источников [1]. Использование поверхностных длиннопериодных волн от удаленных источников (в основном природного генезиса) лежит в основе методики сейсморайонирования широко развиваемой за рубежом. Мы рассматриваем другую составную часть микросейсм – короткопериодные сейсмические шумы в диапазоне частот от 0.5 до 40 Гц. Параметры короткопериодных микросейсм в значительной мере зависят от грунтовых условий: от сейсмической жесткости грунта, плотности и мощности отдельных слоев. На городских территориях природная составляющая, как правило, подавляется индустриальной компонентой. Таким образом, интенсивность микросейсм зависит от размещения и особенностей источников, а так же от свойств грунтов. Эта зависимость позволяет использовать микросейсм от техногенных источников для задач сейсмического микрорайонирования. Нами предложен метод, основанный на использовании в качестве зондирующих геологическую среду сигналов упругие колебания, раскачиваемых ветром высоких зданий. Этот метод позволяет, не нарушая городской среды и жизнедеятельности производственных и жилых объектов, оперативно обследовать конструктивную целостность зданий, т. е. проводить неразрушающий их контроль. Кроме того, по пространственному распределению интенсивности техногенных сигналов, выделяемых из микросейсм, можно оценить приращение балльности и ускорений в долях  $g$ , т. е. построить карту микрорайонирования исследуемой территории, что было сделано для центральной части г. Архангельска [2].

**Инженерно-сейсмологический метод обследования состояния инженерных сооружений и их оснований.** Под комплексной оценкой состояния инженерных сооружений следует понимать обследование, как самого здания, так и его основания – подстилающих грунтов. Исследование сооружения базировалось на методе оценки конструктивной целостности инженерных сооружений, разработанном совместно сотрудниками ИЭПС УрО РАН и ЦНИИЭП Жилища. Метод оценки конструктивной целостности инженерных сооружений позволяет получить динамическую картину обследуемого объекта по основным формам колебаний. Сопоставление картин, полученных для разных значений собственных частот, позволяет подразделить сооружение на блоки разного размера, что важно для определения размеров трещин и их проникновения вглубь сооружения.

Эффективность данной методики была освящена в ряде публикаций [2, 3] и доказана на исследованиях различного спектра: обследование зданий г. Архангельска, в т.ч. находя-

щихся в разных грунтовых условиях, аварийных объектов из различных строительных материалов (кирпичных, деревянных, панельных); изучение эффекта влияния от забивания свай на окружающие объекты и геологическую среду; исследование архитектурных памятников Соловецкого архипелага (Белая башня, колокольня, Никольская церковь, Преображенская гостиница, Секирно-Вознесенский скит, обследование системы Святое озеро – залив Белого моря).

**Исследование влияния вибрационных воздействий от ДЭС на геологическую среду и памятники Соловецкого Кремля.** При изучении микросейсмических полей, генерируемых техногенными источниками на указанной территории, было выявлено, что наиболее значительную компоненту в шумовом поле составляют наводки от местной дизельной электростанции (ДЭС), находящейся на расстоянии порядка 1 км от стен Соловецкого Кремля. На сейсмических записях станции "Соловки" генерируемые ДЭС сигналы проявляются в виде гармонических составляющих с наибольшей интенсивностью на частотах 6.26 и 18.78 Гц. В общем случае наличие таких наводок крайне нежелательно на сейсмозаписях, поскольку затрудняет работу интерпретаторов сейсмических событий и тем самым препятствует качественному контролю сейсмичности на исследуемой территории. Другая негативная причина наводок – разрушающее низкочастотное воздействие, в частности, на Белую башню Соловецкого кремля, находящуюся достаточно близко от источника воздействия. В этой связи возникает необходимость исследования пространственно-временного распределения такого рода сигналов и оценки степени их воздействия на сооружения (памятники культуры) и на геологическую среду, и, как следствие, на экологическую и сейсмическую безопасность населения и гражданских объектов, находящихся на исследуемой территории.

