

УДК 550.341

## АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ АЛТАЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 27 СЕНТЯБРЯ 2003 г., ПОЛУЧЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИМИ И ИНФРАЗВУКОВЫМИ СТАНЦИЯМИ НЯЦ РК

Смирнов А.А.

*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В работе приведены результаты опробования прогрессивного многоканального корреляционного метода PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation), разработанного специалистами департамента Комиссариата по атомной энергетике Франции, для анализа инфразвуковых и сейсмических данных, параметризации источника землетрясения, использования записей уникального землетрясения в альтернативном методе калибровки инфразвуковой сети станций.

### ВВЕДЕНИЕ

27 сентября 2003 г. в 11:33:24.94 UTC в республике Горный Алтай недалеко от районного центра Кош-Агач на границе с Казахстаном, Монголией и Китаем произошло сильное землетрясение. Координаты эпицентра землетрясения 49.999°N, 87.852° E, глубина 16 км [1], моментная магнитуда  $M_w$  7,3.

Интенсивность сотрясений в эпицентре по шкале MSK-64 достигала 10 баллов. В Кош-Агачском, Усть-Улаганском районах были повреждены 1942 дома и сооружения. Сообщалось о значительных разрушениях в Онгудае и Шебалино. В районе Чаган-Узуна произошла просадка почвы, образовались котлованы, которые впоследствии заполнились водами реки Чула. Землетрясение ощущалось повсеместно в Южной Сибири. В Казахстане в Восточно-Казахстанской области максимальная интенсивность сотрясений составила 6 баллов. Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками, которые не прекратились и в 2004 г. Сильнейшие из афтершоков имели магнитуду  $M_w=6,7$ . Эпицентр землетрясения и станции сети мониторинга Национального ядерного центра РК, данные которых использованы в настоящей работе, изображены на рисунке 1.

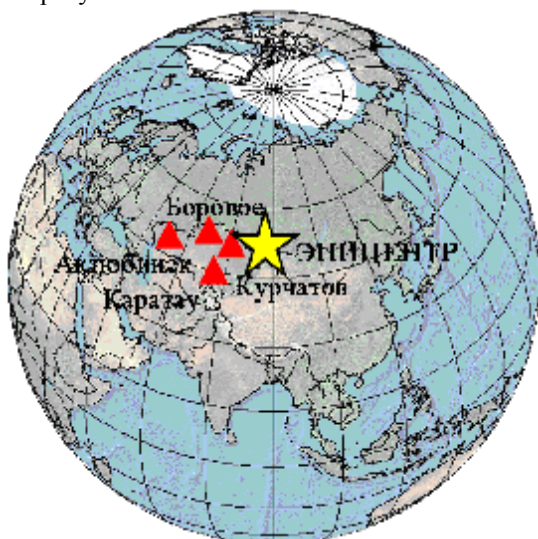


Рисунок 1. Эпицентр Алтайского землетрясения 27 сентября 2003 г. и станции сети мониторинга НЯЦ РК

### МЕХАНИЗМ ИСТОЧНИКА

На рисунке 2 показаны ближайшие окрестности очаговой области землетрясения и расположение разрыва в источнике по данным Геологической службы США (USGS) [1].

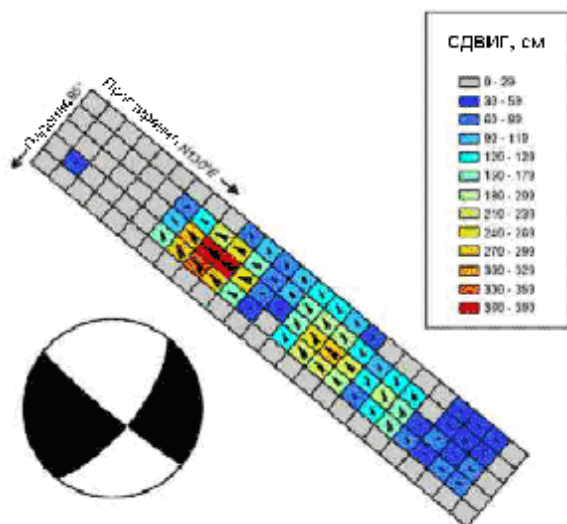


Сплошная линия - положение разрыва в источнике по данным Геологической службы США [1]. Звездочка - эпицентр главного толчка. Цветные точки - эпицентры афтершоков 2003 г. по данным ЦСОССи в дни года: 271-272 - красные; 272-274 - оранжевые; 274-275 - желтые; 275-280 - зеленые; 280-290 - голубые; 290-309 - синие; 309-364 - фиолетовые

Рисунок 2. Эпицентральная зона землетрясения 27 сентября 2003 г.

На рисунке 3 дано распределение амплитуд и направлений сдвига для элементарных ячеек модели разрыва в очаге (мелкие прямоугольники), которое получено посредством инверсии телесейсмических объемных волн. Стрелками внутри ячеек показаны амплитуда и направление сдвига висячего крыла разрыва по отношению к неподвижному крылу. Амплитуда сдвигов кодирована цветом, согласно легенде. Изображен вид сверху, перпендикулярно плоскости разрыва. Размеры элементарных ячеек

блока составляют 6 км в направлении простирания и 5 км по падению [1]. Простирание плоскости разрыва в очаге составляет N130°E, угол падения 85°. На том же рисунке дана стереограмма фокального механизма землетрясения. Некоторое несовпадение ориентации блочной модели сдвига с соответствующей наилучшей парой нодальных плоскостей, изображенной на диаграмме фокального механизма, вызвано применением разных методов анализа и использованием различных выборок данных.



