

УДК 550.34

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ ПОДЗЕМНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППОЙ

Ковалевский В.В., Белоносов А.С., Авроров С.А., Якименко А.А.

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

В статье приведены результаты исследований методами математического моделирования характеристик направленности подземной сейсмической группы из 6 сейсмических регистраторов с площадной апертурой 2.5 км на площади 0.5 км, развернутой в штольне БНО (Баксакская нейтронная обсерватория) ИЯИ (Институт ядерных исследований) Российской академии наук (в Приэльбрусье). Основное внимание уделено исследованию погрешности определения гипоцентра локальных сейсмических событий в зависимости от расстояния и азимута относительно оси сейсмической группы, а также от погрешностей определения времен вступления волн. Приведены примеры обработки реальных записей локальных сейсмических событий.

В районе Эльбрусского вулканического центра регистрируются слабые локальные сейсмические события, порождаемые геодинамическими процессами и вулканической активностью области вулкана, включая окружающие его разломные зоны. Изучение слабой сейсмичности района вулкана, включая вулканические дрожания, является одной из основных геозоологических задач этого региона [1-3]. Сейсмический и геофизический мониторинг района Эльбрусского вулканического центра проводится Геофизической службой (ГС) РАН, Институтом физики Земли (ИФЗ) РАН, Государственным астрономическим институтом им. П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ, Кабардино-Балкарским университетом (КБГУ) на базе региональной сети сейсмических станций и лабораторий Северокавказской геофизической обсерватории [4]. В кооперации с этими организациями Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН провел экспериментальные работы, развернув линейную сейсмическую группу во вспомогательной штольне Баксанской нейтронной обсерватории ИЯИ РАН и проведя исследования локальной низкоэнергетической сейсмичности района. Штольни БНО пройдены в цельном скальном массиве горы Андырчи, имеют протяженность 4 км и находятся на расстоянии 24 км от вулкана Эльбрус [5, 6]. Развернутая сейсмическая группа состояла из 6-и трехкомпонентных сейсмоприемников СК-1П с автономными цифровыми регистраторами «Байкал» (рисунок 1).

Одной из целей экспериментальных работ было определение возможностей сейсмической группы в регистрации и локализации слабых сейсмических событий в районе вулкана Эльбрус. Для этого теоретически исследованы характеристики направленности группы, определяемые ее геометрией, экспериментально определены уровни микросейсмических шумов и сигналов локальных сейсмических событий, степень их корреляции на различных сейсмоприемниках группы. Характеристики направленности развернутой сейсмической группы из 6 сейс-

моприемников с площадной апертурой 2.5 км на 0.5 км, имеющей в плане вид линии с изломом (рисунок 1), исследованы методами математического моделирования. Основное внимание уделено оценке погрешности определения гипоцентров локальных сейсмических событий в зависимости от расстояния и азимута относительно оси сейсмической группы и от погрешностей определения времен вступления волн. Использовалась модель среды с постоянными скоростями продольных и поперечных волн  $V_p$  и  $V_s$  и заданной геометрией сейсмической группы.

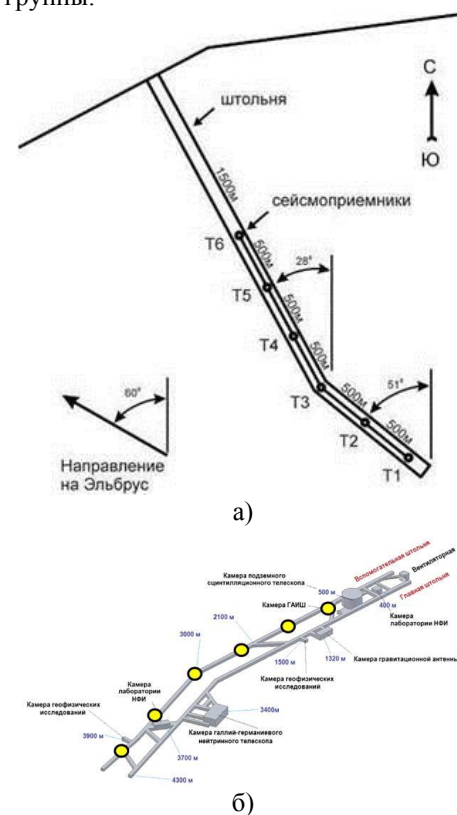


Рисунок 1. Сейсмическая группа во вспомогательной штольне Баксанской нейтронной обсерватории ИЯИ РАН: а – расположение сейсмоприемников, б – сейсмическая группа в плане

