

УДК 550.34.01 : 519.245 : 004.436

## Моделирование сейсмической локации в трёхмерных средах

В.Э. Асминг, Ю.А. Виноградов, А.В. Прокудина

Кольский филиал Геофизической службы РАН

**Аннотация.** Дано описание и представлен принцип работы программы "Сейсмоконфигуратор", разработанной в Кольском филиале Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН). Показано, что данная программа позволяет задать трёхмерную скоростную модель сейсмической среды, лоцировать в ней сейсмические события и моделировать ошибки локации, вызванные неточностью скоростной модели и погрешностями измерений времён приходов сейсмических волн на станции. Применён новый подход к моделированию, в котором проводящая среда заменяется стохастическим графом из большого числа вершин и рёбер. Для описания моделей предложен простой язык задания параметров.

**Abstract.** The description and principle of operation of the Seismic configurator programme developed in the Kola branch of Geophysical Survey of RAS have been presented. The programme allows a user to specify 3D seismic medium velocity models, to locate seismic events and to model location errors caused by uncertainties of travel time models and onset picking errors. A new approach to modeling (the seismic medium is replaced by a random graph consisting of large number of vertices and edges) has been applied. Models have been specified by a simple parameters description language.

**Ключевые слова:** сейсмическая локация, сеть сейсмостанций, скоростная модель, моделирование, стохастический граф  
**Key words:** seismic location, seismic network, velocity model, modeling, random graph

### 1. Введение

В ОАО "Апатит" проводится непрерывный сейсмический мониторинг полей объединённого Кировского и Расвумчоррского рудников (Хибинский горный массив) при помощи собственных локальных сейсмосетей. Кольский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) выполняет мониторинг сейсмичности всей Европейской Арктики. В 2010 г. обе системы мониторинга были объединены для наблюдения за сейсмичностью Хибинского массива (Аккуратов и др., 2011). Точность локации сейсмических событий в пятидесятикилометровой зоне производственной деятельности ОАО "Апатит" существенно ниже, чем в зоне подземных рудников, контролируемых системой сейсмических станций ОАО "Апатит". Так, например, в зоне рудников Кировский и Расвумчоррский ошибка локации эпицентров сейсмических событий составляет десятки метров, в зоне карьера Центральный она увеличивается до первых сотен метров, а в зоне карьеров рудника Восточный, хвостохранилищ АНОФ-2 и АНОФ-1 может достигать километра и более. Такая точность недостаточна для целей мониторинга. Повышение точности локации возможно двумя способами – увеличением количества станций наблюдения и уточнением используемой скоростной модели. В то же время, обеспечение максимальной точности на всей контролируемой территории экономически нецелесообразно и трудноосуществимо по техническим причинам. Для понимания, насколько установка новых станций и схема их расположения обеспечит достаточное качество наблюдений, необходимо математическое моделирование сейсмической локации в трёхмерных средах, в том числе с учётом изменяющейся в ходе проходки геометрии горных выработок.

В КФ ГС РАН разработана программа "Сейсмоконфигуратор". Программа позволяет задать трёхмерную скоростную модель сейсмической среды – горизонтально-слоистую среду с вкрапленными в неё телами произвольной формы, в которых могут быть заданы сейсмические скорости, отличающиеся от скоростей в окружающей среде, в том числе и нулевые (пустоты); лоцировать в этой среде сейсмические события и моделировать ошибки локации, вызванные неточностью скоростной модели и погрешностями измерений времён приходов сейсмических волн на станции.

### 2. Принцип локации сейсмических событий

*Стохастический граф.* В данной модели трёхмерная проводящая сейсмические волны среда заменяется стохастическим графом (рис. 1). Это набор вершин – точек, случайным образом "высыпанных" в интересующую нас область Земли, и рёбер – связей между ними. Связи задаются между вершинами, находящимися не дальше заданного расстояния друг от друга. Для каждой пары вершин по скоростной модели рассчитываются времена пробега волн между ними. Это – веса рёбер в нашем стохастическом графе.

