

## **О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОДЗЕМНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ**

**Ковалевский В.В.**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

Представлены результаты исследования характеристик подземной сейсмической группы, развернутой в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН в 24 км от вулкана Эльбрус. Линейная сейсмическая группа имеет апертуру 2.5 км и состоит из 6-и трехкомпонентных сейсмоприемников СК-1П с автономными цифровыми регистраторами «Байкал». В результате экспериментальных работ были определены основные характеристики микросейсмических шумов в точках установки сейсмоприемников сейсмической группы, их взаимная корреляция, суточные вариации уровня шумов, уровни сигналов от региональных и локальных сейсмических событий.

Исследование сейсмической активности в районе Эльбрусского вулканического центра связано с задачами изучения структуры локальных неоднородностей в земной коре Приэльбрусья и геодинамических процессов в районе вулкана. Комплексными геофизическими исследованиями выявлены глубинные и близповерхностные магматические структуры вулкана Эльбрус и стоит задача мониторинга их состояния для слежения за возможной активизацией сейсмovolканических процессов [1,2]. Наблюдение региональной сейсмичности на Северном Кавказе осуществляется сетью сейсмических станций ГС РАН, проводящей сейсмический мониторинг в регионе. Локальные сети в центральной Кавминводской зоне, сеть станций Северо-Осетинского филиала ГС РАН, а также отдельные станции в западной части обеспечивают контроль за сейсмическими событиями с магнитудой 1-2 на территории региона, включая Приэльбрусье [3,4].

Комплексный геофизический и сейсмический мониторинг района Эльбрусского вулканического центра проводится ИФЗ РАН, ГАИШ МГУ, КБГУ с использованием уникального комплекса геофизических приборов Северокавказской геофизической обсерватории, расположенной в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН [5]. Этот комплекс включает сейсмическую станцию «Нейтрино» входящую в сеть станций ГС РАН. Уровень микросейсмических шумов, регистрируемых этой станцией, показал, что штольня БНО ИЯИ РАН является одним из самых «тихих» мест расположения сейсмостанций в Кавказском регионе. Этому способствует заглубленность штольни на 4 км в цельный скальный массив горы Андырчи, удаленность от промышленных и природных источников сейсмического шума, низкий уровень техногенного шума, связанного с деятельностью самой обсерватории.

Низкий уровень микросейсмических шумов, возможность размещения сейсмоприемников практически по всей протяженности штольни делает возможным создание на базе БНО ИЯИ РАН линейной сейсмической группы с апертурой 3-3,5 км, оснащенной коротко- и среднепериодными трехкомпонентными сейсмометрами для слежения за низкоэнергетической сейсмической активностью района вулкана Эльбрус и решения задач региональной сейсмологии.

В современной мировой системе стационарных сейсмологических наблюдений наряду с сетями отдельных сейсмостанций применяются сейсмические группы (seismic arrays) большой (LASA, NOR SAR) и малой (NORESS, ARCESS, GERESS и др.) апертуры. Международная система мониторинга (МСМ), ориентированная на обнаружение подземных ядерных испытаний, использует в своей сети первичных станций сейсмические группы, непрерывно передающие информацию в Международный центр обработки данных. Такие группы с апертурой 3 - 4 км расположены в Казахстане в геофизических обсерваториях Акбулак, Боровое, Каратау, Маканчи [6].

Сейсмические группы малой апертуры, или малоапертурные сейсмические антенны (МСА), за последние 15-20 лет были установлены в ряде регионов мира. Их применение оказались весьма эффективными для локации сравнительно слабых сейсмических событий (землетрясений и взрывов) на региональных расстояниях. Использование МСА дало принципиальную возможность

для дистанционного контроля сейсмической обстановки на обширных территориях, в особенности в тех районах, где установка обычных сейсмических станций на земной поверхности затруднена или малоэффективна из-за высокого уровня шумов.

Малоапертурные сейсмические антенны применяются в экспериментальных исследованиях Институтами РАН геофизического профиля для решения сейсмологических задач. В 2003-2006 гг. выполнены экспериментальные исследования с МСА «Михнево» Института динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), имеющей конфигурацию с тремя концентрическими окружностями с максимальным диаметром 1,2 км. При её создании учитывался опыт многолетних исследований с применением региональных малоапертурных групп в Западной Европе (NORESS, ARCESS, GERESS), а также опыт исследований ИФЗ РАН и ИДГ РАН на Русской платформе с применением мобильных сейсмических антенн малой апертуры. С группой малой апертуры RUKSA (Russian Karelia Seismic Array) в Петрозаводском районе Карелии, выполнялись исследования по построению скоростного разреза земной коры методом функции приемника. На севере России постоянно работает сейсмическая группа АРА0 - Апатитский ARRAY с апертурой 1 км.

