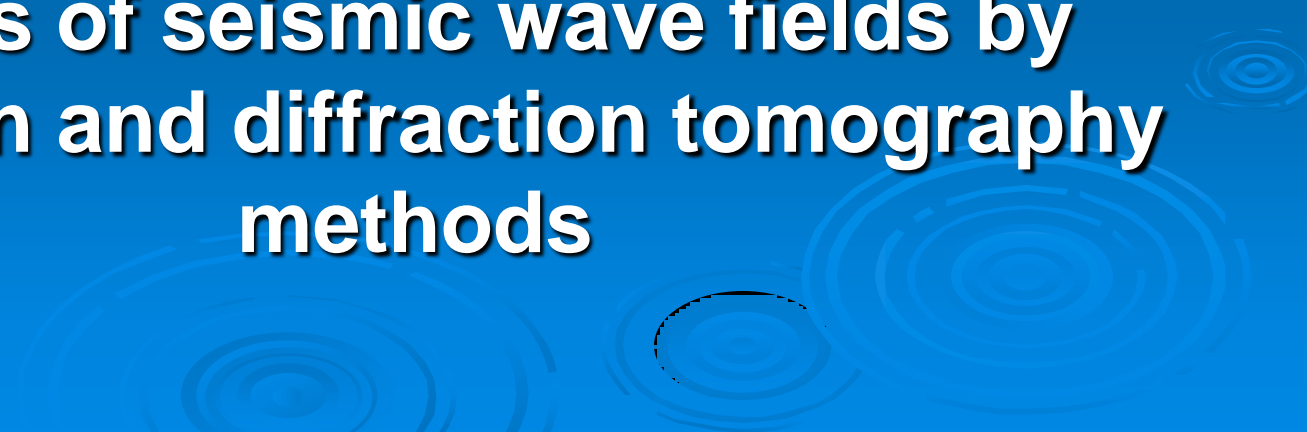


*Институт физики Земли РАН  
Институт проблем нефти и газа РАН*

*Б.М. Шубик ([BMShubik@mail.ru](mailto:BMShubik@mail.ru))*

# **Анализ сейсмических волновых полей методами эмиссионной и дифракционной томографии**

**Analysis of seismic wave fields by  
emission and diffraction tomography  
methods**



- **Томография** - эффективный способ получения данных о внутренней структуре путем анализа сигналов, проходящих через объект. В методах трансмиссионной томографии источники сигналов располагаются вне исследуемого объема, в методах **эмиссионной томографии** анализируются сигналы от эмиттеров или переизлучателей в среде.
- **Методы эмиссионной томографии** позволяют извлечь информацию о строении и состоянии среды на основе регистрации микросейсм. Развитию методов предшествовали исследования сейсмических шумов на поверхности земли, в штольнях и скважинах, у истоков которых стоял Е.И. Гальперин.
- **Присутствие в среде эмиссионных источников** приводит к появлению **когерентных компонент** в случайном волновом поле на поверхности.

- Используя данные площадной группы (сейсмической антенны) и оценивая по ним энергию когерентного излучения из внутренних точек среды, можно рассчитать трехмерные карты распределения микросейсмической активности или 3-D "изображение" сейсмически шумящих объектов и контрастных неоднородностей.
- Для оценки энергии когерентного излучения используется предложенная проф. А.В. Николаевым идея сканирования среды лучом сейсмической антенны.