Амплитуда (цветовая шкала) и направление (стрелки) сдвига в элементарных ячейках

Рисунок 3. Модель разрыва и стереограмма фокального механизма землетрясения

Это событие было зарегистрировано всеми станциями сети мониторинга Национального ядерного центра РК. На рисунке 3 цветными точками отмечены афтершоки, произошедшие в районе эпицентра в период с 27 сентября до конца 2003 г. по данным интерактивного бюллетеня Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации (ЦСОСИ) Института геофизических исследований НЯЦ РК [2]. Все афтершоки разделены условно на группы, соответствующие семи промежуткам времени между 271 и 364 днями 2003 г. В статье приведены результаты анализа записей землетрясения двумя сейсмическими группами и двумя инфразвуковыми группами. Основные задачи, которые решались при этом:

- опробование прогрессивного многоканального корреляционного метода (РМСС), разработанного специалистами департамента Комиссариата по атомной энергетике Франции, для анализа инфразвуковых и сейсмических данных;
- параметризация источника землетрясения на основании полученных результатов;
- использование записей уникального землетрясения в альтернативном методе калибровки инфразвуковой сети станций.

#### МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Анализ сейсмических и инфразвуковых данных выполнен с использованием прогрессивного многоканального корреляционного метода РМСС [2,3,4], суть которого заключается в следующем [4].

Большинство сейсмических волн может быть представлено как набор плоских волн в виде хорошо известного соотношения  $f(\vec{r}, t) = e^{i(wt - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ , где  $\|\vec{k}\| = \frac{2\pi f}{c}$  - волновой вектор, модуль которого определяется по значениям частоты  $f$  и фазовой скорости  $c$ ;  $w = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  - угловая частота, связанная с частотой  $f$  или периодом  $T$  волны.

Частота зарегистрированной сейсмической волны  $f$  может быть определена с использованием одной станции, тогда как для определения волнового вектора  $\vec{k}$  необходим набор станций – группа (если апертура набора датчиков имеет один и тот же порядок с длиной волны) или сеть (если апертура значительно превышает длину волны). В случае сети станций, когда сигнал значительно меняется от одной станции к другой, параметр распространения может быть определен методом, предложенным Husebye [3] и основанным на инверсии времен прихода. В случае группы для расчета разности времен прихода может быть учтено преимущество сильного сходства сигналов различных станций. Набор временных задержек используется для расчета параметров распространения сейсмических волн с применением метода, выведенного из метода Husebye. Для каждого отдельного волнового вектора рассчитывается временная задержка сигналов относительно каждого датчика и выполняется суммирование соответственно всех времен задержки. Если сигнал состоит в основном из случайного фонового шума, изменения энергии суммы сигналов слабы по всему векторному полю. Напротив, если сигнал ассоциирован с заданным вектором  $\vec{k}_0$ , энергия, найденная для  $\vec{k}_0$ , будет гораздо выше, чем для всех других векторов. Предложены различные методы нахождения волнового вектора максимума энергии, например, в [5]. Один из методов, позволяющий детектировать сигнал по двум и более записям, при частичном ослаблении требования плоской волны, назван РМСС (английская аббревиатура наименования «Прогрессивный многоканальный корреляционный метод»).

Сигнал  $s(t)$  в спектральной области может быть представлен его Фурье-преобразованием  $s(f) = A(f)e^{if(t)}$ . Фоновый шум характеризуется резкими изменениями  $A(f)$  и  $f(f)$  от одного элемента группы к другому, даже если элементы расположены на расстоянии меньшем длины волны. Наоборот,

в случае распространения сигнала между элементами верны отношения:

$$A_2(f) = A_1(f);$$

$$j_2(f) = j_1(f) - \Theta(r_2^{\rightarrow} - r_1^{\rightarrow}),$$

где

$$\Theta(r_2^{\rightarrow} - r_1^{\rightarrow}) = \vec{k}(r_2^{\rightarrow} - r_1^{\rightarrow})$$

в случае плоской волны.

В качестве инструмента обработки сигналов, представленных на записях в двух пунктах -  $S_i(t)$  и  $S_j(t)$ , может быть использована корреляционная функция  $Cor_{ij}(p)$ , что верно для измерений во временной области. Функция имеет значения в интервале [-1; 1]. Принимая в расчет все частоты,  $Cor_{ij}(p)$  измеряет в окне  $W$  сходство сигналов, взаимно сдвинутых на определенное время  $\tau$ . Максимум корреляционной функции определяет временную задержку между приходом сигналов на эти пункты наблюдения.

Корреляция - это основа метода РМСС, используемого для точного детектирования и измерения параметров детектированных волн. Для измерения временной задержки  $\Delta t_{ij}$  между двумя сигналами  $S_i(t)$  и  $S_j(t)$  используется корреляционная функция. В случае распространения волны без искажения (как в случае плоской волны) задержка  $\Delta t_{ij}$  одинакова для всех частот, из которых состоит сигнал:

$$\Delta t_{ij} = \frac{1}{2p}(j_j(f) - j_i(f)).$$

Для каждой группы из трех элементов должно выполняться соотношение замкнутости:

$$\Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki} = 0.$$

Совсем другая ситуация для фонового шума, фаза которого меняется с изменением частоты. Более того, временные задержки, измеренные в этом случае, определяются случайными комбинациями фаз, соотношение замкнутости не выполняется.

Метод РМСС производит детектирование сигналов на записях небольшой длительности (несколько периодов сигнала). Во избежание интерференции, вызванной множеством случайных сигналов на нескольких элементах группы, а также не единственности решения при корреляции записей, полученных датчиками, находящимися на большом расстоянии друг от друга, процесс обработки организован прогрессивно, т.е. путем увеличения количества элементов группы, зарегистрировавших сигнал. Процесс обработки инициируется сначала для подсети  $R_n$  с  $P$  датчиками. Рассчитывается взаимосоогласованность набора задержек с использованием всех  $R_n$  датчиков группы как среднеквадратическое отклонение отношений замкнутости:

$$C_n = \sqrt{\frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i>j>k} r_{ijk}^2} \left. \begin{array}{l} \\ r_{ijk} = \Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki} \end{array} \right\} i, j, k \in R_n$$

Если эта взаимосоогласованность ниже определенного порога  $C_{Threshold}$ , на  $R_n$  наблюдается детектирование. Далее попытка может быть повторена с привлечением в состав подсети новой станции. Обработка выполняется последовательно для нескольких частотных полос в смежных временных окнах, покрывающих весь сигнал. В методе РМСС каждое элементарное детектирование описывается четырьмя параметрами: количество датчиков в финальной подсети; ассоциированная взаимосоогласованность; скорость и азимут детектированного сигнала.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРОГРАММОЙ РМСС

Метод РМСС был применен для обработки записей Алтайского землетрясения, полученных сейсмическими группами Каратау, AS057-Боровое, а также инфразвуковыми группами IS31-Актюбинск и Курчатов.