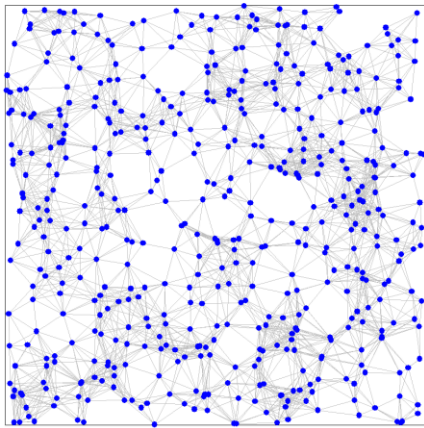


Рис. 1. Фрагмент стохастического графа

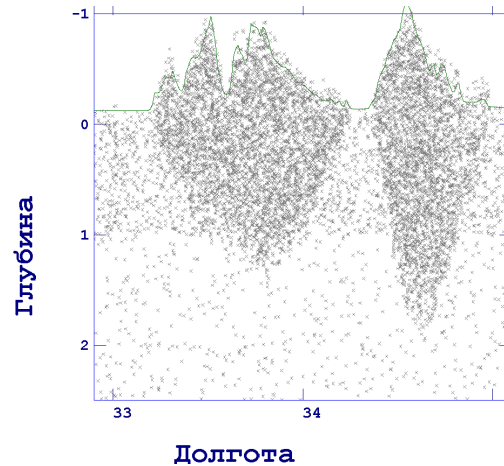


Рис. 2. Пример стохастического графа с неравномерной плотностью вершин. Показан фрагмент модели, предназначенной для локации событий в Хибинском и Ловозерском массивах. В них плотность вершин графа максимальна. Вне массивов плотность вершин выше в верхнем слое

Вершины стохастического графа могут располагаться в пространстве неравномерно (рис. 2). Пользователь задаёт плотности распределения вершин графа (единицы измерения – число вершин на кубический километр) в различных участках моделируемой области.

Связи (рёбра графа) задаются другим параметром – критическим расстоянием. Это максимальное расстояние между вершинами, при котором они ещё связываются. Оно может быть не постоянным, а являться функцией координат, задаваемой пользователем.

Таким образом, для задания стохастического графа пользователю достаточно задать две пространственно-распределённые функции – плотность (далее **density**) и критическое расстояние для установки связи (далее **radius**).

*Алгоритм локации на графе.* Существует быстрый алгоритм поиска кратчайших путей в графе, различные модификации которого известны как волновой алгоритм, алгоритм Ли (*Lee*, 1961), алгоритм Дейкстры (*Dijkstra*, 1959). В нашем случае этот алгоритм действует так. В некой начальной вершине графа задаётся время выхода оттуда сейсмической волны или время, когда там произошло сейсмическое событие. В результате работы алгоритма для всех остальных вершин графа определяются времена приходов в них сейсмической волны, вышедшей из исходной вершины.

Сейсмостанции включены в стохастический граф, т.е. если мы моделируем  $N$  сейсмостанций, то они соответствуют первым  $N$  вершинам графа.

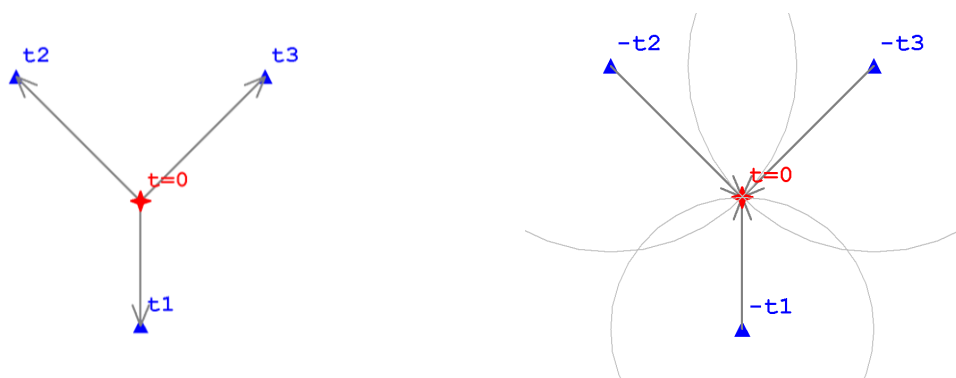


Рис. 3. Иллюстрация локации методом инверсии. Если волны от события достигли станций в моменты времени  $t_1, t_2, t_3$ , то вторичные волны, выпущенные из станций в моменты  $-t_1, -t_2, -t_3$  придут в точку – источник в один и тот же момент времени 0. Звёздочкой обозначено сейсмическое событие, а треугольниками – станции