В силу указанных причин, на территории острова Б. Соловецкий в 2008 и 2009 годах были проведены работы по исследованию распределения вибрационного воздействия от ДЭС на сооружения и окружающую среду [4, 5]. Согласно имеющимся данным, оборудование ДЭС в поселке Соловецкий представлено дизель-генератором марки ДГ-72, в составе двух двигателей мощностью 850 кВт, размещенных на специальных бетонных постаментов размерами 2×6×2 м, находящихся на расстоянии 2 м друг от друга.

Анализ воздействия от работы оборудования ДЭС на окружающую среду и сооружения базировался на данных полевых работ, проведенных по профилю, включающему 16 точек, проложенному от ДЭС до скита Савватьево – проводился мониторинг общего уровня микросейсмического фона на архипелаге. Этот профиль был использован для оценки воздействия на геологическую среду. Также во время обследований были выполнены и замеры непосредственно на постаментах (действующем и новом) для оборудования ДЭС, а также в ее окрестностях. В этом случае исследовалось воздействие вибраций на сооружения, и в качестве объекта обследования была выбрана Белая башня Кремля, мониторинг которой ведется с 2004 г. [5].

Одной из причин изменения состояния Белой башни могут быть вибрации при постоянной работе дизельной электростанции. Исследовалось "поведение" в различных точках профиля двух основных пиков на частотах 6.26 и 18.78 Гц, как наиболее ярко проявляющихся на спектральных характеристиках. Анализировалась медианная, рассчитанная для совокупности замеров в десяти-двадцати одноминутных интервалах записей, спектральная амплитуда сигнала на выбранных частотах. Следует отметить, что данные частоты близки к собственным частотам обследуемого сооружения – Белой башни. По ГОСТу Р 52892-2007 "Измерение вибраций и оценка ее воздействия на конструкцию" были проведены расчеты вибрационной нагрузки – они оказались в 2 раза больше, чем требуемые нормативом, т.е. башня должна была испытать сильные разрушения, но этого мы не наблюдаем. Оценка вибровоздействий по результатам микросейсмических наблюдений в 1000 раз меньше, что, казалось бы, дает полное основание исключить воздействие ДЭС. Однако следует отметить, что вибрации, производимые электростанцией, хоть и слабые, но постоянные и долговременные (ДЭС работает десятки лет), вследствие этого начинают проявляться усталостные

эффекты, выражающиеся в появлении многочисленных трещин на теле объекта, которые затем могут объединяться в более крупные дефекты.

Влияние ДЭС в поселке Соловецкий распространяется с разной степенью интенсивности практически по всей его территории, затухая за его пределами. Полученные результаты исследований влияния вибраций на геологическую среду и сооружения предполагают возможность учета и оценки воздействий вибраций от источников такого типа при проектировании новых зданий вблизи них, при поиске места для их размещения или при замене их конструкций.

**Выявления аномальных зон в верхах земной коры Архангельской области.** Целью данных исследований было создание экономичной, технологичной и экологически безопасной экспериментальной методики для сейсмического обследования территорий, направленной на выявление ослабленных зон и разрывных нарушений в осадочном чехле и верхах фундамента и оценки их тектонической активности. Было проведено обобщение и систематизация сведений о сейсмической активности разрывных нарушений на платформах. Изучен ряд параметров (распределение мощности потока микроимпульсов – интенсивность, анизотропия в широтном и меридиональном направлениях, преобладающая частота эндогенного излучения), определяемых по экспериментальным записям микросейсм и характеризующих меру геодинамической активности разрывов; на основании экспериментальных данных, исследовании численных и натуральных моделей разработаны приемы использования когерентно-временного анализа трехкомпонентных (X, Y, Z) записей микросейсм для оценки параметров, характеризующих разрывное нарушение; впервые проведены площадные микросейсмические наблюдения с одновременной интерпретацией природной и техногенной компонент микросейсм; по сейсмическим данным выявлены аномальные зоны, соответствующие разрывам в верхах земной коры; предложен вариант экспресс-методики [6], позволяющий провести рекогносцировку крупного участка территории с выявлением разрывного нарушения и уточнения участков для детальных работ.

**Опыт выявления кимберлитовых тел при микросейсмическом обследовании территории.** Целью данных работ было выявление фундаментальных свойств кимберлитовых тел, проявляющихся в волновых полях, изученных с использованием микросейсм на территории Архангельской алмазоносной провинции, и разработка новых геофизических методик для выявления трубок взрыва.