Сейсмическая группа Каратау установлена в 90 км к западу от г. Тараз и 8-10 км от г. Каратау. Координаты центральной точки  $43^{\circ} 06' 18,3''$  N,  $70^{\circ} 30' 24,0''$  E. Сейсмическая группа Каратау включает 10 пунктов наблюдения, расположенных по двум окружностям с одной центральной точкой (рисунок 4). На 9 пунктах в скважинах установлены 9 однокомпонентных сейсмометров GS21, в центре группы, также в скважине, - широкополосный трехкомпонентный сейсмометр KS54000. Апертура группы составляет 4 км.

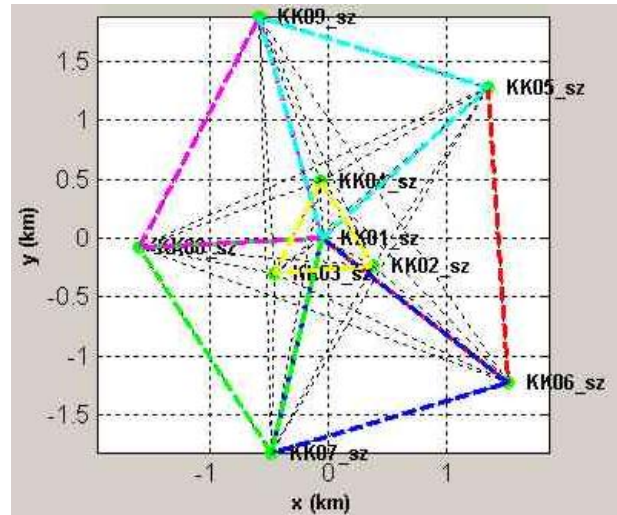


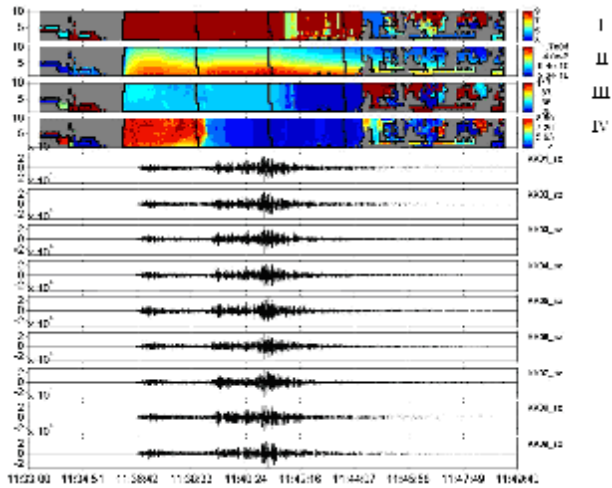
Рисунок 4. Геометрия сейсмической группы Каратау

Расстояние от группы до эпицентра главного толчка Алтайского землетрясения составило 1530 км, расчетный обратный азимут  $53,9^{\circ}$ . Записи землетрясения, выполненные вертикальными скважинными сейсмометрами КК01 – КК09, использованы для расчетов по шести подсетям, геометрия которых показана на ри-



сунке 4 различным цветом. Обработка записей проведена в 50-ти секундном окне с шагом перемещения 5 с. Полоса частот – от 1 до 10 Гц, шаг 0,9 Гц.

На рисунке 5 приведены примеры сигналов землетрясения, зарегистрированных 9 элементами группы Каратау (внизу) и результаты их обработки (вверху).



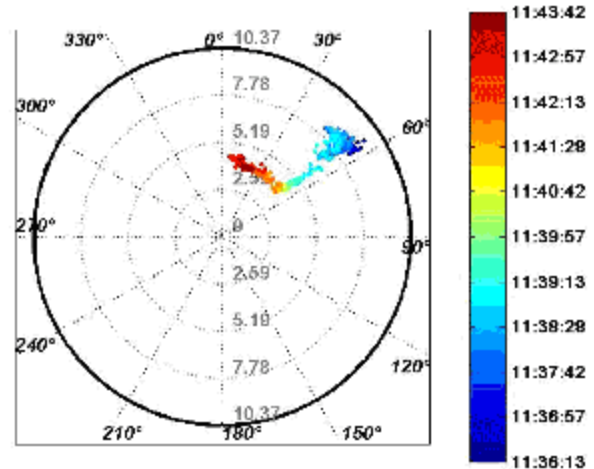
Рассчитанные диаграммы: I – количество датчиков;  
II – амплитуда элементарных детектирований (среднеквадратичная, Па); III – азимут элементарных детектирований (град);  
IV – кажущаяся скорость элементарных детектирований (км/сек).  
Время (по оси абсцисс) – час:мин:сек

Рисунок 5. Записи землетрясения элементами сейсмической группы Каратау и результаты обработки с использованием программы РМСС

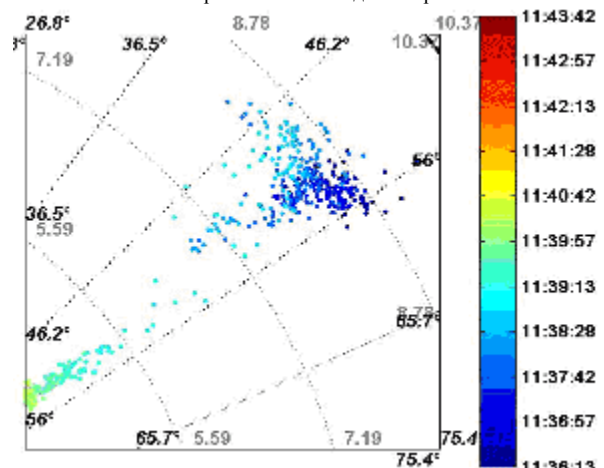
Вверху, как функции частоты и времени, показаны количество датчиков, среднеквадратичная амплитуда, рассчитанные азимут прихода и горизонтальная компонента кажущейся скорости волн. Среднеквадратичная взаимосогласованность не превышает 0.1 с. Как можно видеть из диаграмма IV рисунка 5, цуги продольных и поперечных волн проявляются четко и могут быть идентифицированы по значениям скорости.