Локация производится методом инверсии времён приходов (рис. 3). Идея этого метода родилась в обсуждении с ныне покойным Александром Фёдоровичем Буяновым<sup>1</sup>. Она заключается в следующем. Пусть мы имеем времена приходов волны на  $N$  станций –  $t_i$ . Тогда, если  $T_i$  – времена пробега волны от источника до  $i$ -й станции, для всех станций величины  $t_i - T_i$  совпадают и равны времени, когда произошло событие.

Переходя из среды в стохастический граф, можем сказать, что для вершины графа, наиболее близкой к результату локации, величины  $T_i - t_i$ , где теперь  $T_i$  – время пробега от  $i$ -й вершины (приёмника) до проверяемой вершины, для всех  $i$  должны быть близки между собой, т.е. их дисперсия минимальна.

Таким образом для локации события  $N$  раз применяется алгоритм Ли, за начальную вершину берётся каждый приёмник ( $i$ ), а за начальное время – инвертированное время прихода  $-t_i$ . В каждой вершине графа по результатам алгоритма Ли накапливаются дисперсии времён. По окончании процесса ищется вершина с минимальной дисперсией.

### 3. Описание модели локации

Для моделирования и локации в программу должна быть введена исходная информация: скоростные модели, структура стохастического графа, сеть используемых сейсмостанций, рельеф и управляющие параметры. Совокупность этих данных мы будем называть моделью локации. Такая модель задаётся в виде текста на специализированном языке задания параметров (ЯЗАП).

*Язык задания параметров ЯЗАП.* Язык предназначен для унифицированного задания произвольных параметров. Язык декларативный, состоит исключительно из операторов присваивания. Синтаксис его крайне прост. Имена параметров специально не оговариваются, программа, в зависимости от контекста, сама извлекает нужные значения из текста. В этом ЯЗАП очень близок языку XML. Оператор присваивания значения имеет вид <имя>=<значение>. Операторы разделяются пробелами. Имя – идентификатор, состоящий из латинских букв и цифр. Значение может быть идентификатором, числом, строкой текста или списком (набором вложенных операторов присваивания, заключённых в круглые скобки). Использование списков позволяет реализовать иерархические структуры параметров. В текст в фигурных скобках могут быть включены комментарии.

Примеры операторов с комментариями приводятся ниже:

```
x=123 {Присвоение числового значения параметру x}
text='Это текстовая строка' {Присвоение строкового значения параметру text}
color=(red=255 green=0 blue=100) {Присвоение значения – списка}
```

Надо отметить, что декларативный язык ЯЗАП, при всей его внешней простоте, оказался мощным средством задания произвольных параметров. Авторы используют его не только в данной системе, но и во множестве других приложений, в частности, для создания конфигурационных файлов различных программ.

*Задание рабочей области моделирования.* Описание модели начинается с задания рабочей области моделирования – трёхмерного фрагмента Земли, для которого моделирование, собственно, и проводится. Она задаётся в виде параллелепипеда по широтам и долготам (в градусах) и глубинам (вниз в километрах).

*Задание произвольных объёмных тел.* В данной программе можно описывать объёмные тела произвольной формы. Они используются для задания плотностей вершин стохастического графа (например, можно задать области, в которой вершины будут располагаться гуще, чем в окружающем пространстве и т.д.), а также для задания скоростных моделей – внутри объёмных тел скорости могут отличаться от скоростей, заданных в окружающей среде.

Объёмные тела задаются в виде систем замкнутых контуров, расположенных на горизонтальных плоскостях. Контуров увязываются друг с другом и образуют нечто вроде вертикально стоящего цилиндра (рис. 4).

Однако хранение объёмных тел в памяти компьютера в виде системы связанных контуров не оптимально. Используемые в данной программе алгоритмы требуют многократных проверок того, попала ли какая-нибудь точка внутрь объёмного тела. Такие проверки для тел, заданных контурами, заняли бы слишком много времени. Поэтому перед их использованием тела "дискретизируются". Каждое тело заключается в параллелепипед с осями, параллельными осям координат. Он разбивается на кубики. Дискретизируемое тело огрубляется – мы считаем, что если центр кубика попал в тело, то и весь кубик принадлежит телу. Параллелепипед с кубиками представляется в виде трёхмерного битового массива, в котором 0 обозначает, что кубик не принадлежит исходному телу, а 1 – что принадлежит (рис. 5).

