

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ СРЕД ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Б.М. Глинский, Н.В. Кучин, А.Г. Фатьянов

Конец прошлого века был ознаменован разработкой и применением методов активной сейсмологии на основе использования сейсмических вибраторов [1,2,3]. Одно из основных направлений работ в этой области связано с решением проблемы прогноза природных катастроф и, прежде всего, землетрясений, извержений вулканов. Развиваемые при этом подходы базируются на изучении вариаций напряженно-деформированного состояния земной коры, предшествующих катастрофам. Использование вибросейсмического метода, обладающего высокой разрешающей способностью, позволяет изучать тонкие структурные изменения волновых полей в районах готовящихся катастроф. Однако реализация этого метода требует детального изучения волновых полей, генерируемых вибратором и проходящих через изучаемую среду. Решение подобных задач требует высокопроизводительных вычислений с использованием современных суперЭВМ. В работе приводятся результаты расчета волновых полей при моделировании вулкана Эльбрус, даются оценки эффективности численных расчетов этой сложной задачи на кластерах ССКЦ (платформы Alpha и Itanium). Предлагается принцип построения системы вибросейсмического мониторинга вулкана Эльбрус и сейсмоопасных очагов Северного Кавказа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Математическая постановка задачи моделирования сейсмических волновых полей формулируется в декартовой системе координат следующим образом: определить компоненты вектора смещения для неупругой трансверсально-изотропной среды, которые удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + F_x f(t), \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + F_y f(t), \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + F_z f(t), \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными условиями при $t=0$

$$u_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = u_y = \frac{\partial u_y}{\partial t} = u_z = \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0,$$

и граничными данными при $z=0$

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0.$$

Предполагается, что компоненты тензора напряжений связаны с компонентами тензора деформаций известными соотношениями для анизотропной среды.

Здесь F_x, F_y, F_z - компоненты вектора силы, описывающие сосредоточенные источники различного типа.

Специальный выбор компонентов вектора сил позволяет также учитывать и источники типа тензора сейсмического момента. Для этого достаточно задать, например, F_x в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_x &= M_{xx} \delta'(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0) + \\ &M_{xy} \delta(x - x_0) \delta'(y - y_0) \delta(z - z_0) + M_{xz} \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta'(z - z_0). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь M_{ij} - компоненты тензора сейсмического момента [4]. Аналогично, в случае рассмотрения источника типа тензора сейсмического момента, задаются и компоненты вектора сил F_y, F_z [5].

В основу теории расчёта волн в анизотропных неупругих средах взяты соотношения Вольтерра, учитывающие влияние упругого последствия. А именно, упругие постоянные c_{ij} заменяются интегральными операторами C_{ij} [6].

$$C_{ij} x \equiv c_{ij} x(t) - c'_{ij} \int_{-\infty}^t h_{ij}(t-\tau) x(\tau) d\tau$$

Здесь c'_{ij} - параметры, определяющие уровень поглощения. Функции последствия (ядра) определяют спектральный состав поглощения. Рассматривается случай трансверсально-изотропной неупругой среды. В этом случае свойства среды одинаковы во всех направлениях плоскости xOy .

Упругие и неупругие параметры здесь предполагаются произвольными кусочно-непрерывными функциями по переменной x и кусочными по z .

В данной работе, применительно, к зонам вулканической деятельности основное внимание уделяется моделированию с учётом разномасштабности и сложной геометрии среды.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЁТЫ

Проведено сравнение расчётов, выполненных на разных процессорах (Alpha, Itanium). Расчёт проведён для среды, представляющей эллиптическое включение в однородное полупространство, моделирующее магматическую область. В этом случае среда аппроксимируется с помощью некоторого количества прямоугольных пластин.