На рисунке 6а приведены полярные диаграммы «скорость (км/сек) – азимут (град)» для элементарных детектирований, выделенных на рисунке 5 жирными линиями. Разделение детектирований по семействам произведено методом поиска ближайшего соседнего элемента, формирующего агрегаты элементарных детектирований в пространстве  $(t, f, V, Q)$ . Здесь для соединения достаточно близких точек используются взвешенные расстояния:

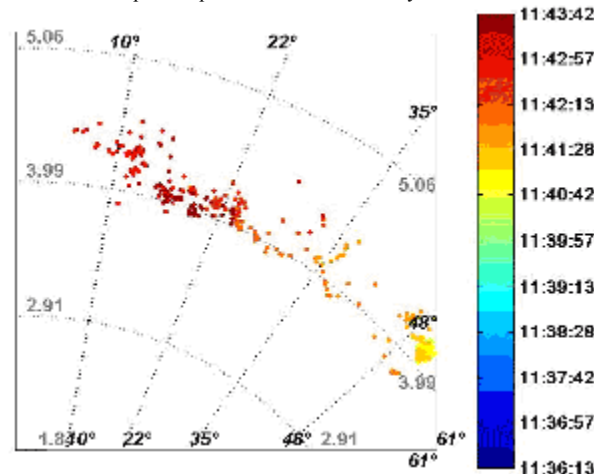
$$d(p_1, p_2) = \sqrt{\left(\frac{t_2 - t_1}{s_t}\right)^2 + \left(\frac{f_2 - f_1}{s_f}\right)^2 + \left(\frac{V_2 - V_1}{s_V}\right)^2 + \left(\frac{\Theta_2 - \Theta_1}{s_{\Theta}}\right)^2}$$



а – по трем семействам детектирования



б – для интервала времени от момента вступления до 11:40:27



в – для интервала времени от 11:40:38 до 11:43:42

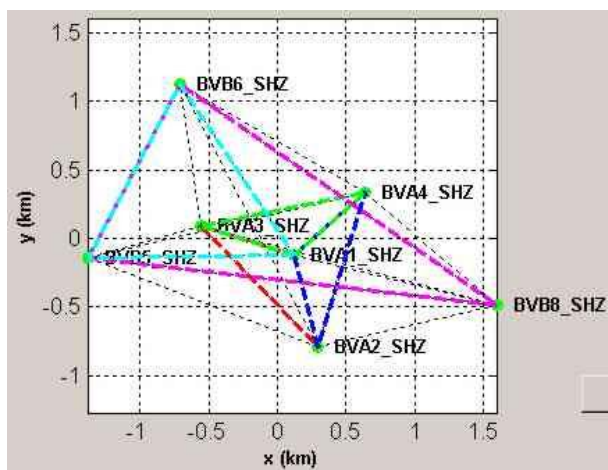
Рисунок 6. Полярная диаграмма «скорость – азимут» по результатам обработки данных сейсмической группы Каратау

Как видно из рисунка 5, произведенный подбор весов позволил выделить три семейства, соответствующих группам продольных, поперечных и поверхностных волн. Цветовая шкала различает времена прихода сейсмических волн. Среднее значение азимута в течение примерно 4-х минут, с момента

вступления до 11:40:27 стабильно и составляет  $52,3 \pm 2^0$ , что хорошо совпадает с расчетным значением азимута на эпицентр (рисунок 6 б). Для больших времен при практически постоянной кажущейся скорости прихода наблюдается необъяснимое изменение азимута прихода почти на  $30^0$  к направлению на север (рисунок 6 в).

Сейсмическая группа AS057-Боровое находится в Щучинском районе Акмолинской области вблизи поселка Воробьевка и в 8 км от геофизической обсерватории "Боровое", расположенной на берегу озера Боровое. Координаты центральной точки  $53^{\circ} 01,494' N, 70^{\circ} 23,318' E$ . Сейсмическая группа состоит из 10 пунктов наблюдения, расположенных по двум окружностям с одним центральным пунктом (рисунок 7). На 9 пунктах в скважинах установлены однокомпонентные сейсмометры GS21, в скважине центрального пункта - широкополосная трехкомпонентная станция SMG-3ТВ. Апертура группы составляет 3 км.

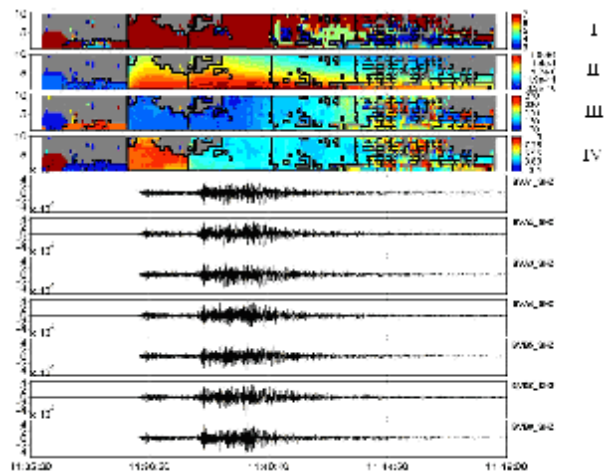
Расстояние от сейсмической группы AS057-Боровое до эпицентра главного толчка Алтайского землетрясения составило 1256 км, расчетный обратный азимут  $98,6^0$ . Для обработки выбраны записи 7 вертикальных скважинных сейсмометров BVA1\_SHZ, BVA2\_SHZ, BVA3\_SHZ, BVA4\_SHZ, BVB5\_SHZ, BVB6\_SHZ и BVB8\_SHZ. Обработка записей проведена в 50-ти секундном окне с шагом его перемещения 5 с. Полоса частот - от 1 до 10 Гц, шаг 0,9 Гц.



Цветом выделено пять подсетей, использованных при расчетах

Рисунок 7. Геометрия сейсмической группы AS057-Боровое

На рисунке 8 внизу представлены сигналы от землетрясения, зарегистрированные элементами группы. Пути продольных и поперечных волн четко выделены и могут быть идентифицированы по скоростям.