<sup>1</sup> Александр Фёдорович Буянов (1959-1997) – талантливый геофизик, работавший в Геологическом институте КНЦ РАН, кандидат физико-математических наук. Человек с обширной сферой интересов, которая включала, наряду со многим другим, сейсмологию и сейсмическую томографию.

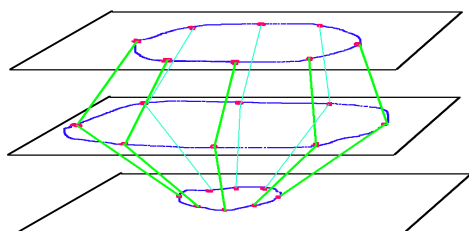


Рис. 4. Пример задания объёмного тела в виде трёх связанных контуров, лежащих на горизонтальных параллельных плоскостях

0	0	0	0	0
0	1	1	1	0
0	1	1	1	1
0	1	1	1	0
0	0	0	0	0

Рис. 5. Дискретизация объёмного тела

Такое представление несколько огрубляет объёмные тела, но позволяет компактно хранить их в памяти компьютера и быстро проверять, попала ли в них точка.

**Задание стохастического графа.** Стохастический граф в данной программе задаётся двумя пространственно распределёнными функциями – мгновенной плотностью вершин (далее **density**), измеряемой в числе точек на кубический километр и максимальным расстоянием от данной вершины до другой, при которой между ними устанавливается связь. Далее эта функция обозначается как **radius**, измеряется в километрах.

Эти функции задаются в виде иерархической структуры. На нижнем уровне иерархии задаются базовые постоянные значения во всём пространстве. На следующем задаётся горизонтально-слоистая модель, в каждом слое значения функций постоянны. Затем задаются объёмные тела, в каждом из которых функции принимают другие (постоянные в пределах тел) значения.

Объёмные тела в описании графа задаются в порядке возрастания приоритета. Это значит, что если точка, в которой мы вычисляем значения параметров, попала в какое-либо тело, тела, которые были заданы до этого, не проверяются, берутся значения, связанные с данным телом. Если точка не попала ни в одно из тел, проверяется, не попала ли она в слоистую модель. Если да – берутся значения из соответствующего слоя. Если нет – берутся базовые значения.

**Задание скоростных моделей.** В данной программе под скоростной моделью понимается функция координат, описывающая значения скорости определённого типа сейсмической волны (Р или S) в каждой точке рабочей области. В программе реализовано задание модели в виде горизонтально-слоистой среды с вкрапленными в неё телами с изменёнными значениями скорости (структура и синтаксис задания полностью аналогичны заданию стохастического графа). Как и в случае задания стохастического графа, геометрические тела в моделях располагаются в порядке возрастания их приоритета. Последнее тело имеет наивысший приоритет.

Всего в программе используется четыре модели скорости (по две для Р и S-волны). Так называемые прямые или "forward", обозначаются как P1 и S1. Их смысл при моделировании в том, что, когда мы выясняем возможную ошибку локации некоего сейсмического события, мы задаём его координаты и считаем времена приходов сейсмических волн на станции согласно этим моделям. Две других модели называются обратными или "backward" и обозначаются как P2 и S2. Их смысл в моделировании в том, что, когда рассчитаны времена приходов по моделям P1, S1, локация производится по моделям P2, S2. Расхождение между исходной точкой сейсмического события и результатом локации и будет оценкой погрешности за счёт разницы скоростных моделей.

#### 4. Моделирование и локация

Задания на моделирование локации составляются на том же самом языке задания параметров ЯЗАП, что и модель среды. Реализованы два принципиально разных варианта моделирования – локация по временам и обратная локация, а также трассировка лучей из точки в точку.

**Локация по временам.** В этом варианте задаются времена приходов сейсмических волн на станции и, возможно, диапазон их предполагаемых ошибок. Задаётся также количество испытаний. Программа генерирует времена приходов, добавляя к заданным временам случайные ошибки, и лоцирует сейсмическое событие заданное количество раз. Результат отображается на карте и разрезах в виде облака точек (результатов локации) и эллипса ошибок (рис. 6).