Для модельного источника сейсмического события с координатами в полупространстве  $(x_0, y_0, z_0)$  определялись времена вступлений P и S волн  $TP_{0i}$  и  $TS_{0i}$  на каждый  $i$ -ый сейсмоприемник в группе  $(x_i, y_i, 0)$ . Разность времен вступлений P и S волн на  $i$ -ый регистратор в выбранной модели определяется расстоянием до источника события  $L_{0i}$ . Этот известный алгоритм является основным при определении гипоцентров землетрясений по сети сейсмических станций. В нашем случае это дает для разности времен

$$\begin{aligned} TS_{0i} - TP_{0i} &= L_{0i} \times (1/V_s - 1/V_p); \\ L_{0i} &= ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

Для предполагаемой точки источника с координатами в полупространстве  $(x, y, z)$  определялись времена вступлений на каждый  $i$ -ый сейсморегистратор в группе  $TP_i$  и  $TS_i$  по расстоянию до источника события  $L_i$ .

$$\begin{aligned} TS_i - TP_i &= L_i \times (1/V_s - 1/V_p); \\ L_i &= ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + z^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

Далее составлялась целевая функция  $F_1$  как сумма квадратов разностей расчетных времен вступлений P и S волн от истинного положения источника  $(x_0, y_0, z_0)$  и предполагаемого  $(x, y, z)$  и производился поиск ее минимума для всех точек  $(x, y, z)$ .

$$F_1 = \sum ((TS_{0i} - TP_{0i}) - (TS_i - TP_i))^2 \quad (3)$$

Поиск минимума целевой функции  $F_1$  проведен с использованием программы минимизации из пакета NAG. При точных значениях времен прихода волн в модели координаты источника определялись точно, так как квадратичная функция  $F_1$  в этой точке равна нулю. Для оценки точности определения положения источника при наличии ошибок определения времен вступлений проведен перебор решений для времен вступлений, к которым добавлены случайные ошибки. В каждом расчете набиралась статистика из 1 млн реализаций. Это позволило получить представительный вид области определения гипоцентра при наличии ошибок в данных.

Второй вариант определения положения источника основан на использовании только разности времен прихода P волн на различные  $i$ -ый и  $j$ -ый сейсмоприемник группы  $TP_{0ij}$  и  $TP_{ij}$  из точек  $(x_0, y_0, z_0)$  и  $(x, y, z)$ :

$$\begin{aligned} TP_{0ij} - TP_{ij} &= (L_{0i} - L_{0j})/V_p - (L_i - L_j)/V_p \\ L_{0j} &= ((x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + z_0^2)^{1/2}; \\ L_j &= ((x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + z^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

В этом случае целевая функция строилась по рассогласованию разности времен прихода P волн на  $i$  и  $j$  регистраторы из точек  $(x_0, y_0, z_0)$  и  $(x, y, z)$ .

$$F_2 = \sum (TP_{0ij} - TP_{ij})^2 \quad (5)$$

Результаты расчетов по двум исследованным вариантам определения положения источника обладают существенно разными свойствами. В первом ва-

рианте информация о временах прихода P и S волн на  $i$ -ый сейсмоприемник определяет расстояние от него до события и значительно в меньшей степени – азимут события относительно оси группы. При наличии ошибок в определении времен вступлений область возможных положений события представляет часть дуги, наименьшего размера в направлении поперек оси группы, и наибольшего вдоль оси группы (рисунок 2). Кроме этого появляется ложная симметричная область локализации источника, что обусловлено почти линейной геометрией группы. Во втором варианте информация о разности времен прихода P на сейсмоприемники определяет азимут относительно оси группы на событие и значительно в меньшей степени – расстояние до события. При наличии ошибок в определении времен вступлений область возможных положений события лежит в узком угле в направлении на событие, с наименьшим размером угла в направлении поперек оси группы, и наибольшим в направлении вдоль оси группы (рисунок 2). Величина неопределенности в определении расстояния до точки события увеличивается с увеличением ошибки определения времен вступлений.