Пояснения к диаграммам I-IV - на рисунке 5

Рисунок 8. Записи землетрясения элементами сейсмической группы AS057-Боровое и результаты расчета с использованием программы РМСС

На рисунке 9а приведены полярные диаграммы «скорость - азимут» для элементарных детектирований, попадающих в семейства, обведенные на рисунке 8 жирными линиями. Всего выделено три таких семейства. Цветовая шкала соответствует временам прихода волн на группу. Среднее значение азимута в течение примерно 4-х минут, с момента вступления волн до 11:39:33, стабильно и составляет  $103,9 \pm 5,5^0$ , что хорошо совпадает с расчетным значением азимута (рисунок 9 б). Для больших времен прихода наблюдается необъяснимое изменение азимута прихода почти на  $35^0$  от направления на север при практически постоянной кажущейся скорости, аналогичное эффекту, наблюдаемому по группе Каратау (рисунок 9 в).

Инфразвуковая группа IS31 - Актюбинск. Известно, что сейсмические события часто регистрируются инфразвуковыми станциями. Например, имеются публикации по результатам анализа инфразвуковых сигналов от сильнейших землетрясений в Китае [6] и Южной Америке [7]. В практике инфразвуковых наблюдений НЯЦ РК землетрясение зарегистрировано впервые.

Инфразвуковая группа IS31 - Актюбинск расположена на северо-западе Казахстана вблизи г. Актюбе. Координаты центральной точки  $50.40697^0 N, 58.03478^0 E$ . В плане группа IS31 представляет собой треугольник со сторонами около 2 км, образованный низкочастотными элементами L2 - L4 с центральной точкой L1, окруженной дополнительной высокочастотной группой (Н1-Н4), которая выполнена в виде квадрата со стороной около 200 м (рисунок 10). На всех восьми пунктах установлены микробарометры MB2000. Апертура группы составляет 2 км.

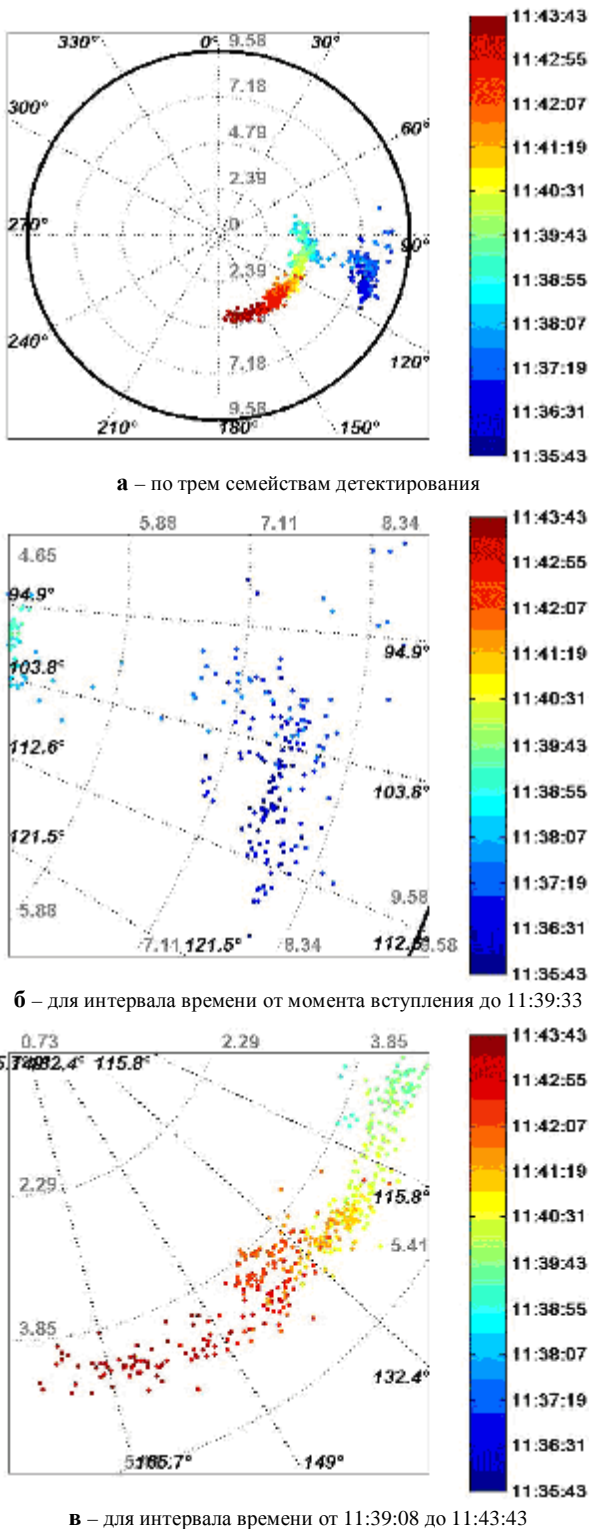
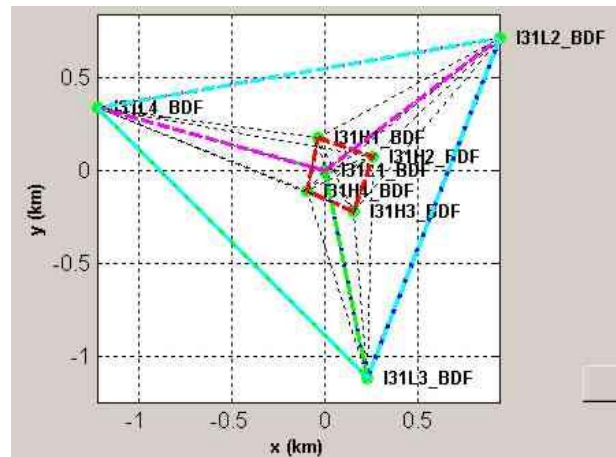


Рисунок 9. Полярная диаграмма «скорость – азимут» по результатам расчета данных группы AS057- Боровое

Расстояние от группы до эпицентра главного толчка Алтайского землетрясения составляет 2117 км, расчетный обратный азимут  $79,7^{\circ}$ . Для обработки выбраны записи всех восьми микробарометров группы. Обработка записей проведена в 50-ти се-

кундном окне с шагом перемещения 5 с. Полоса частот – от 0,03 Гц до 3 Гц с шагом 0,297 Гц.