Стационарные непрерывно работающие сейсмические группы являются дорогостоящими комплексами геофизического оборудования, поэтому, несмотря на высокую эффективность их число составляет единицы в отдельной стране, и имеется далеко не в каждой, в отличие от обычных сейсмических станций. Поэтому развертывание сейсмической группы в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, находящейся в 20 км от вулкана Эльбрус, соответствует современному мировому уровню техники и методики сейсмологических наблюдений. Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН представляет уникальные возможности для этого. Горизонтальная штольня длиной 4 км пройдена в едином массиве горной породы, что позволяет установить все сейсмоприемники группы в одинаковых условиях на коренную породу. Для их установки может быть использована вспомогательная штольня, проходящая в 50 м от основной, закрытая для общего доступа и не используемая в настоящее время. В ней можно развернуть подземную сейсмическую группу из 10-15 трехкомпонентных сейсмоприемников с суммарной базой до 3,5 км.

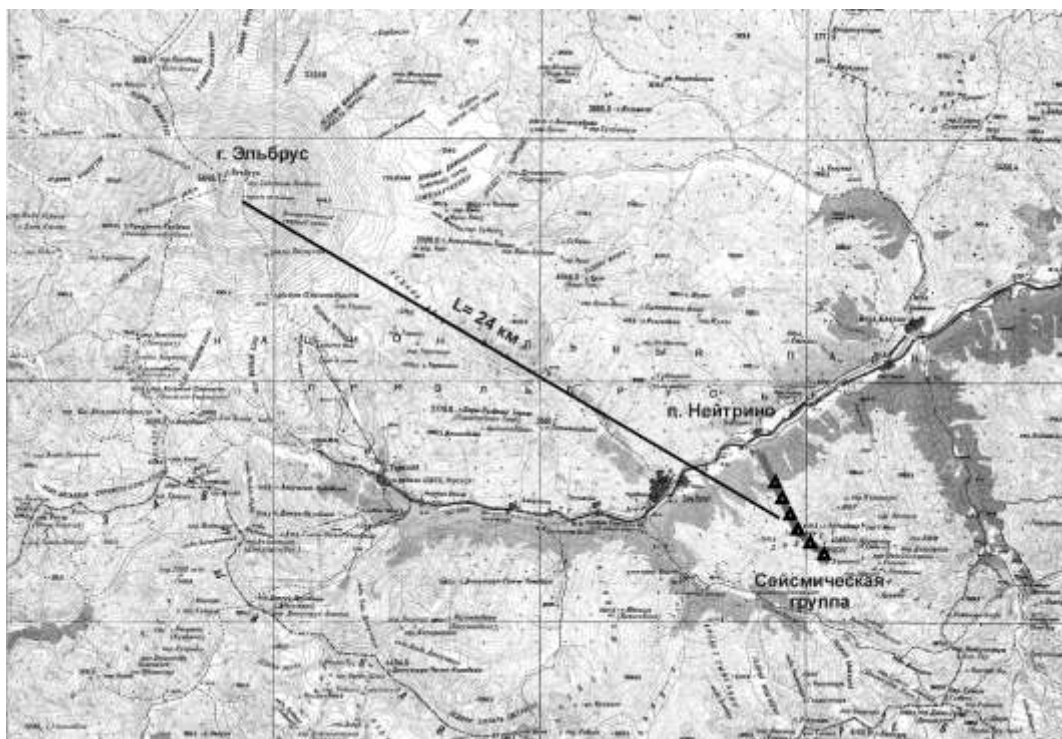


Рисунок 1 Карта района расположения сейсмической группы в штольне БНО ИЯИ РАН.

Пилотный эксперимент по созданию такой группы был выполнен в июле 2010 года, когда Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН и Институтом физики Земли РАН впервые была развернута и опробована в режиме непрерывной работы линейная сейсмическая группа с апертурой 2.5 км из 6-и трехкомпонентных сейсмоприемников СК-1П с автономными цифровыми регистраторами «Байкал» [7]. Группа была развернута во вспомогательной штольне Баксанской нейтринной обсерватории, в 24 км от вулкана Эльбрус (рис. 1).