**В сообщении кратко освещаются три темы,  
тесно связанные между собой единым  
подходом:**

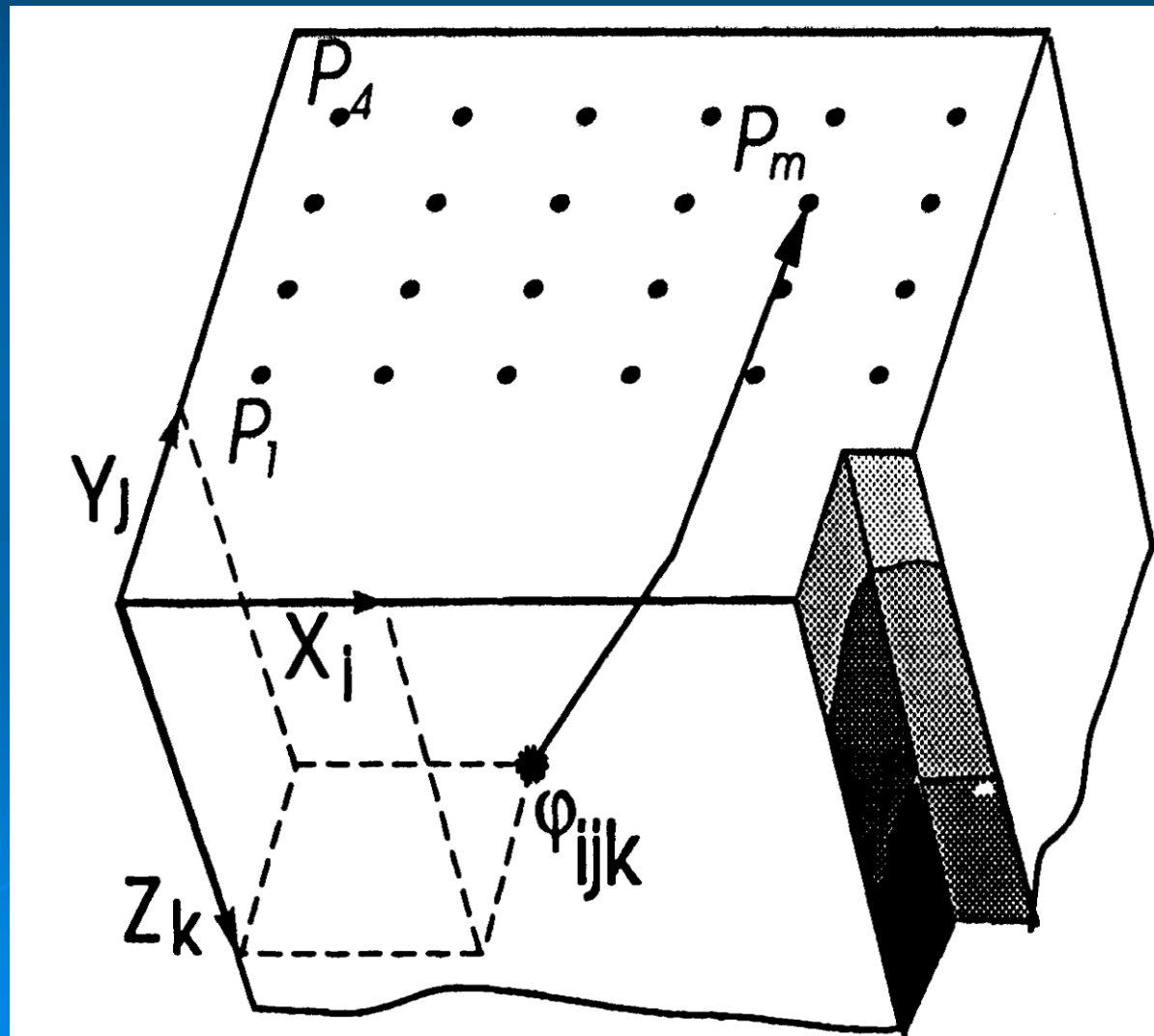
- ***Анализ микросейсм***
- ***Автоматическая система сейсмического мониторинга реального времени***
- ***Трехмерная сейсморазведка (3D дифракционная томография с направленным облучением)***

# Анализ микросейсм

- По инициативе ИФЗ РАН в начале 90х нами были проведены первые успешные исследования по трехмерному картированию гидротермальных зон в северной Исландии на основании анализа микросейсм.

# Анализ микросейсм. Принципы эмиссионной томографии

- $P_1, P_2, \dots, P_m, \dots, P_M$  - geophones of seismic array
- The medium is scanned by the beam of seismic array  $P_1 - P_M$  in the units of cubic grid  $X_i, Y_j, Z_k$
- Data processing is confined to estimation of relative energy of coherent signals irradiated by the grid nodes within the medium ( $SNR_{i,j,k}$ ).