На рисунке 11 внизу представлены сигналы от землетрясения, зарегистрированные элементами группы. Вверху, как функции частоты и времени, показаны количество сенсоров, среднеквадратичная амплитуда, рассчитанные азимут прихода и горизонтальная компонента кажущейся скорости волны. Среднеквадратичная взаимосогласованность не превышает 0.1 с.



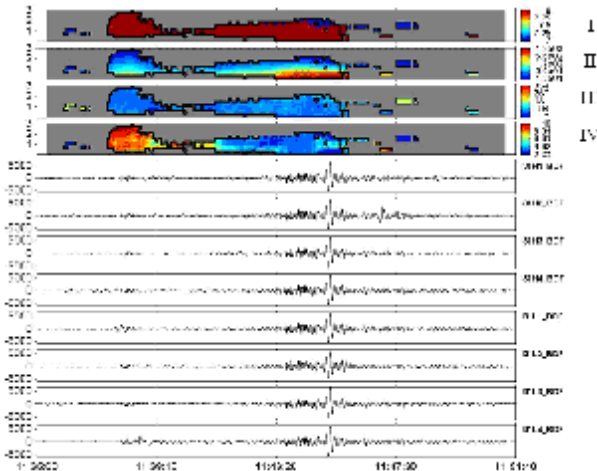
Цветом выделено пять подсетей, использованных при расчетах

Рисунок 10. Геометрия инфразвуковой группы IS31 – Актюбинск

О природе записанных волн можно судить по полученным значениям кажущейся скорости. Они равны значениям, полученным для соответствующих цугов сейсмических волн для группы. Четко выделены и могут быть идентифицированы по скоростям цуги продольных и поперечных волн. Механизм их генерации следующий [6]. Вертикальное смещение сейсмических волн генерирует на месте обменные волны «поверхность – атмосфера» (ground-coupled air waves). Местное преобразование сейсмических волн в волны звукового давления, наблюдаемое посредством микробарометров на региональных и телесеismicких расстояниях, описано в [8, 9, 10]. В случае регистрации станцией IS31 – Актюбинск Алтайского события, имеет место именно такое преобразование.

На рисунке 12 приведена полярная диаграмма «скорость – азимут» для элементарных детектирований, попадающих в семейства, обведенные на рисунке 8 жирными линиями. Всего выделено три таких семейства. Цветовая шкала соответствует временам прихода волн на группу. Среднее значение азимута для времен в течение примерно 4-х минут, с момента вступления до 11:42, стабильно и составляет  $76,3 \pm 10,4^{\circ}$ , что хорошо совпадает с расчетным значением азимута (рисунок 12). Наблюдавшееся на сейсмических группах необъяснимое изменение азимута прихода на больших временах прихода здесь проявилось гораздо слабее.





Пояснения к диаграммам I-IV – на рисунке 5

Рисунок 11. Записи землетрясения элементами инфразвуковой группы IS3 – Актюбинск и результаты расчетов с использованием программы РМСС

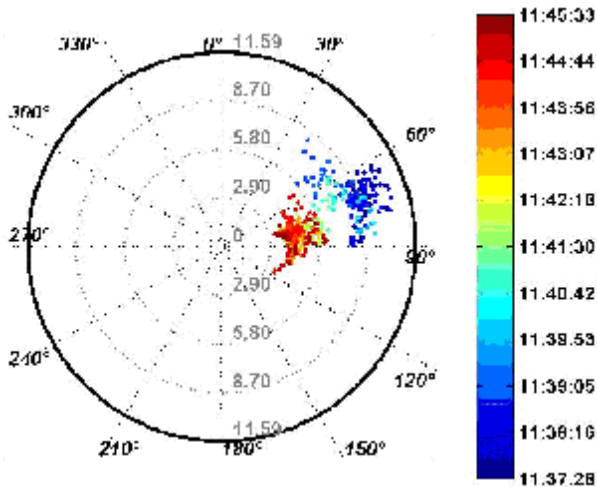


Рисунок 12. Полярная диаграмма «скорость – азимут» по результатам обработки данных инфразвуковой группы IS31–Актюбинск

Инфразвуковая группа Курчатова расположена на северо-востоке Казахстана вблизи г. Курчатова. Координаты центральной точки  $50.715^{\circ}$  N,  $78.62^{\circ}$  E. В плане группа представляет собой треугольник со стороной около 250 м (рисунок 13). На всех трех пунктах установлены станции К-301-А. Апертура группы составляет около 250 м.

Расстояние от группы до эпицентра главного толчка составляет 662 км, расчетный обратный азимут  $93,3^{\circ}$ . При расчете была использована единственно возможная подсеть. Обработка записей проведена в 21-секундном окне с шагом перемещения 5 с. Полоса частот – от 0,05 Гц до 10 Гц с шагом 0,995 Гц.

На рисунке 14 внизу приведены сигналы от землетрясения, зарегистрированные элементами группы. Цуги продольных и поперечных волн не выделены и не могут быть идентифицированы по

скоростям. Кажущаяся скорость сигнала соответствует скорости звука, хотя время прихода сигнала соответствует временам прихода сейсмических волн на станцию. Эти результаты не соответствуют описанным выше, предположения о причинах этого явления приведены ниже.