Геометрия группы в плане представляет линию с изломом, угол между двумя плечами группы 21 градус (рис. 2). В коротком плече находилось три сейсмоприемника в линию, в длинном – четыре, с общим третьим сейсмоприемником в точке излома. Наличие излома в линии сейсмоприемником является благоприятным обстоятельством, так как делает группу площадной, хотя и с малой апертурой в поперечном направлении. Площадная апертура группы 2500 м x 500 м.

Расстановка сейсмоприемников в группе была равномерной, расстояние между датчиками составляло 500 м. Положение точек установки сейсмоприемников определялось по пикетам разметки штольни. Сейсмическая группа располагалась от точки на расстоянии 1500 м от входа в штольню (пикет 15+00) до точки 4000 м от входа в штольню (пикет 40+00). Сейсмоприемники устанавливались на бетонном основании на коренных породах (рис. 3). Трехкомпонентные сейсмоприемники СК-1П имеют чувствительность 140 В/м/сек, частотный диапазон 1-100 Гц. Цифровой регистратор «Байкал» представляет собой автономный компьютеризированный комплекс с 24-разрядным 3-канальным аналогово-цифровым преобразователем. Чувствительность канала 70 нВ/разряд. Синхронизация данных обеспечивается наличием внутренних таймеров регистратора, имеющих коррекцию хода от сигналов GPS. Запись велась с частотой дискретизации 200 Гц.



Рисунок 2. Сейсмическая группа в штольне БНО, Т1-Т6 точки установки сейсмоприемников



Рисунок 3. Сейсмоприемник СК-1П с регистратором «Байкал» на бетонном основании штольни БНО.

Целью пилотного эксперимента было определение основных характеристик линейной сейсмической группы: характеристик микросейсмических шумов в точках расположения сейсмоприемников в штольне БНО ИЯИ РАН на различных удалениях от входа и их взаимной корреляции, суточных вариаций уровня шумов, характеристик техногенных шумов, связанных с работой подземного комплекса обсерватории; уровней сигналов от региональных и локальных сейсмических событий, регистрируемых группой; степени корреляции основных фаз сейсмических волн на различных сейсмоприемниках группы. Во время эксперимента была проведена непрерывная регистрация сейсмических сигналов в течение 4-х суток – 14-15 июля и 17-18 июля 2010 г.

Характеристики микросейсмического шума определялись путем вычисления спектральной плотности мощности шума ( $10 \cdot \log(M^{**2}/S^{**4}/\text{Hz})$ ) для трех компонент сейсмоприемника в каждой точке сейсмической группы в диапазоне периодов 1 - 0.0125 сек. Выбирались отрезки записей от 100 сек до 500 сек без сейсмических событий отдельно для ночного (18 - 2 ч. GMT) и дневного времени (2 - 18 ч. GMT), по 3-5 отрезков для каждого из 4 суток наблюдений. Для всех фрагментов вычислялись медианные спектры, после чего результаты осреднялись, что позволило получить осредненную величину спектральной плотности мощности шума (СПМ) на сейсмоприемниках группы в дневное и ночное время (Рис. 4).