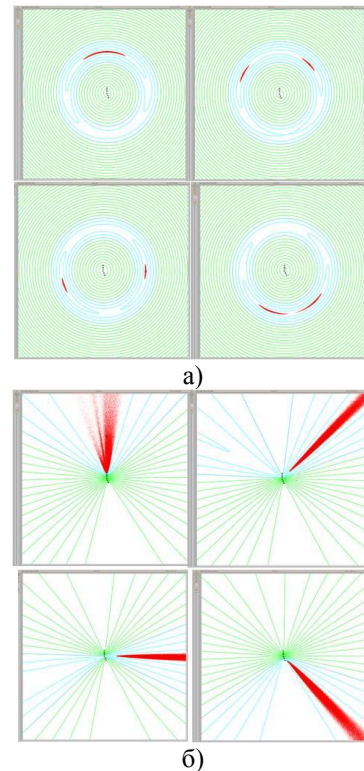


Рисунок 2. Результаты моделирования локализации источника с использованием двух вариантов определения прихода волн. Азимуты 0, 45, 90, 135 град. от оси группы. Величина ошибки времен вступлений 20 мс: а – по разности времен вступлений P и S волн, б – по разности времен вступлений P волн

Исследована возможность совместного использования данных о временах прихода P и S волн и

разности времен прихода Р волн с минимизацией суммы функций  $F_1$  и  $F_2$  с весами  $\alpha$  и  $(1-\alpha)$

$$F = \alpha \cdot F_1 + (1 - \alpha) \cdot F_2 \quad (6)$$

Результаты расчетов приведены на рисунке 3.

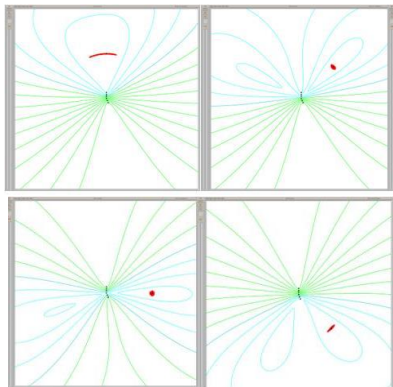


Рисунок 3. Результаты локализации источника при совместном использовании разности времен вступлений Р и S волн и по разности времен вступлений Р волн. Азимуты 0, 45, 90, 135 градусов от оси группы. Величина временной ошибки 20 мс

Подбирая веса при функциях  $F_1$  и  $F_2$  можно получить результат, в котором объединены свойства обоих подходов – близкий размер области ошибки определения гипоцентра, как по углу, так и по расстоянию, причем этот размер меньше, чем по первому и второму алгоритмам в отдельности. Большая погрешность определения гипоцентра в направлении оси группы, чем поперек, остается, она обусловлена близкой к линейной геометрией группы. Важным свойством алгоритма является то, что при его использовании не возникает ложная симметричная область локализации источника. Приведенные результаты расчета получены в предположении близкого расположения источника события к свободной поверхности. Аналогичные расчеты сделаны для исследования влияния глубины источника  $Z$  на точность определения его координат.

Для обработки экспериментальных данных подготовлено программное обеспечение, ориентированное на особенности регистрации линейной сейсмической группой. Развита многофункциональная компьютерная программа V12 (Лаборатория геофизической информатики ИВМиМГ СО РАН), предназначенная для обработки, анализа и визуализации записей сейсмических сигналов (сейсмотрасс). Анализ осуществляется во временной, частотной, частотно-временной и пространственной областях. Функциональной особенностью программы является использование временного и частотного окон, которые могут перемещаться по сейсмограмме вперед-назад вручную или автоматически с одновременной обработкой, анализом и визуализацией результатов в пределах текущего окна. В программе V12 для анализа сейсмических сигналов, регистрируемых линейными группами, разработана проце-

дура «Фокусировка». В ее основе лежит направленное пространственное суммирование сейсмотрасс со взвешиванием на ступенчатую огибающую суммарной трассы. Предусмотрено дополнительное взвешивание на сумму огибающих по преобразованию Гильберта (по энергии). Использование многополосного частотного фильтра и преобразование Гильберта позволяет получать спектрограммы (частотно-временные спектры) с оптимальным соотношением разрешений по времени и частоте. На рисунке 4 представлены фрагменты сейсмической записи с локальными сейсмическими событиями, регистрируемые группой в БНО. После частотной и пространственной фильтрации с использованием программы V12 удастся выделить слабые сейсмические события для дальнейшей обработки и локализации.