# Эмиссионно-томографические исследования на севере Исландии

- Location of the investigated area, 5 x 6 km within an active hydrothermal zone of the North Iceland
- Mobile seismic arrays were located over a high temperature geothermal field
- Layout of 24- channel seismic arrays of 600 x 1000 m equipped with digital seismic station

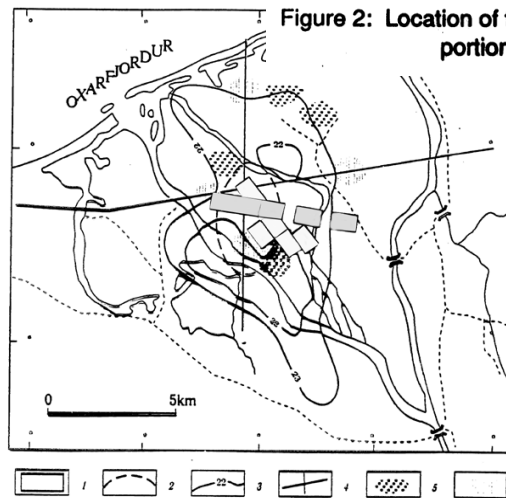


Figure 2: Location of the research site on the northernmost portion of the Icelandic mid-Atlantic rift zone.

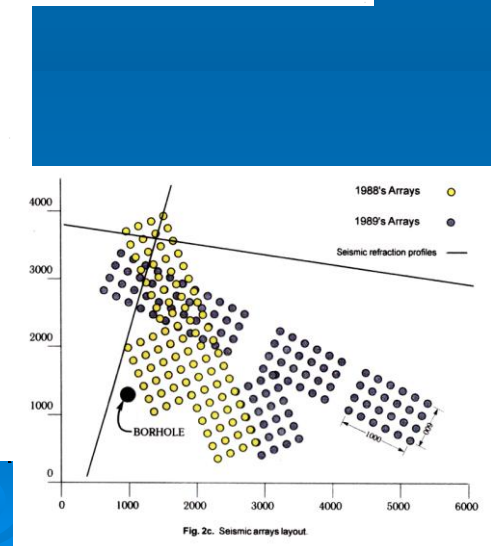
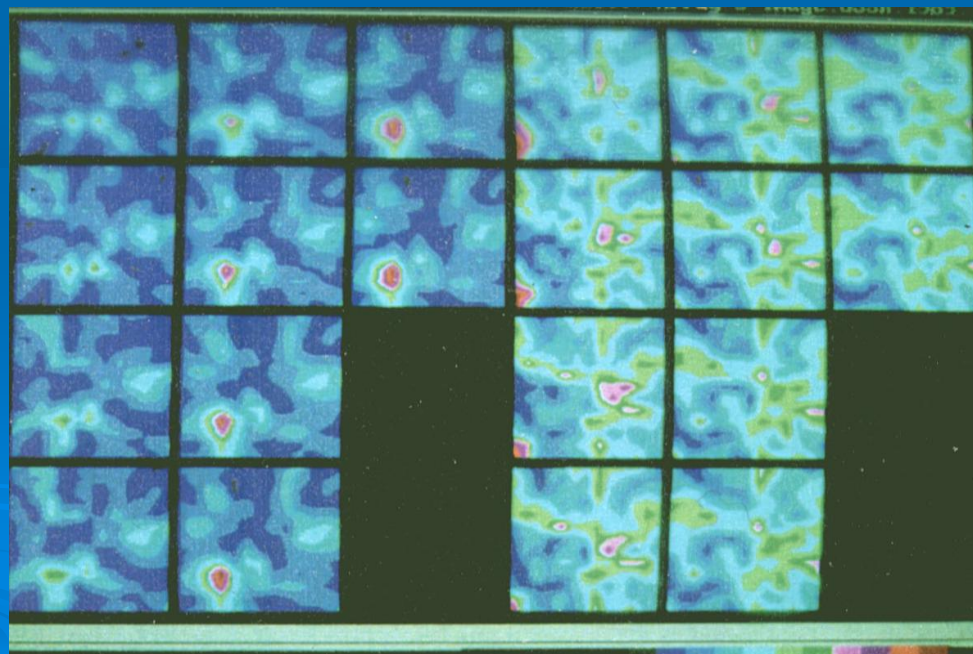
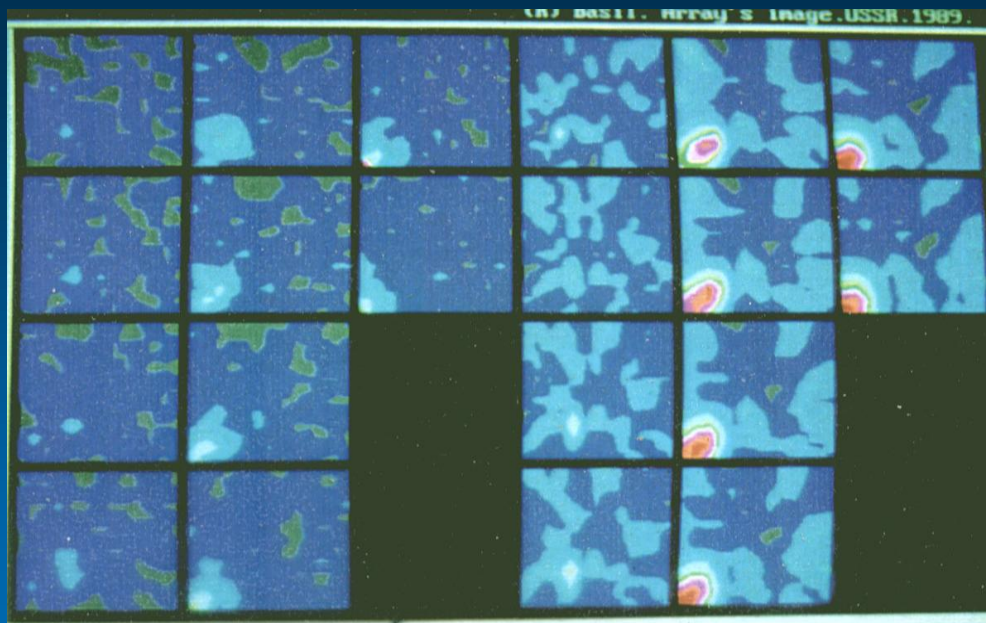