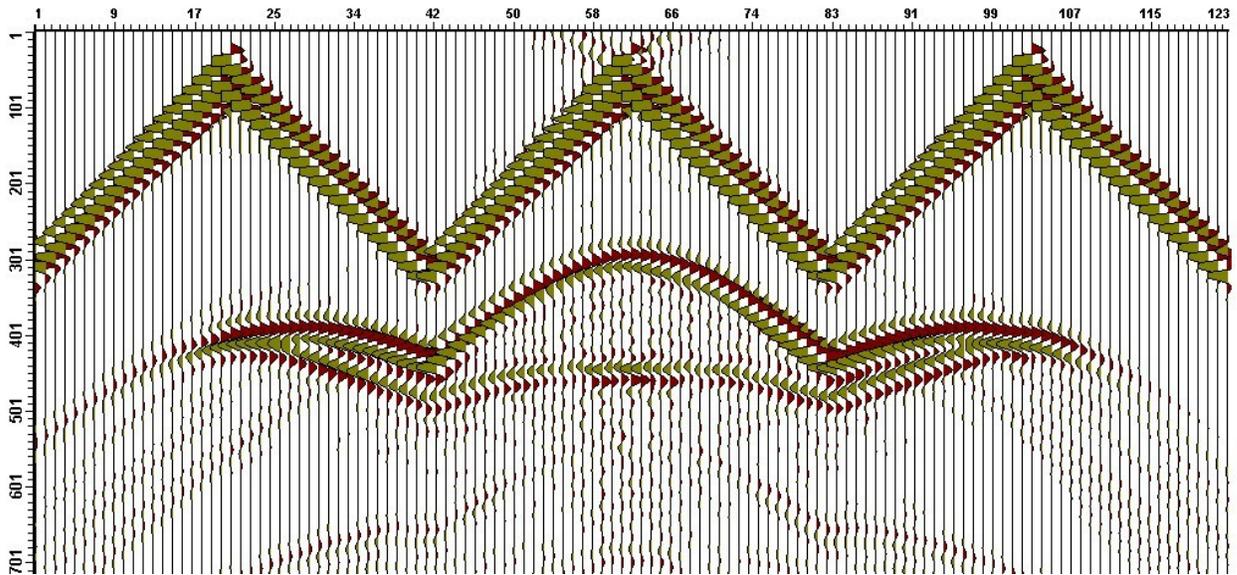


Рис. 1. Расчёт на процессоре Alpha

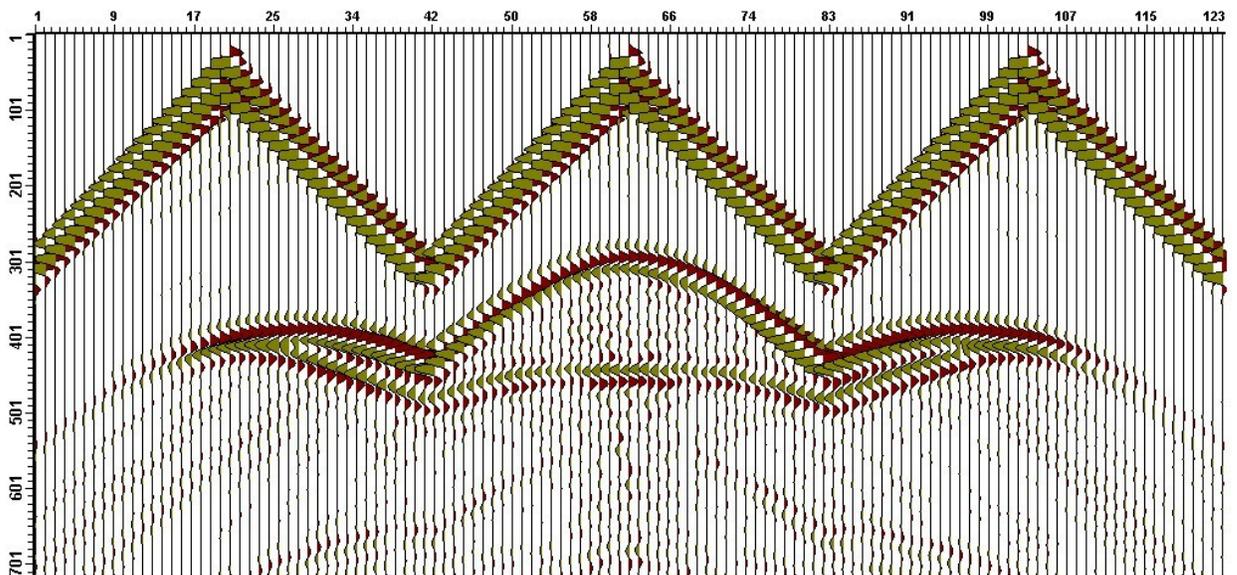


Рис. 2. Расчёт на процессоре Itanium

Графики на рис. 1-2. выданы в одном масштабе с большим усилением амплитуды. Численное моделирование показывает, что результаты расчётов одной программы на разных процессорах различаются. Связано это, по-видимому, со спецификой сложных задач дифракции. Здесь, в частности, в алгоритме нахождения решения используются процедуры линейной алгебры: обращение матриц, нахождение собственных значений и т.д. Из физических соображений видно, что точность вычисления на Itanium выше, чем на Alpha. При качественной схожести волновых полей, при расчёте на Itanium нет, например, помех, связанных с прямой волной. Кроме того, более чётко прослеживается первое вступление от эллипсообразной структуры. Отметим так же, что результаты численного моделирования показывают более высокую производительность процессора Itanium. Расчёт на процессоре Itanium проводится в три раза быстрее, чем на процессоре Alpha. Трансляция на обоих процессорах проводилась с одним ключом оптимизации.