С целью выделения трубки взрыва нами применялись оценка распределения эндогенного излучения, метод микросейсмического зондирования, метод малоглубинного зондирования. Первые два метода основаны на анализе различных характеристик микросейсмического поля. Сам процесс измерений сводится к последовательным замерам микросейсмических колебаний в пунктах на профилях.

Ранее, на примере полевых работ с 2003 по 2005 гг. в Архангельской области, показана возможность выявления слабоактивных разломов на платформенных территориях [6]. Технология проста и экономична, что важно при рекогносцировочных работах для выбора мест более детальных исследований, особенно в труднопроходимых условиях. Опыт выявления разрывных нарушений мы перенесли на кимберлитовую трубку – по нашим предположениям аномально "шумящую". В качестве объекта исследования была выбрана ранее выделенная по наземной магнитной съемке и заверенная множеством скважин кимберлитовая трубка в Архангельской области. Были получены результаты [7], указывающие на возможность экспериментального подтверждения гипотезы о том, что процессы на границе кимберлитовой трубки проявляются в сейсмическом шуме и могут наблюдаться при специальных микросейсмических площадных наблюдениях. По существу, сейчас только заложены основы методики проведения микросейсмических измерений, направленной на выделение эндогенного сейсмического излучения над разрывными структурами подобного рода (кимберлитовыми трубками).

На данном участке работ также применялась методика низкочастотного микросейсмического зондирования, предложенная А.В. Горбатиковым (ИФЗ РАН, г. Москва), осно-

ванная на способности волн Рэлея увеличивать свою интенсивность при прохождении низкоскоростных неоднородностей, и уменьшать при прохождении высокоскоростных. При этом сама неоднородность может находиться на определенной глубине, а соответствующее изменение интенсивности будет ощущаться на поверхности. О глубине залегания неоднородности можно судить из того, что волна наиболее ярко "реагирует" на неоднородность при ее залегании на глубине, равной половине длины волны. Все перечисленные особенности подтверждены экспериментально и на численных моделях. Таким образом, производя последовательные замеры волновых микросейсмических колебаний можно судить о строении геологической среды [8].

Предложенный метод показывает возможность выделения трубок взрыва и их структуру на территории Архангельской области [9]. При этом основными параметрами является отличие скоростных свойств пород, слагающих трубки взрыва, и вмещающих пород. Должно учитываться и изменение структуры среды, т.е. наличие случайных локальных изменений скоростных свойств. В качестве дополнительных факторов, указывающих на принадлежность выделенной скоростной неоднородности именно трубке взрыва, может служить ее приуроченность к разрывным нарушениям, которые проявляются в виде областей со значительно большей интенсивностью микроизлучений, чем сама трубка.

**Исследование на натуральных моделях процессов переработки блоковой средой внешних воздействий.** Современное представление об эндогенных микросейсмах как об одном из иерархических уровней сейсмичности позволяет судить по микросейсмам об активности геодинамических процессов и искать места повышенного выделения сейсмической энергии, в том числе разрывные нарушения. Действительно, сейсмический процесс в виде ощутимых землетрясений достаточно медленный по сравнению с развитием науки и ее потребностями. Поэтому заманчиво дополнить сейсмологические сети наблюдениями микросейсм, чтобы перейти к более "быстрым" иерархическим уровням.

Иллюстрацией к тому, что глобальные деформационные процессы проявляются на всех иерархических уровнях и есть возможность наблюдения деформаций с помощью микросейсм является результат полевых наблюдений на Соловках [6, 10]. На натуральных моделях (морской и озерной дамбе), свойства которых уподоблялись природной блоковой среде, показано, что точечные малоканалльные сейсмометрические наблюдения с использованием анализа эндогенного излучения позволяют выявить геодинамические процессы, вызванные слабыми изменениями полей напряжений двух видов – плавных и ударных.