Fig. 2c. Seismic arrays layout.

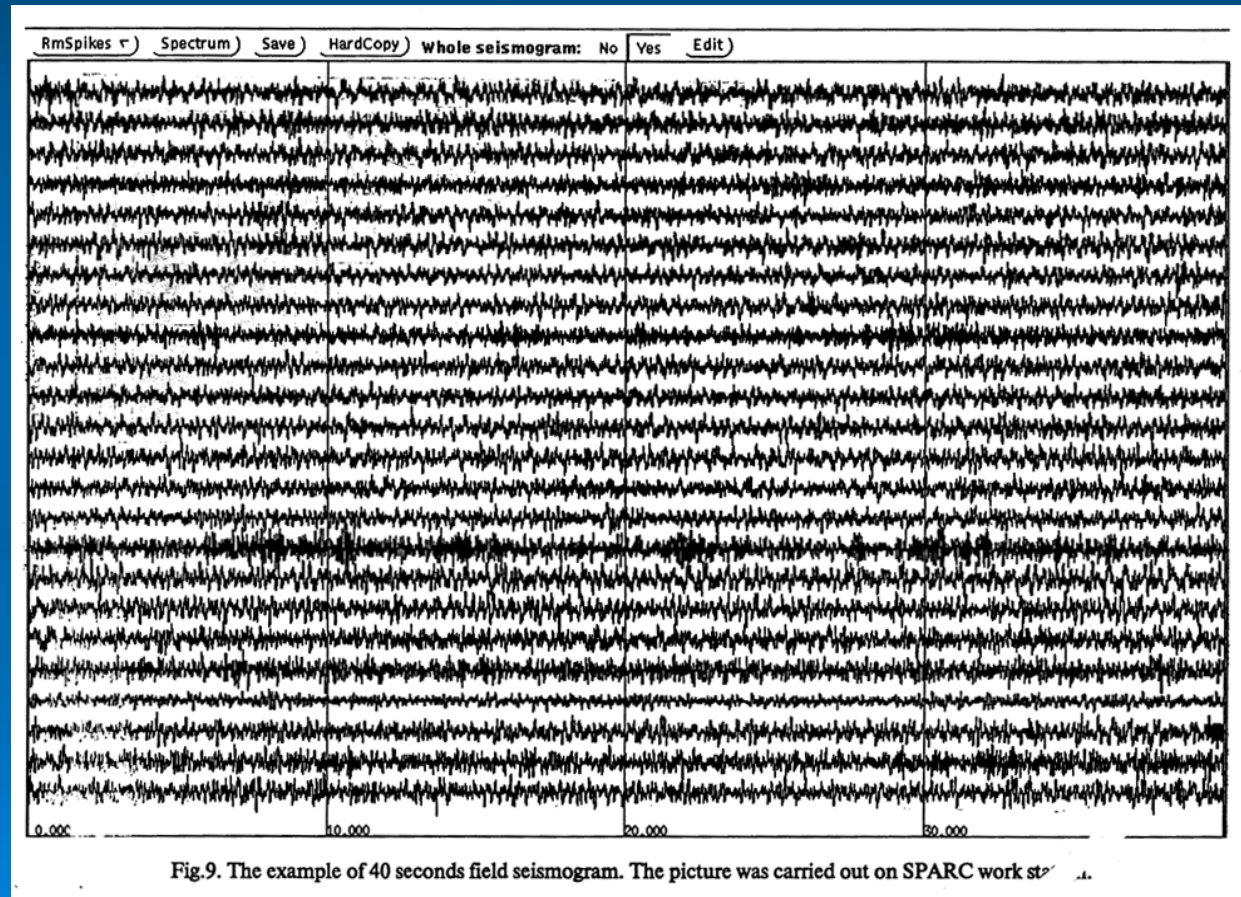
# Численное моделирование





## Пример записи микросейсм

- 24-channel, 40 sec seismogram of microseisms recorded in one of the array positions.
- Distance between geophones is 200 m



# Контроль условий регистрации. Фрагмент шумовой сейсмограммы и спектры записей на всех каналах

- Field monitoring of data quality
- 9-th geophone is up-down
- Spectrum of 9-th recording shows a level of instrumentation noise