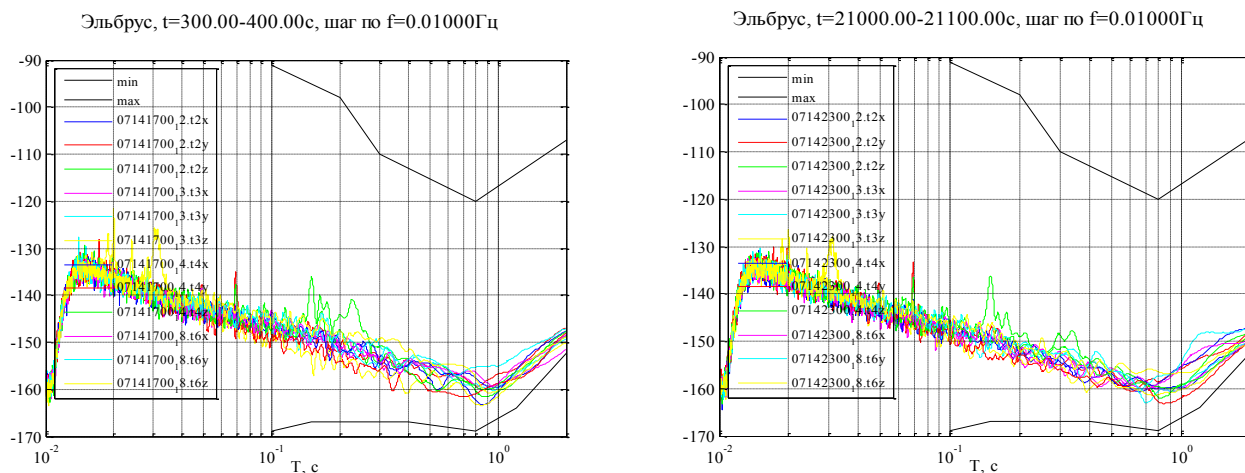


Рисунок 4. СПМ микросейсмического шума для компонент X, Y, Z сейсмоприемников в точка Т1 – Т6 в дневное время (слева) и в ночное время (справа).

На графиках (рис. 4) СПМ (медианные спектры) по компонентам X, Y, Z для 6 сейсмоприемников группы в дневное и ночное время видно, что максимальный разброс СПМ шума между различными датчиками и их компонентами составляет около 5 дБ на периодах 0.0125 – 1 сек. Существенных различий между СПМ шума в дневное и ночное время нет, что объясняется отсутствием промышленности и крупного транспорта в районе штольни БНО, а также малозумной производственной деятельностью обсерватории. Среднее значение СПМ шума находится ближе к нижнеуровневой модели сейсмического шума Петерсона [8 6] с минимальным уровнем –160 дБ в области периодов 0.2 – 1 сек и линейным ростом до -135 дБ на периодах 0.0125 сек.

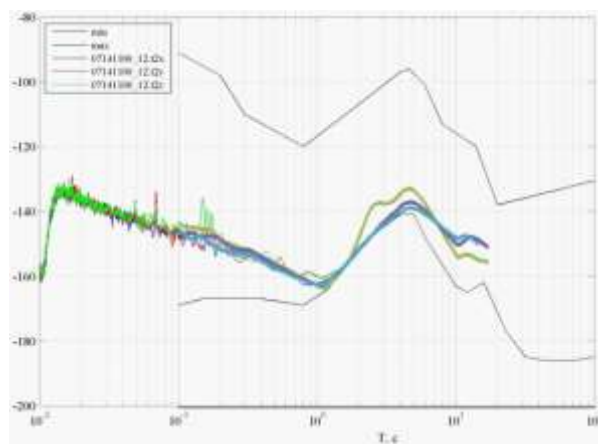


Рисунок 5. СПМ микросейсмического шума - для трех компонент одного сейсмоприемника группы (тонкие линии в диапазоне периодов 0,01 - 1 сек) и для трех компонент сейсмостанции «Нейтрино» (толстые линии в диапазоне периодов 0,1 – 10 сек).

Было выполнено сравнение СПМ шума сейсмической группы и сейсмостанции «Нейтрино», расположенной в штольне БНО и оснащенной широкополосным сейсмоприемником (рис. 5). Данные о СПМ шума сейсмостанции «Нейтрино» взяты из работы [4]. В диапазоне периодов 0.1 – 1 сек эти графики совпадают, что свидетельствует о корректном вычислении СПМ шума для этих двух систем. Кроме того в диапазоне периодов 1 – 5 сек СПМ шума сейсмостанции «Нейтрино» совпадает с нижнеуровневой моделью сейсмического шума Петерсона [8], что аналогично характеристикам современных сейсмических групп Международной системы мониторинга [9, 10]. Это характеризует штольню БНО как перспективное место для размещения среднепериодных сейсмических регистрирующих систем.

Характеристики техногенного шума, обусловленного деятельностью обсерватории, в основном определяются непрерывной работой вентиляционной системы, что проявляется присутствием в спектре шума гармонических составляющих на частотах 10.22 Гц, 20.41 Гц, 30.53 Гц, 50.90 Гц (+0.02 Гц) для всех компонент сейсмоприемников. В местах установки некоторых сейсмоприемников присутствуют составляющие на частотах 5.56 - 6.57 Гц и 14.37 Гц. Для 50 с отрезков записи амплитудные значения этих пиков в спектральной области превышают средний уровень спектра в 2-8 раз. При обработке эти составляющие спектра могут быть удалены цифровой фильтрацией.