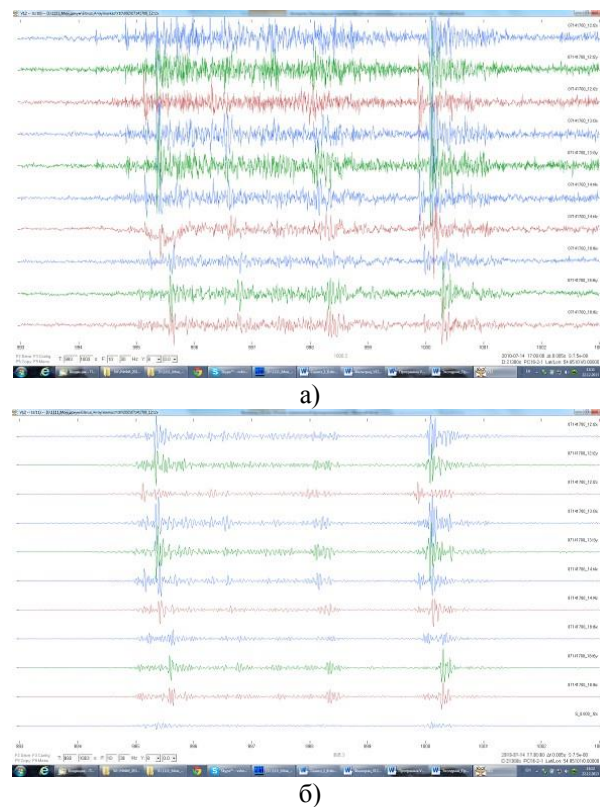


Рисунок 4. К результатам применения программы V12 для фильтрации записи с локальными сейсмическими событиями, зарегистрированными подземной группой в БНО: а – исходная запись, б – запись после частотной и пространственной фильтрации

Обнаружение сейсмических волн локальных сейсмических событий методом корреляционного анализа и измерение их параметров: амплитуды, времени вступления, коэффициента корреляции, проводятся специализированным программным обеспечением. Программный инструментальный представляет собой приложение с графическим интерфейсом пользователя (GUI) и включает в себя: средства поддержки форматов представления сейс-



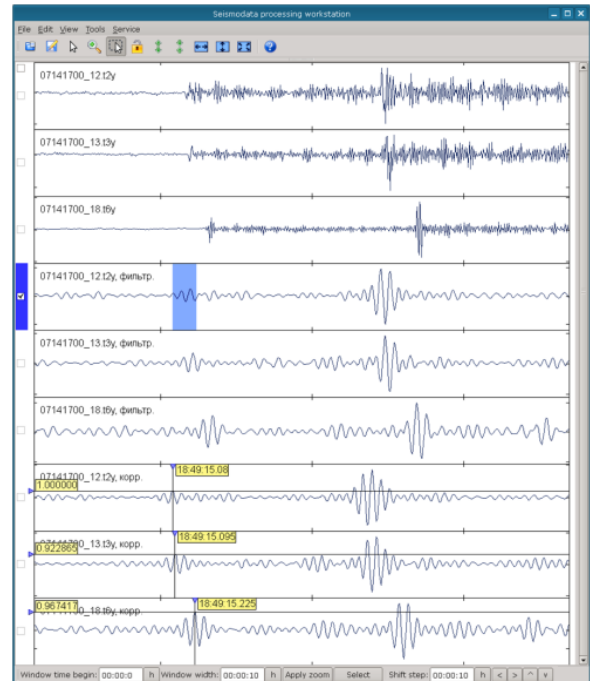
мических данных «Байкал ASN-88» на чтение и запись, интерактивные средства визуализации многоканальных сейсмических записей, полученных в результате регистрации, программные средства цифровой фильтрации данных на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Реализованы режимы фильтрации «band-pass» и «band-cut», возможность задания множественных полос частот, а также изменение длины БПФ. Включены интерактивные средства выбора опорного сигнала — участка записи из массива исходных сеймотрасс, представляющего собой искомый эталон импульсной волновой формы. Процесс создания опорного сигнала заключается в выделении временного интервала на диаграмме, содержащего волновую форму Р или S волн. Далее производится обнаружение волновых форм на всех сеймотрассах на основе вычисления взаимной корреляционной свёртки многоканальных сейсмических записей по эталону с использованием БПФ. При этом оценивается коэффициент корреляции с опорным сигналом для всех каналов данных и по временному положению его максимума определяются времена вступления волн. Интерфейс программы корреляционного анализа показан на рисунке 5.