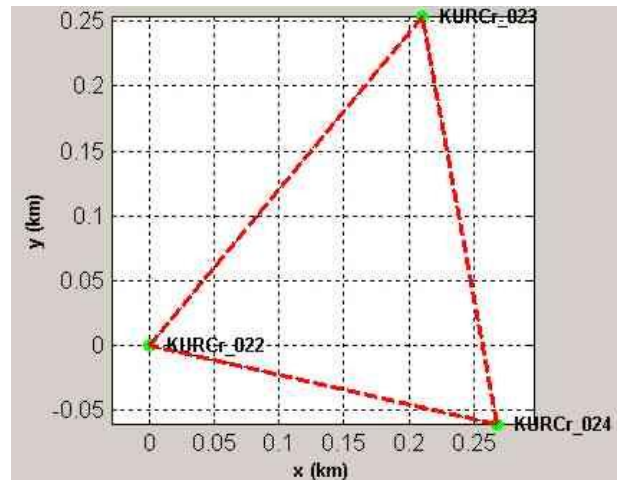
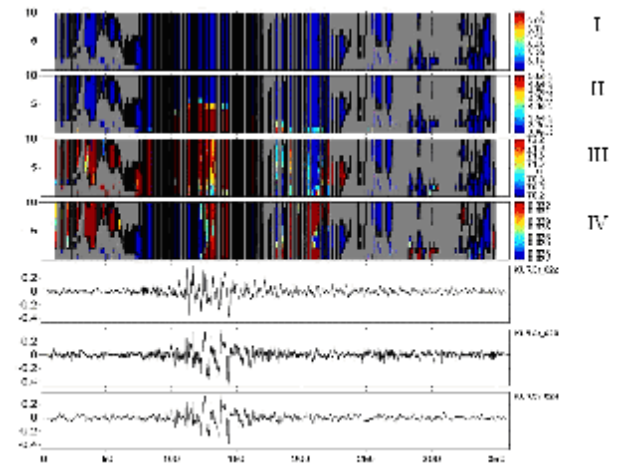


Рисунок 13. Геометрия инфразвуковой группы Курчатова



Пояснения к диаграммам I-IV – на рисунке 5

Рисунок 14. Записи землетрясения элементами инфразвуковой группы Курчатова и результаты обработки данных с использованием программы РМСС

На рисунке 15 приведены полярные диаграммы «скорость – азимут» для элементарных детектированных, попадающих в семейства, обведенные на рисунке 8 жирными линиями. Всего выделено четыре таких семейства, скорости внутри них существенно не различаются. Цветовая шкала соответствует временам прихода волн на группу. Среднее значение азимута для времен в течение примерно 4 минут, с момента вступления до 11:42, стабильное и составляет  $73,0 \pm 1,2^{\circ}$ , что не совпадает с расчетным значением азимута на  $20^{\circ}$  (рисунок 15).

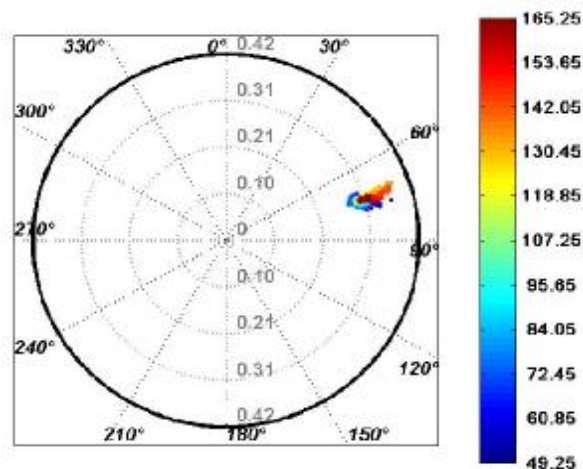


Рисунок 15. Полярная диаграмма «скорость – азимут» по результатам обработки данных группы Курчатова

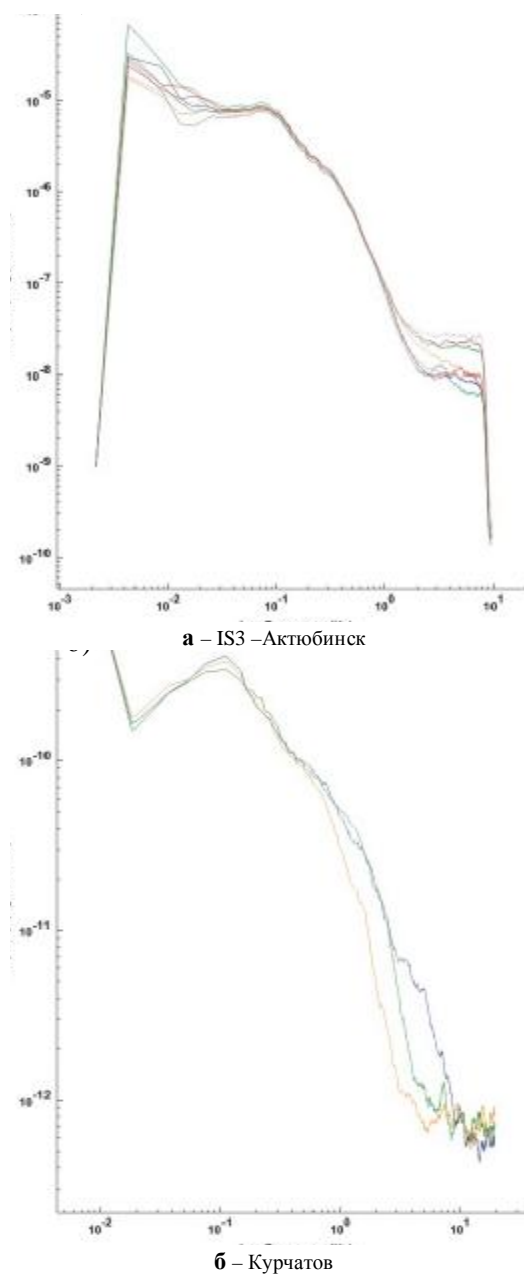
### Выводы

Применение метода РМСС к сейсмическим и инфразвуковым данным станций НЯЦ РК оказалось очень продуктивным. Его использование на данных только одного события позволило:

- точно определить направление прихода и кажущиеся скорости фронтов волн как функцию от времени на ряд станций, что в принципе позволяет локализовать источники землетрясений и взрывов;
- получить данные о развитии разрыва в очаге сильного землетрясения. Так, на полярных диаграммах «скорость – азимут» по группам Каратау и АS57-Боровое для продольных волн в начальной части записей можно проследить изменение азимута со временем, согласующееся с данными реконструкции очага;
- получить новые знания о механизме распространения волн, записываемых в коде, на основе изменений азимута во времени для волн этой группы;
- сделать выводы в отношении отдельных инфразвуковых станций о несоответствии их требованиям задач мониторинга и необходимости их модернизации.