За четверо суток эксперимента было зарегистрировано несколько десятков локальных сейсмических событий (рис. 6). Разница прихода Р и S волн для них составляет 0.5-1.5 сек, что дает оценку расстояния от сейсмической группы 3-10 км. Среди локальных сейсмических событий встречаются как одиночные, так и множественные, которые локализованы в одном месте и имеют повторяющиеся волновые формы. По-видимому, эти локальные события связаны с динамикой разломных структур Эльбрусского вулканического центра.

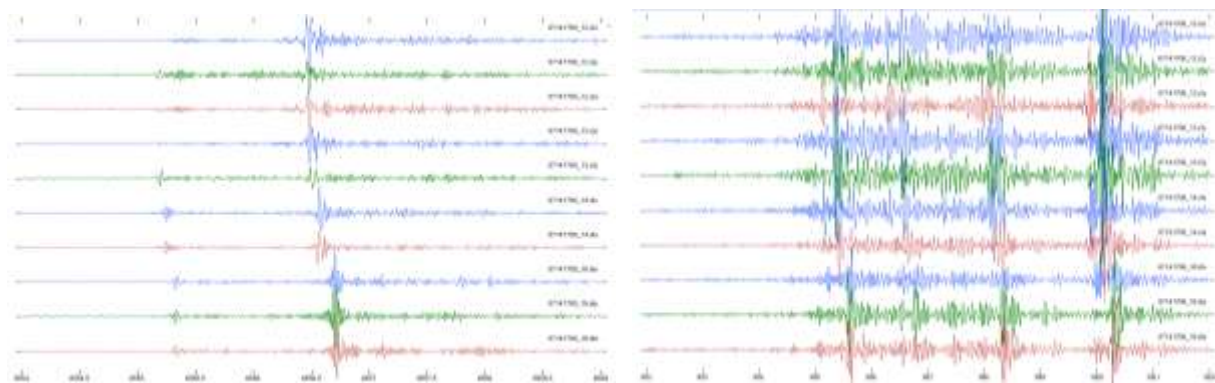


Рисунок 6. Локальные сейсмические события, регистрируемые сейсмической группой БНО. Одиночное событие (слева), множественные события (справа).

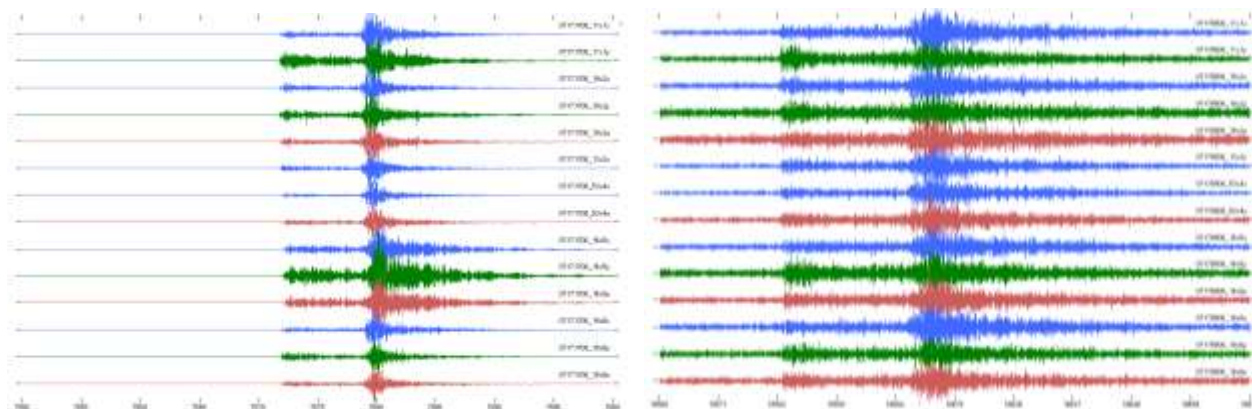


Рисунок 7. Региональные сейсмические события, регистрируемые сейсмической группой БНО с расстояний около 50 км (слева) и с расстояний 150 км (справа).

На рис. 7 приведены записи региональных событий, регистрируемых сейсмической группой БНО. По разнице прихода Р и S волн были оценены расстояния до них. На рисунке приведены события, происшедшие на расстоянии около 50 км от группы (разница прихода волн 7 сек) и на расстоянии около 150 км от группы (разница прихода волн 20 сек). Эти события ассоциированы с локальными землетрясениями в регионе.