С использованием разработанного программного обеспечения был выполнен анализ взаимной корреляции микросейсмического шума на различных компонентах сейсмоприемников сейсмической группы. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты взаимной корреляции микросейсмического шума на различных компонентах датчиков сейсмической группы

	t2x	t2y	t2z	t3x	t3y	t3z	t4x	t4z	t6x	t6y	t6z
t2x	1	0,20	0,24	0,27	0,20	0,29	0,18	0,15	0,18	0,23	0,17
t2y	0,22	1	0,21	0,15	0,17	0,15	0,18	0,13	0,18	0,17	0,14
t2z	0,22	0,19	1	0,16	0,18	0,07	0,16	0,13	0,20	0,20	0,13
t3x	0,27	0,15	0,19	1	0,14	0,41	0,18	0,17	0,21	0,22	0,16
t3y	0,14	0,15	0,15	0,21	1	0,09	0,15	0,15	0,18	0,13	0,16
t3z	0,29	0,16	0,11	0,37	0,15	1	0,24	0,20	0,14	0,16	0,22
t4x	0,23	0,19	0,16	0,21	0,17	0,24	1	0,14	0,15	0,16	0,15
t4z	0,19	0,18	0,13	0,17	0,18	0,17	0,12	1	0,15	0,14	0,16
t6x	0,17	0,20	0,18	0,14	0,16	0,14	0,14	0,16	1	0,18	0,17
t6y	0,21	0,19	0,19	0,20	0,12	0,13	0,17	0,15	0,19	1	0,13
t6z	0,16	0,15	0,17	0,13	0,16	0,12	0,16	0,14	0,18	0,17	1

Как видно из таблицы 1, значения коэффициента корреляции между различными датчиками лежат в пределах 0,12 – 0,27 с превышением максимального значения для нескольких компонент. При выделении сейсмических волн локальных сейсмических событий методом корреляционного анализа были определены коэффициенты взаимной корреляции участков Р и S волн на различных компонентах датчиков сейсмической группы и времена вступлений. Анализ проведен в диапазоне частот 10 – 20 Гц после фильтрации сеймотрасс. В качестве примера в таблице 2 приведены результаты обработки



Вверху – 3 исходные записи; в середине – 3 отфильтрованные записи в диапазоне 10 - 20 Гц; внизу – результаты взаимной корреляционной свёртки. Метками показаны автоматически вычисленные времена вступлений волн Р и коэффициенты корреляции с опорным сигналом, который выделен синим цветом на средней диаграмме

Рисунок 5. Интерфейс программы обнаружения и измерения параметров сейсмических волн методом взаимной корреляционной свёртки

записи события, приведенного на рисунке 6. Для волны Р коэффициенты взаимной корреляции лежат в пределах 0,87 – 0,97, для волны S эти значения составляют 0,91 – 0,99. Точность определения времен вступлений Р и S волн составляет 0,01 сек. Это позволяет достаточно точно определить времена вступлений волн на различных сейсмоприемниках группы, разность которых между вторым и шестым сейсмоприемниками группы составляет для Р-волн 0,19 сек, а для S-волн 0,24 сек.