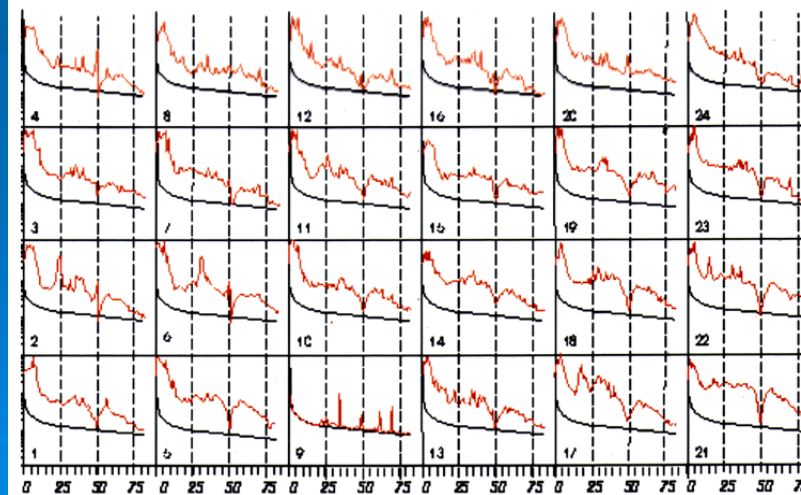
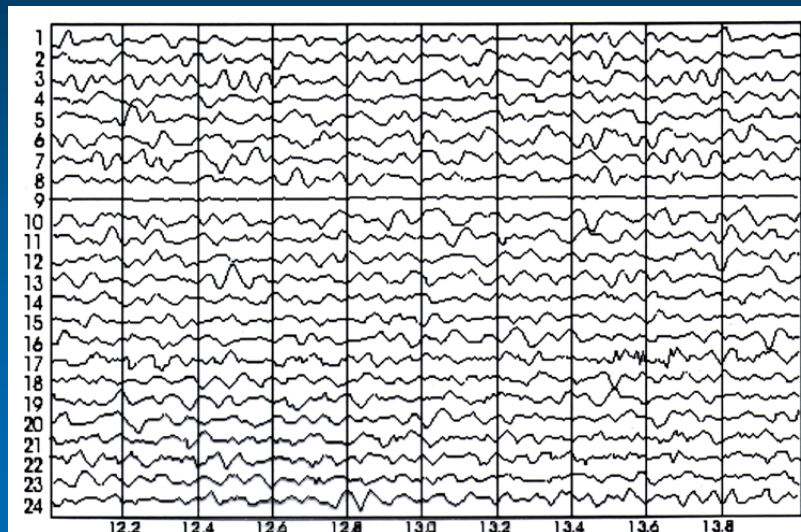