На последнем выводе остановимся подробнее. Обработка записей события группой Актюбинск дала хорошие результаты – правильно определен азимут на событие и скорости соответствующих цугов волн, выделены семейства продольных и поперечных волн. Напротив, обработка записей станции Курчатова показала, что мы не добились точного определения азимутов – ошибка составила  $20^\circ$ , значения скоростей также отличны от определений по инфразвуковой группе Актюбинск и данных сейсмических групп. Причиной этого несоответствия, скорее всего, являются разный размер ветрозащитных устройств на станции Курчатова, причем одно из них имеет апертуру, сопоставимую с апертурой самой группы. Кроме того, одна из ветрозащитных систем соединена с микробарометром слишком длинной трубой (порядка 100 м). Все эти

факторы обязательно должны привести к фазовым и амплитудным различиям при записи идентичных сигналов элементами группы. Доказательством может послужить сравнение спектров участков записей, содержащих изучаемые сигналы от землетрясения для станций Актюбинск и Курчатова (рисунок 16). В рабочей полосе группы IS31-Актюбинск 0,03 Гц – 3 Гц спектры записей элементов группы практически идентичны, в то время как для группы Курчатова в рабочей полосе 0,05 Гц – 10 Гц они существенно различаются (в диапазоне примерно от 0,2 Гц до 10 Гц). Такие фазовые и амплитудные различия неминуемо должны привести к ошибкам в детектировании.



По оси абсцисс – частота, Гц; по оси ординат –  $\log(m/Hz^{0.5})$

Рисунок 16. Сравнение спектров записи землетрясения элементами инфразвуковых групп



Основываясь на полученных результатах, можно сделать следующие рекомендации:

- необходимо модернизировать инфразвуковую группу Курчатова для того, чтобы сделать ее пригодной для задач мониторинга. В первую очередь, нужно добиться идентичности ветрозащитных устройств и избавиться от ненужных потерь между ветрозащитными устройствами и входами микробарометров;
- данные сильных землетрясений можно использовать для калибровки всей инфразвуковой сети. Другие источники использовать затруднительно,

поскольку сильные события в атмосфере, записываемые одновременно всеми станциями, очень редки. Запуски космических кораблей с космодрома Байконур для этих целей также не подходят, так как сигналы поступают с движущегося источника.

*Благодарность.* Автор выражает благодарность сотрудникам Commissariat а l'Energie Atomique, Bruyeres-le-Chatel, France за предоставленную программу PMCC и помощь в ее использовании, а также лично А. Le Pichon за полезные консультации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плакат землетрясения в Республике Алтай Российской Федерации 27 сентября 2003 г., магнитуда 7,3 <http://neic.usgs.gov/neis/poster/2003/20030927.html>.
2. S.F. Ingate, E.S. Husebye, A. Christoffersen Regional arrays and optimum data processing schemes//Bull. Seismol. Soc. Am. - 75, 1985. – P. 1155 - 1177.
3. Y. Cansi An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method//Geophysical research letters. - Vol. 22. - No. 9, May 1, 1995 - P. 1021 - 1024.
4. Y. Cansi and Y. Klinger An automated data processing method for mini-arrays, European-Mediterranean Seismological Centre//Newsletter. - No. 11, July 1997.
5. R. Capon High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis//Proc. of the IEEE, 1969. – 57. – P. 1408 - 1418.
6. Le Pichon, J. Guilbert, M. Valle'e, J. X. Dessa, M. Ulziibat Infrasonic imaging of the Kunlun Mountains for the great 2001 China earthquake//Geophysical Research Letters. - 2003. - Vol. 30. - No. 0, XXXX, Doi:10.1029/2003gl017581.
7. Le Pichon, J. Guilbert, A. Vega, M. Garces, N. Brachet Ground-coupled air waves and diffracted infrasound from the Arequipa earthquake of June 23, 2001//Geophysical Research Letters. - 2002. - Vol. 29. - No. 0, 10.1029/2002gl015052.
8. W.L. Donn, E.S. Posmentier Ground-coupled air waves from the great Alaskan earthquake//J. Geophys. Res., 1964. – 69. – P. 5357 - 5361.
9. R. K. Cook Infrasound radiated during the Montana earthquake of 1959 August 18// Geophys. J. R., - 1971. - astr. Soc., 26. – P. 191 – 198.
10. Y. Takahashi, Y. Koyama, T. Isei, In situ measured infrasound at Sapporo associated with an earthquake occurring offshore in southwest Hokkaido on July 12, 1993//J. Acoust. Soc. Jpn. – 1994. – 15. – 409 - 411.

### ҚР ҰҰО СЕЙСМИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИНФРАДЫБЫСТЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫМЕН АЛЫНҒАН 2003 Ж. 27 ҚЫРКҮЙЕКТЕГІ АЛТАЙ ЖЕРСІЛКІНУІ ЖАЗБАЛАРЫНЫҢ ТАЛДАУЫ

Смирнов А.А.

*ҚР ҰҰО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатова, Қазақстан*

Жұмыста, инфрадыбыстық және сейсмикалық деректерін талдау, жерсілкіну көзін параметрлеу, инфрадыбыстық станцияларын калибрлеуінің баламалы әдісінде бірегей жерсілкінуінің жазбаларын пайдалану үшін Францияның Атом энергетикасы жөніндегі комиссариатының мамандары әзірлеген прогрессивті көпарналы корреляциялық әдісін, PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation), сынағандықтан нәтижелері келтірілген.

### RECORDS ANALYSIS OF ALTAI EARTHQUAKE DATED SEPTEMBER 27, 2003 OBTAINED AT SEISMIC AND INFRASOUND STATIONS OF NNC RK

A.A. Smirnov

*Institute of Geophysical Researches, NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The report contains testing results of progressive multi-channel correlation (PMCC) method, which was developed by specialists from Commissariat for Atomic Energy, France for infrasound and seismic data analysis, earthquake source parameterization on the basis of obtained results and also records use of unique earthquake as alternative calibration method of infrasound chain.