Таблица 2. Коэффициенты взаимной корреляции участков P и S волн на различных компонентах сейсмоприемников сейсмической группы и времена вступления

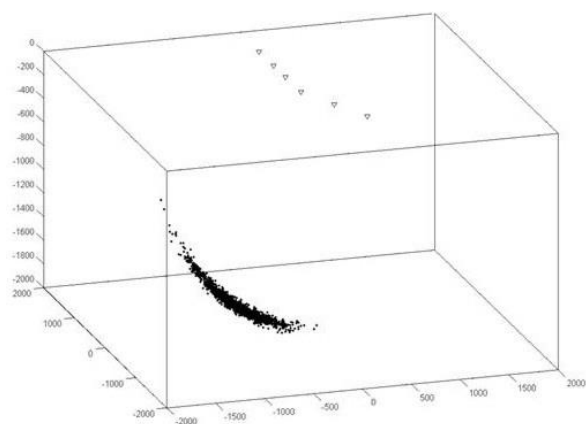
Волна P				
Коэффициент корреляции				
	t2x	t3x	t4x	t6x
t2x	1	0,86	0,96	0,97
t3x	0,93	1	0,91	0,87
t4x	0,96	0,92	1	0,97
t6x	0,97	0,87	0,97	1,00
Времена вступления				
	t2x	t3x	t4x	t6x
t2x	5,09	5,15	5,23	5,28
t3x	5,08	5,15	5,22	5,28
t4x	5,10	5,16	5,24	5,29
t6x	5,10	5,16	5,24	5,29
Волна S				
Коэффициент корреляции				
	t2y	t3y	t4z	t6y
t2y	1	0,99	0,91	0,96
t3y	0,99	1	0,93	0,99
t4z	0,96	0,93	1	0,97
t6y	0,96	0,98	0,97	1
Времена вступления				
	t2y	t3y	t4z	t6y
t2y	6,39	6,42	6,52	6,63
t3y	6,39	6,42	6,52	6,63
t4z	6,39	6,42	6,51	6,63
t6y	6,39	6,42	6,51	6,63

Предложенный подход был применен для определения гипоцентров локальных сейсмических событий, зарегистрированных сейсмической группой (рисунок 6а, б). Для оценки влияния погрешностей в определении времен вступления волн, к реальным значениям времен были добавлены случайные ошибки. Это позволило выделить область возможного положения гипоцентра события (рисунок 6а).

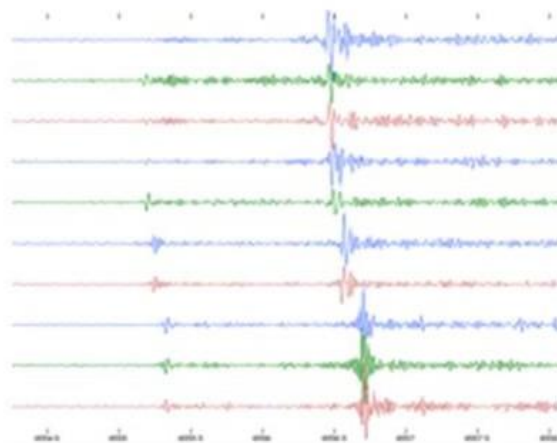
Из рисунка 6а видно, что геометрия группы, близкая к линейной, накладывает ограничения на точность определения глубин гипоцентров событий. При наличии ошибок в определении времен вступлений область возможных положений гипоцентров представляет собой часть дуги окружности, однако при этом можно оценить как азимут, так и глубину локализации события.

Таким образом, проведенный эксперимент показал, что развернутая подземная сейсмическая группа в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН является эффективным инструментом для регистрации слабых локальных сейсмических событий в Приэльбрусье и исследования низкоэнергетической сейсмичности района вулкана. Разработанное программное обеспечение и алгоритмы обработки слабых сейсмических событий обеспечивают их выделение и определение времен вступлений P или S волн для локализации событий и определения их характеристик. Исследованы ограничения в

определении гипоцентров событий, которые накладывает линейная геометрия подземной группы. Существенное улучшение характеристик группы может быть получено при создании дополнительных, одной или двух, сейсмических станций, расположенных на расстоянии 1 – 2 км в поперечном направлении от штольни БНО ИЯИ РАН в скальном массиве горы Андырчи. Это позволит обеспечить более равномерную пространственную апертуру группы, сравнимую с характеристиками современных сейсмических групп, работающих в Международной системе мониторинга [7, 8], и повысить точность определения сейсмических событий в районе вулкана Эльбрус, что улучшит выявление областей активизации сейсмических процессов, связанных с геодинамикой магматического очага вулкана.