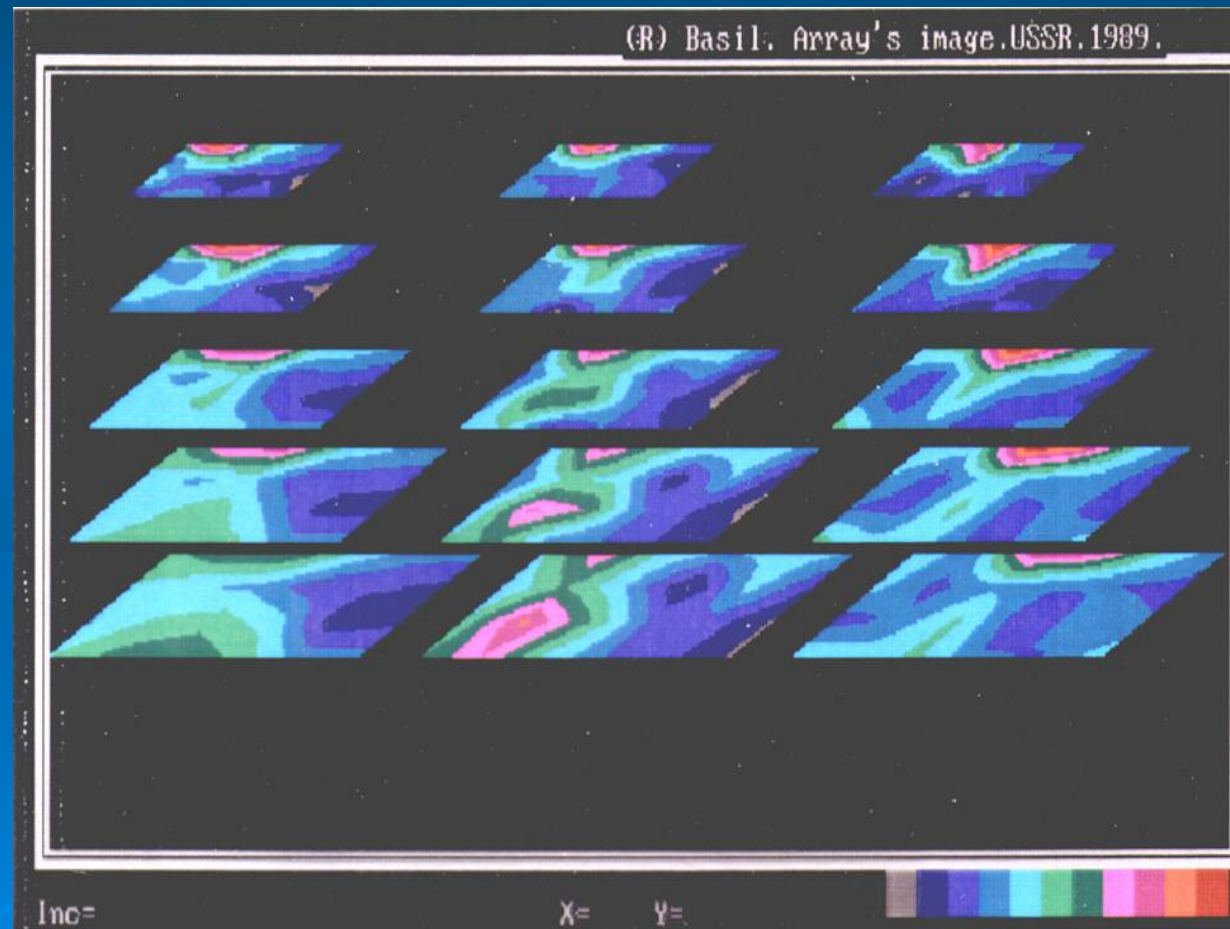