Для зарегистрированных событий определены коэффициенты взаимной корреляции (КВК) фаз Р и S волн. Для локальных сейсмических событий для различных пар датчиков, отстоящих друг от друга от 500 м до 2500 м КВК имеет значения от 0.7-0.85 для соседних датчиков, до 0.4-0.55 для максимально удаленных датчиков (рис. 8). Для региональных событий эти значения имеют меньшую величину и составляют 0.6-0.7 для соседних датчиков до 0.2-0.55 для максимально удаленных датчиков. Определены также коэффициенты взаимной корреляции микросейсмического шума для различных пар датчиков, отстоящих друг от друга от 500 м до 2500 м. В диапазоне периодов 0.01 – 1 сек коэффициент взаимной корреляции (КВК) шума меняется от 0.15 для датчиков на расстоянии 500 м до 0.05 на расстоянии 1000-2500 м.

Таким образом, приведенные результаты пилотного эксперимента и их анализ показывают, что линейная сейсмическая группа с апертурой 2.5 км, развернутая в штольне БНО ИЯИ РАН, по уровню микросейсмических шумов и регистрируемых сигналов, а также по их корреляционным свойствам, имеет в короткопериодном диапазоне характеристики сравнимые с характеристиками современных сейсмических групп, работающих в Международной системе мониторинга [7]. Создание в БНО стационарной группы с коротко- и среднечастотными сейсмоприемниками позволит дополнить сеть сейсмических станций ГС РАН в Кавказском регионе сейсмологической системой высокого пространственного разрешения. Кроме задач региональной сейсмологии, создаваемая группа будет ориентирована на мониторинг микросейсмической активности района вулкана Эльбрус с целью определения областей активизации сейсмических процессов связанных с геодинамикой магматического очага вулкана, осуществлением сейсмоэмиссионной томографии активных областей района вулкана Эльбрус.

1. Нечаев Ю.В. Вулкан Эльбрус: материнский очаг и магматические камеры (технология мониторинга) / Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ним техногенные катастрофы»– М.: ИФЗ РАН, 2008. – Т.1: Сейсмические процессы и катастрофы, Ч.2. – С.297-302

2. Милюков В.К. Мониторинг состояния вулканических структур по наблюдениям литосферных деформаций. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 1-13.

3. Лаверов Н.П. Сейсмичность Северной Евразии / Лаверов Н.П., Маловичко А.А., Старовойт О.Е. // Материалы Международной конференции Обнинск : ГС РАН, 2008. С. 5–14.

4. Маловичко А.А. Сейсмический мониторинг разномасштабных природных процессов и катастроф // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т.1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: ИФЗ РАН, 2010 С. 131-144

5. Собисевич А.Л. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории / Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х. // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44, № 1. С. 21–42.

6. Беляшова Н.Н.// Система мониторинга ядерных испытаний НЯЦ РК: развитие и возможности / Беляшова Н.Н., Михайлова Н.Н // Вестник НЯЦ РК. 2007. Вып. 2. С 5-8.

7. Ковалевский В.В. Пилотный эксперимент по развертыванию сейсмической группы в штольне БНО ИЯИ РАН в районе Эльбрусского вулканического центра / Ковалевский, А.Л. Собисевич, А.А. Якименко // ДАН. 2012 (в печати)

8. Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise // Open-File Report 93-322, Albuquerque, New Mexico, 1993- 42 pp.

9. Михайлова Н.Н. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным Казахстанских станций мониторинга/ Михайлова Н.Н., Комаров И.И.// Вестник НЯЦ РК, 2006. - Вып.2. - С. 19 - 26.

10. Захарова О.В. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным станций НЯЦ РК / Захарова О.В., Комаров И.И. //Вестник НЯЦ РК, 2009, вып. 2. С .178-182.

## **INVESTIGATION OF SEISMIC CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND SEISMIC ARRAY IN THE REGION OF ELBRUS VOLCANIC CENTER**

**Valery V. Kovalevsky**

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

Results of studying characteristics of underground seismic array installed in a tunnel of the Baksan Neutrino Observatory, 24 km from volcano Elbrus are presented. Linear seismic group has an aperture of 2.5 km and consists of a six three-component seismic sensors SC-1P with digital recorders "Baikal". The experiment identified the main characteristics of microseismic noise in the points of seismic sensors installation, their mutual correlation, diurnal variations in the noise level, the characteristics of man-made noise, signal levels from regional and local seismic events recorded by the group.