Всё это, в целом, позволяет говорить о том, что современная архитектура Itanium лучше приспособлена для решения сложных задач математической физики.

Для моделирования реальных очаговых зон ниже приведён пример расчёта волновых полей для магматической камеры живущего вулкана Эльбрус. Сложная геологическая форма постройки вулкана Эльбрус и недостаточный объём информации о физико-механических свойствах магмы накладывают известные трудности в построении реальной модели исследуемого явления. На рис. 3 приведены волновые поля для очаговой зоны вулкана Эльбрус (Собисевич А.Л. и др., Катастрофические процессы, Москва, 2002). Эта модель характеризуется пачкой слоёв, соответствующей осадочным породам, гранитам и базальтам. Магматическая камера взята в виде квадратного включения. При этом очаговая зона является не полый, а содержит среду с более низкой скоростью.

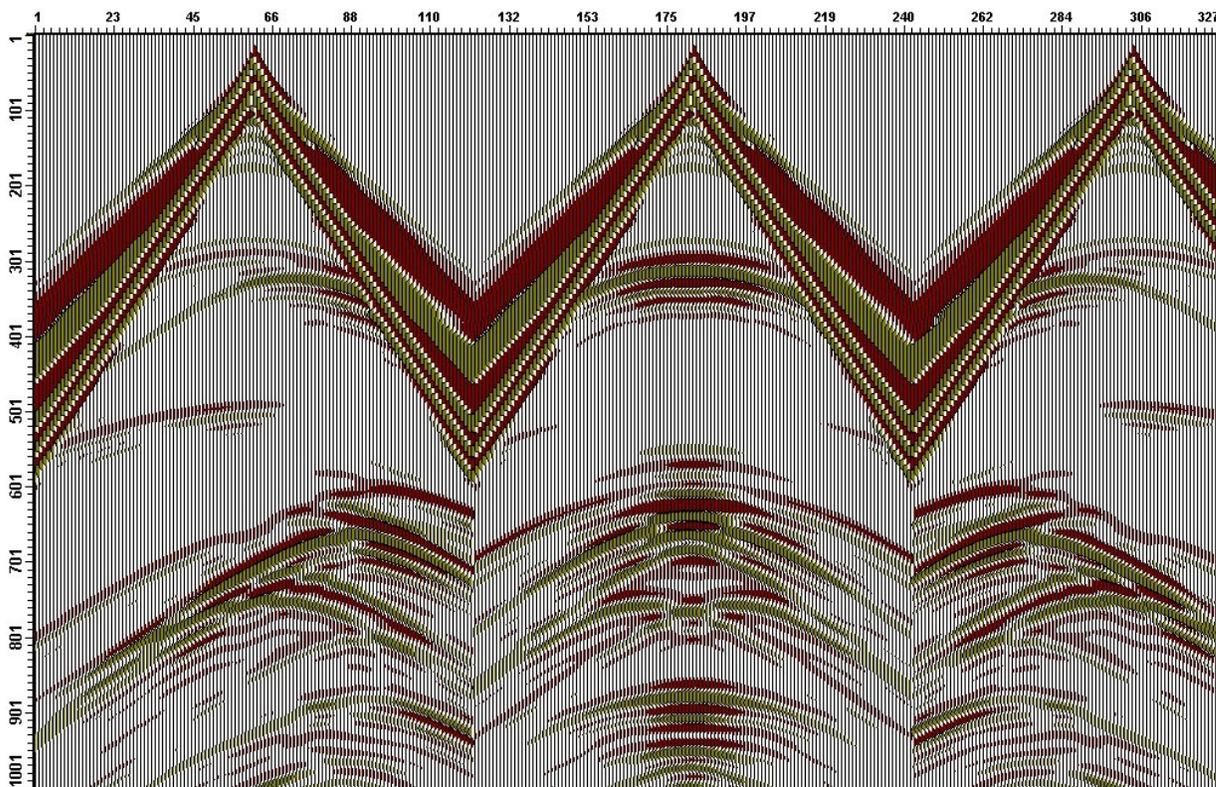


Рис. 3. Волновые поля для очаговой зоны (Собисевич А.Л. и др.).