Возможна следующая геодинамическая интерпретация. С использованием модели тектоники плит и механизма раздвижения срединно-океанических хребтов (в нашем случае северная часть Срединно-Атлантического хребта) естественно предположить совокупность двух типов подвижек – плавный и резкий. При воздействии на блоковые структуры изучаемых территорий, в том числе, раздробленные зоны разрывных нарушений, такие подвижки будут приводить к усилению сейсмического отклика в этих структурах, причем при детальном наблюдении представляется возможным различать плавные и резкие геодинамические процессы. Таким образом, проводя наблюдения на разломах можно осуществлять своеобразный мониторинг глобальных геодинамических процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкунов Л.Н. Микросейсмы. Экспериментальные характеристики естественных микро-вибраций грунта в диапазоне периодов 0.07-8 сек. – М.: Наука, 1967.
2. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 156 с.
3. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Об использовании ветровых колебаний сооружений для сейсмического просвечивания // ДАН. – Т. 402. – № 2, 2005. – С. 255-259.

4. Французова В.И., Иванова Е.В., Антоновская Г.Н. Воздействие вибраций от ДЭС на геологическую среду и сооружения // Геологические опасности: Материалы 15 Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск: ИЭПС АНЦ УрО РАН, 2009. – С. 462-465.
5. Отчет о научно-исследовательской работе "Изучение закономерностей проявления сейсмичности и геодинамических процессов в северных окраинных зонах Восточно-Европейской платформы", 2008 г., № госрегистрации 0120.0604339. – 2008. – 113 с.
6. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахова Е.В. Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 132 с.
7. Шахова Е.В., Юдахин Ф.Н., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К. Опыт выявления кимберлитовых тел при микросейсмическом обследовании территории // Геологические опасности: Материалы XV Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2009. – С. 489-492.
8. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Новый подход к исследованию геологической среды на основе использования фонового микросейсмического поля в диапазоне низких частот // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Мат. Междунар. конф. – Т. 2. – Казань: Казанск. гос. ун-та, 2007. – С. 19-23.
9. Данилов К.Б., Юдахин Ф.Н., Французова В.И., Капустян Н.К., Шахова Е.В., Басакин Б.Г. Особенности проявления кимберлитовых тел в сейсмических полях (на примере трубки им. М.В. Ломоносова) // Экология арктических и приарктических территорий: Материалы международного симпозиума. CD. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2010.
10. Шахова Е.В., Капустян Н.К. Микросейсмические исследования при изучении геологической среды // Проблемы мониторинга природной среды Соловецкого архипелага: Мат. IV Всерос. науч. конф. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2009. – С. 81-82.

## **ЭВОЛЮЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ, ГЕОДИНАМИКА И МЕТАЛЛОГЕНИЯ КУКАСОЗЁРСКОГО СЕГМЕНТА СЕВЕРО-КАРЕЛЬСКОЙ ШОВНОЙ ЗОНЫ В ПОЗДНЕМ АРХЕЕ**

Р.М. Юркова, Б.И. Воронин

*Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия*

В сообщении рассматривается эволюция структурно-формационных комплексов, как индикаторов геодинамического развития исследуемого региона (рис. 1). Рассмотрены магматические комплексы трондьемитов-плагиогранитов, их гнейсового окружения и синтетектонические метасоматиты.

Трондьемиты-плагиограниты залегает в виде тела линзовидной формы длиной 16-17 км, до 2 км. в поперечнике, вытянутого вдоль глубинного разлома, который чётко обозначен протрузиями серпентинизированных ультрабазитов. Соотношение породообразующих компонентов, структура и олигоклазовый состав плагиоклазов позволяет называть большую часть пород, образующих это тело, трондьемитами. Породы в разной степени структурно и вещественно преобразованы. Будины размером 1,8 x 0,4 м. цилиндрической формы наследовали первичную отдельность магматического тела. С несомненностью восстанавливается полистадийная история становления и метаморфизма трондьемитов-плагиогранитов. Она предстаёт в следующем виде:

1. В магматическую стадию при  $T \geq 750^\circ \text{C}$  сформирован минеральный парагенезис: магнетит, диопсид, биотит, олигоклаз (23An %).

2. В автометаморфическую флюидно-пневматолитовую стадию в условиях высокой степени амфиболитовой фации ( $T = 700-750^\circ \text{C}$ ) и повышенного флюидного давления были