а)



б)

Рисунок 6. Пример пространственной локализации сейсмического события, зарегистрированного подземной сейсмической группой: а – результаты локализации, б – трехкомпонентная сейсмограмма

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-05-00786, проекта ИП СО РАН № 54, проекта Президиума РАН 4.9.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нечаев, Ю.В. Вулкан Эльбрус: материнский очаг и магматические камеры (технология мониторинга) / Ю.В.Нечаев, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич // 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. Лаверов, Н.П. Сейсмичность Северной Евразии / Н.П., Лаверов, А.А Маловичко, О.Е. Старовойт // Материалы Международной конференции, Обнинск : ГС РАН, 2008. – С. 5 – 14.
3. Маловичко, А.А. Сейсмический мониторинг разномасштабных природных процессов и катастроф / А.А. Маловичко // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т.1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: ИФЗ РАН, 2010 - С. 131 - 144
4. Собисевич, А.Л. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории / А.Л. Собисевич, Д.Г. Гриднев, Л.Е. Собисевич, К.Х. Канониди // Сейсмические приборы, 2008. – Т. 44, № 1. – С. 21 – 42.
5. Ковалевский, В.В. О характеристиках подземной сейсмической группы в Приэльбрусье / В.В. Ковалевский // Вестник НЯЦ РК, 2013. – № 2. – С. 18 - 23.
6. Ковалевский, В.В. Исследование параметров локализации сейсмических событий подземной сейсмической группой в Приэльбрусье / В.В. Ковалевский, А.С. Белоносов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2014. - С. 202 - 206.
7. Беляшова, Н.Н. Система мониторинга ядерных испытаний НЯЦ РК: развитие и возможности / Н.Н. Беляшова, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК, 2007. – Вып. 2. –С .5 - 8.
8. Михайлова, Н.Н. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным Казахстанских станций мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК, 2006. - Вып.2. - С. 19 - 26.

### ЖЕРАСТЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ТОБЫМЕН ЭЛЬБРУС ЖАНЫНДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ОҚИҒАЛАРДЫ ЖЕРГІЛІКТЕУ

Ковалевский В.В., Белоносов А.С., Авроров С.А., Якименко А.А.

*РҒА СБ Есептеу математика және математикалық геофизика институты, Новосибирск қ., Ресей*

Мақалада, Ресей ғылыми академиясы ЯЗИ (Ядролық зерттеулер институты) БНО (Баксак нейтрондық обсерватория) штольнясында (Эльбрус жанында) жайластырылған 6 сейсмикалық тіркеуіштен тұратын, 0,5 км алаңында 2,5 км аландық апертурасымен жерасты сейсмикалық топтың бағыттық сипаттамаларын математикалық моделдеу әдістерімен зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Негізгі назар, қашықтықтығына және сейсмикалық топтың осіне қатысты азимутына байланысты локаль сейсмикалық оқиғалардың гипоорталықтарын анықтау қателіктерін, сондай-ақ толқындар түсу уақыттарын анықтау қателіктерін зерттеуіне аударылған. Локаль сейсмикалық оқиғалардың нақты жазбаларын өңдеу үлгілері келтірілген.

### LOCALIZATION OF SEISMIC EVENTS BY UNDERGROUND SEISMIC ARRAY IN ELBRUS REGION

V.V. Kovalevsky, A.S. Belonosov, S. A. Avrorov, A. A. Yakimenko

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

The paper presents the results of studies using mathematical modeling of directional characteristics of underground seismic array from 6 seismic recorders with areal aperture of 2.5 km by 0.5 km, deployed in a tunnel BNO (Baksak Neutron Observatory) of INR (Institute of Nuclear Research) of Russian Academy of Science (in Elbrus region). Emphasis is placed on the definition of the error in determining hypocenters of local seismic events depending on the distance and azimuth with regards to the axis of the seismic array and errors in determining the arrival times of the waves. Examples of real records processing of local seismic events are presented.