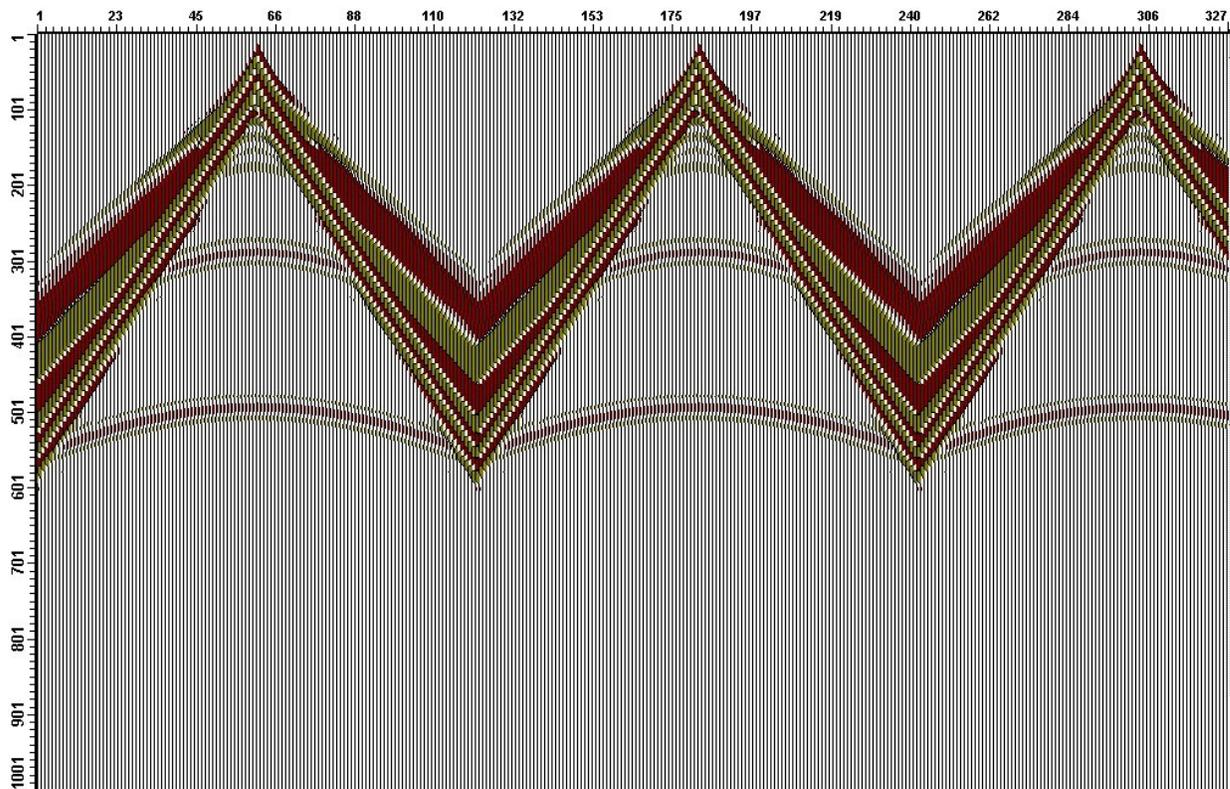


Рис. 4. Волновые поля при отсутствии очаговой зоны.

На рис. 4 для сравнения приведены волновые поля для такой же модели, как и на рис. 3. Но в этом случае отсутствует очаговая зона вулкана Эльбрус. Из сравнения рис. 3-4. видно, что в случае наличия очаговой зоны волновая картина имеет гораздо более сложный и информативный вид.

При проведении численных расчетов были использованы вычислительные платформы

МВС-1000 Сибирского Суперкомпьютерного Центра с процессорами Alpha 21264/833 MHz/4 Mb SLC, 2 Gb RAM под управлением Red Hat Linux 7.2, транслятор Compaq Fortran cfal-1.2.0-4 и сервер hp Integrity rx5670 с 4 процессорами Intel Itanium 2, 1.3 ГГц, 3 Мбайт кэш, 4 Гбайт, Red Hat Linux Advanced Server release 2.1AS, транслятор Intel Fortran v. 8.0.