По умолчанию локация производится по обеим парам скоростных моделей (P1, S1) и (P2, S2). На карту наносятся две точки локации и два эллипса ошибок. Оценивается расстояние между локациями. Можно лоцировать по одной модели 1 или 2, указав это явно в тексте задания.

Данный режим может быть использован как для моделирования ошибок локации, так и просто для локации сейсмических событий по трёхмерной скоростной модели.

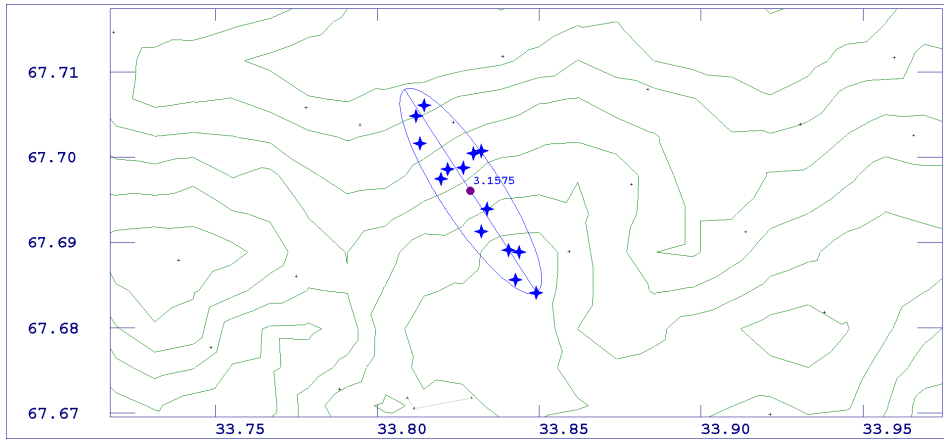


Рис. 6. Отображение на карте результата выполнения задания на локацию. Кругом отмечен средний по всем вариантам результат локации, звёздочки – отдельные локации по временам вступления с внесёнными случайными погрешностями. Число (3.1575) соответствует длине большой оси эллипса ошибок в километрах

Пример. Задание на локацию события в Хибинском массиве и результат его исполнения.

```
station=(name='APA' tp=(1999 8 13 11 48 7.6)
          ts=(1999 8 13 11 48 10.3) errp=0.1 errs=0.2)
station=(name='AP0' tp=(1999 8 13 11 48 10.2)
          ts=(1999 8 13 11 48 14.4) errp=0.1 errs=0.2)
station=(name='LVZ' tp=(1999 8 13 11 48 10.6)
          ts=(1999 8 13 11 48 15.7) errp=0.1 errs=0.2)
tests=20 {Число испытаний} model=1 {Номер скоростной модели 1/2}
```

*Обратная локация.* Данный режим предназначен для моделирования ошибок локации, вызванных как неточностью скоростной модели, так и погрешностями измерений времен приходов волн (рис. 7). В нём пользователь задаёт координаты точки, в которой как будто бы произошло сейсмическое событие. Программа генерирует времена приходов волн P и S на все станции, используя скоростные модели P1 и S1 (как будто бы это истинные скорости). Производит несколько испытаний, внося в эти рассчитанные времена случайные погрешности, и по этим, возмущённым, временам лоцирует сейсмическое событие, но используя скоростные модели P2 и S2 (которые могут отличаться от P1, S1, имитируя тем самым ошибку задания модели). В результате оценивается систематическое отклонение получаемых координат от заданной точки – известных координат события и параметры эллипса ошибок (рис. 8).