В описанном вычислительном эксперименте оценивались как производительность процессоров Alpha 21264 и Intel Itanium 2, так и переносимость (portability) программ между этими платформами. Для переноса программы на платформу Itanium 2 потребовалась только перетрансляция исходного текста программ, никаких изменений в исходный текст не вносилось. Расчет проводился на одних и тех же данных, программа целиком размещалась в оперативной памяти. Поэтому ускорение счета алгоритма только частично объясняется более высокой тактовой частотой процессора Itanium 2 (в 1.56 раза).

Вычислительные ресурсы Сибирского Суперкомпьютерного Центра (ССКЦ) используются как инструмент для решения научных проблем. Оптимизация алгоритма программы под конкретную вычислительную платформу не производилась. Вычислительная платформа на базе Itanium 2 удачно подходит для решения задач математической физики, в частности, описанной выше и обеспечивает существенный выигрыш в производительности и более точный (с точки зрения конечного пользователя) результат. Как было отмечено выше при расчете на Itanium эта задача решалась в 8 раз быстрее, чем на платформе Alpha, хотя по тактовой частоте они отличаются примерно в 1,66 раза.

КОНЦЕПЦИЯ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВУЛКАНА ЭЛЬБРУС

На основании данных расчетов предлагается схема мониторинга вулкана Эльбрус с применением мощных вибросейсмических источников. Рассмотрим некоторые аспекты построения вибросейсмического метода и системы для мониторинга вулканов.

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является применение контролируемых вибрационных источников, позволяющих проводить излучение сейсмических волн в различных режимах (монохроматическом, свип-сигналов и др.) с высокой степенью точности. Это преимущество основано на высокой и долговремен-

ной стабильности параметров излучения вибрационных сигналов, которые обеспечиваются современными системами компьютерного управления вибраторами [2-3]. На Быстровском полигоне под Новосибирском разработаны и смонтированы несколько типов излучателей. Самый мощный стационарный центробежный вибратор ЦВ-100 обеспечивает усилия на грунт до 100 тонн в полосе частот от 5 до 8.5 Гц. Основанный на этом принципе сборно-разборный источник передвижного типа ЦВ-40 обеспечивает усилия на грунт до 40 тонн в полосе частот от 6 до 10 Гц [3]. Именно такого типа источники могут быть применены для изучения вулканических структур. Для синхронизации процессов излучения и приема вибросейсмических сигналов используются GPS-приемники.

Результаты моделирования показали, что расположение источника (в данном случае вибратора) имеет существенное влияние на формирование волнового поля. Оно максимально, если вибратор расположен над центром магматической области. При удалении вибратора от изучаемого объекта волновое поле существенно изменяется. Таким образом, целесообразно установить вибратор как можно ближе к вершине Эльбруса. Для наблюдений в режиме мониторинга можно использовать стационарную региональную сеть сейсмических наблюдений на Северном Кавказе. Существующая в ЦОМЭ сеть сейсмических наблюдений в регионе Северного Кавказа, позволяет без пропусков регистрировать землетрясения с $K=6-7$ только для территории Кавминводского геодинамического полигона, с $K=8$ - для Центральной части Северного Кавказа, землетрясения с $K=9$ для южной части Ставропольского края, юго-западных районов Краснодарского края, Карачаево-Черкессии, Кабардино-Балкарии, РСО-Алании и Ингушетии. Землетрясения с $K=10$, регистрируемые этой сетью, представительны практически для всей территории Северного Кавказа (обозначены на рис. 5 пустыми треугольниками). Аналоговые станции расположены в городах Анапа, Сочи, Пятигорск, Махачкала, Ессентуки и поселке Цей. Их наблюдения используются для определения параметров гипоцентров землетрясений не только в регионе Северного Кавказа, но и на телесеismicких расстояниях.