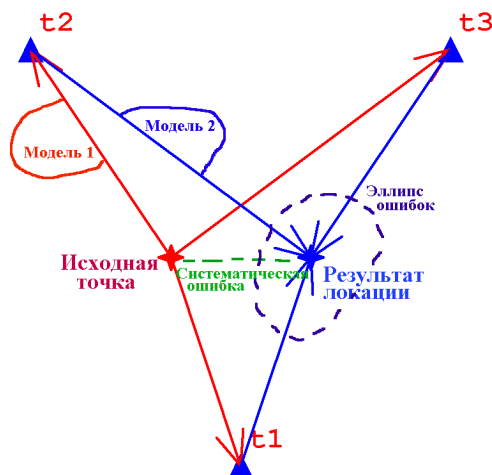


Рис. 7. Иллюстрация обратной локации. Для некой исходной точки согласно модели 1 рассчитаны времена приходов волн на станции  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . К ним добавлены случайные ошибки и проведены случайные испытания. Рассчитан эллипс ошибок и систематическая погрешность

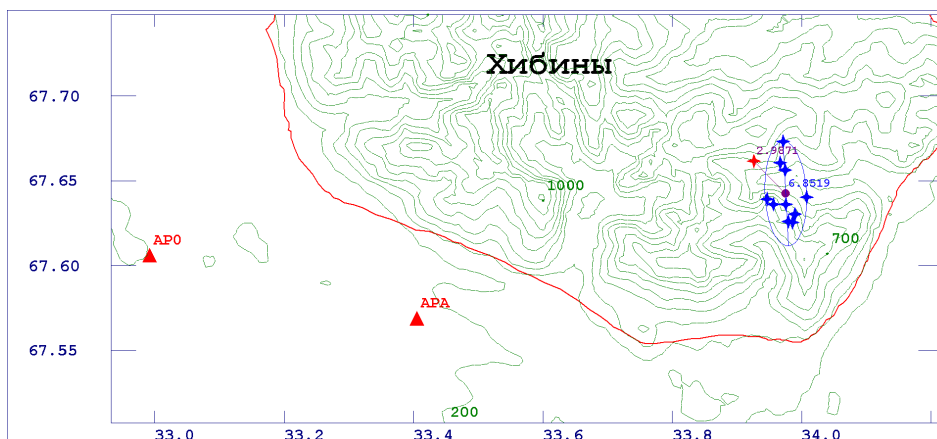


Рис. 8. Результат моделирования обратной локацией. Показано истинное положение лоцируемого события (звёздочка слева) и результаты локаций по временам вступления с внесёнными в них случайными погрешностями (звёздочки справа). По ним построен эллипс ошибок, большая ось которого имеет размер 6.85 км. Систематическая ошибка, вызванная различием исходной скоростной модели и модели локация, соответствует расстоянию между средней локацией и истинным положением события и в данном случае составляет 2.9 км

Пример задания на обратную локацию и результат счёта приведены ниже.

```
{Исходная точка}
Fi=67.66000 Ld=33.93014 d=0
{Какие волны каких станций использовать и с какими ошибками}
station=(name='APA' p=yes errp=0.1 s=yes errs=0.2)
station=(name='AP0' p=yes errp=0.1 s=yes errs=0.2)
tests=10 {Число случайных испытаний}
```

*Трассировка лучей.* В данном режиме пользователь задаёт две точки. Моделируется кратчайший путь сейсмической волны из одной точки в другую. Для этого исходные точки "сносятся" в стохастический граф, т.е. заменяются ближайшими вершинами графа. Путь сейсмической волны моделируется кратчайшим путём в графе. Он рисуется на карте и разрезах. Считается эффективная скорость пробега, т.е. отношение расстояния между точками ко времени пробега.

Такая возможность может оказаться полезной при отладке скоростных моделей, подборе моделей под наблюдения, проверки адекватности стохастического графа.

## 5. Заключение

Применение программного продукта "Сейсмоконфигуратор", разработанного в Кольском филиале Геофизической службы РАН, поможет выработать оптимальную конфигурацию сети сеймостанций для мониторинга зоны производственной деятельности ОАО "Апатит", а также скоростную модель, достаточную для локации сейсмических событий в этой зоне.

## Литература

- Dijkstra E.W.** A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, p. 269-271, 1959.
- Lee C.Y.** An algorithm for path connections and its applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*, v. EC-10, N 2, p. 364-365, 1961.
- Аккуратов М.В., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Корчак П.А.** Объединённая система контроля состояния Хибинского горного массива на базе сетей сейсмических станций Кольского филиала ГС РАН и ОАО "Апатит". *Мат. 6-й Междун. сейсмологической школы "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных", Апатиты, 15-19 августа 2011 года. Обнинск, ГС РАН, с. 7-10, 2011.*