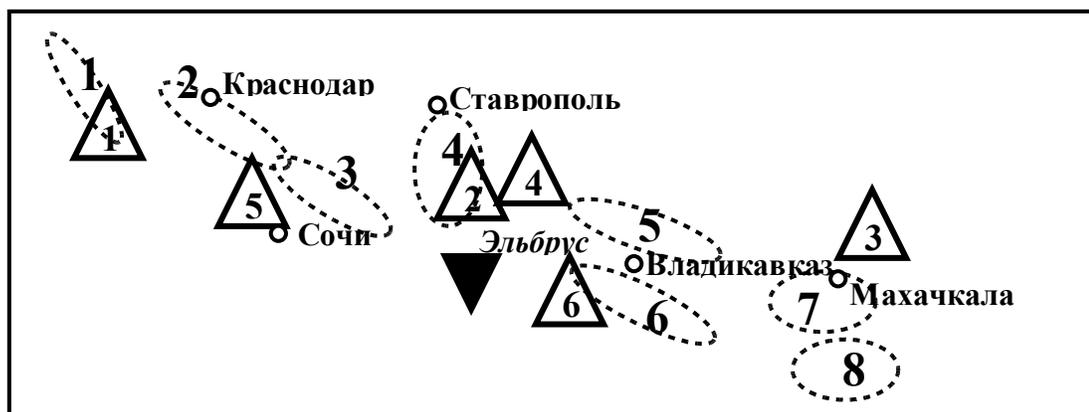


Рис. 5. Схема сети аналоговых сейсмических станций и потенциальных очагов сильнейших землетрясений Северного Кавказа. В очагах 1,3,6,7,8 - $M_{max} > 7$. В очагах 2,5 - $M_{max} < 7$

Однако аналоговые станции являются не лучшим вариантом для вибросейсмических наблюдений. Отсутствие цифровых записей сильно затруднит получение корреляционных сейсмограмм и применения методов интерферометрии, наиболее чувствительного к динамическим изменениям среды. Наиболее приемлемы цифровые станции: широкополосная цифровая сейсмическая станция KIV; сейсмическая микрогруппа KIVMA, которые являются автоматическими станциями локальной сети Кавминводского геодинамического полигона.

Производство наблюдений на станциях Северо-Кавказских сетей осуществляется Опытно-методической экспедицией ГС РАН. Потребуется согласование с этой службой для использования станций Северо-Кавказских сетей в режиме непрерывной записи при проведении мониторинга магматической камеры Эльбруса с помощью сеансов вибросейсмического зондирования. Наилучшим решением было бы применение автономных передвижных станций типа RefTek (либо отечественный аналог «Байкал»), которые бы разворачивались вокруг Эльбруса с радиусом 15-50 км на время сеансов вибросейсмических зондирований.

К достоинствам подхода с использованием стационарной сети сейсмологических станций этого региона следует отнести возможность также вибросейсмического мониторинга сейсмоопасных зон Северного Кавказа, указанных на рис.5. Землетрясение силой около 4 баллов, которое произошло в ноябре 2004 года в районе Сочи, говорит о повышенной сейсмоопасности этого региона. Однако эта возможность применения вибратора нуждается в детальной проработке и экспериментальном опробовании.

Таким образом, в настоящее время имеются все предпосылки для организации системы мониторинга живущего вулкана Эльбрус. Ключевым моментом для реализации этой идеи является необходимость изготовления мощного низкочастотного вибратора и установка его в непосредственной близости от вершины вулкана. В пяти кило-

метрах от вершины такая площадка имеется, а в АСФ ГС СО РАН разработан передвижной источник с усилием на грунт 40 тонн, который может быть размещен в непосредственной близости от Эльбруса, рис.5 (перевернутый треугольник).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 07-05-00858, №07-07-00214), программы РАН № 16.13, Интеграционного проекта СО РАН № 16.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.С. Алексеев, Б.М. Глинский и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск. Издательство СО РАН, 2004г. С. 387.
2. Б.М. Глинский Техника и методика большемасштабных вибросейсмических экспериментов. //ИСТ 2000. Сборник статей. НГТУ, Новосибирск, 2001, С. 52-56.
3. А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, А.Ф. Еманов, и др. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. //Коллективная монография под ред. Ак. Н.П. Лаврова. Изд. "Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики", Москва, 2002г, с. 400.
4. К. Аки, П. Ричардс Количественная сейсмология. – М.: Мир, 1983. – 880с.
5. А.Г. Фатьянов Прямые и обратные задачи для тензора сейсмического момента в слоистых средах. // ДАН, 1991, т. 317, №6, 1991. – с. 1357-1361.
6. А.Г. Фатьянов Нестационарные сейсмические волновые поля в неоднородных анизотропных средах с поглощением энергии. – Новосибирск. 1989. – 44с. – (Препринт / АН СССР Сиб Отд-ние ВЦ; 857)