Fig. 8. Data quality control. Smoothed frequency spectra for every channel (data from Fig. 7). The line below spectrum shows noise instrumental level.

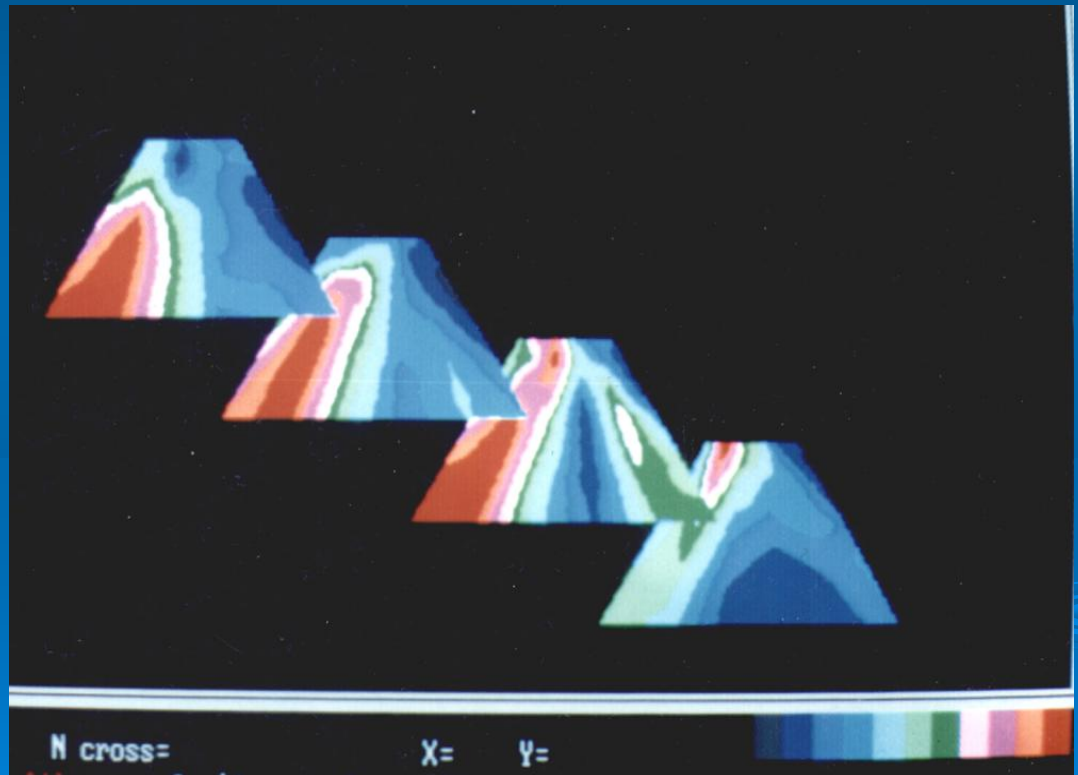
# *Пространственное распределение энергии эндогенных микросейсм стабильно во времени*

- Processing several seismograms recorded at different times on the same array position (SNR maps for the following depths: 200, 400, 600, 800, 1000 m)



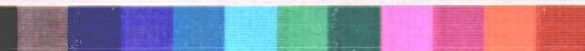
# *Вертикальные сечения рассчитанной матрицы оценок эмиссионной энергии*

- An example of microseismic activity presented as a vertical cross-section of 3-D SNR maps (from single recording)
- Depths are from 200 to 1000 m



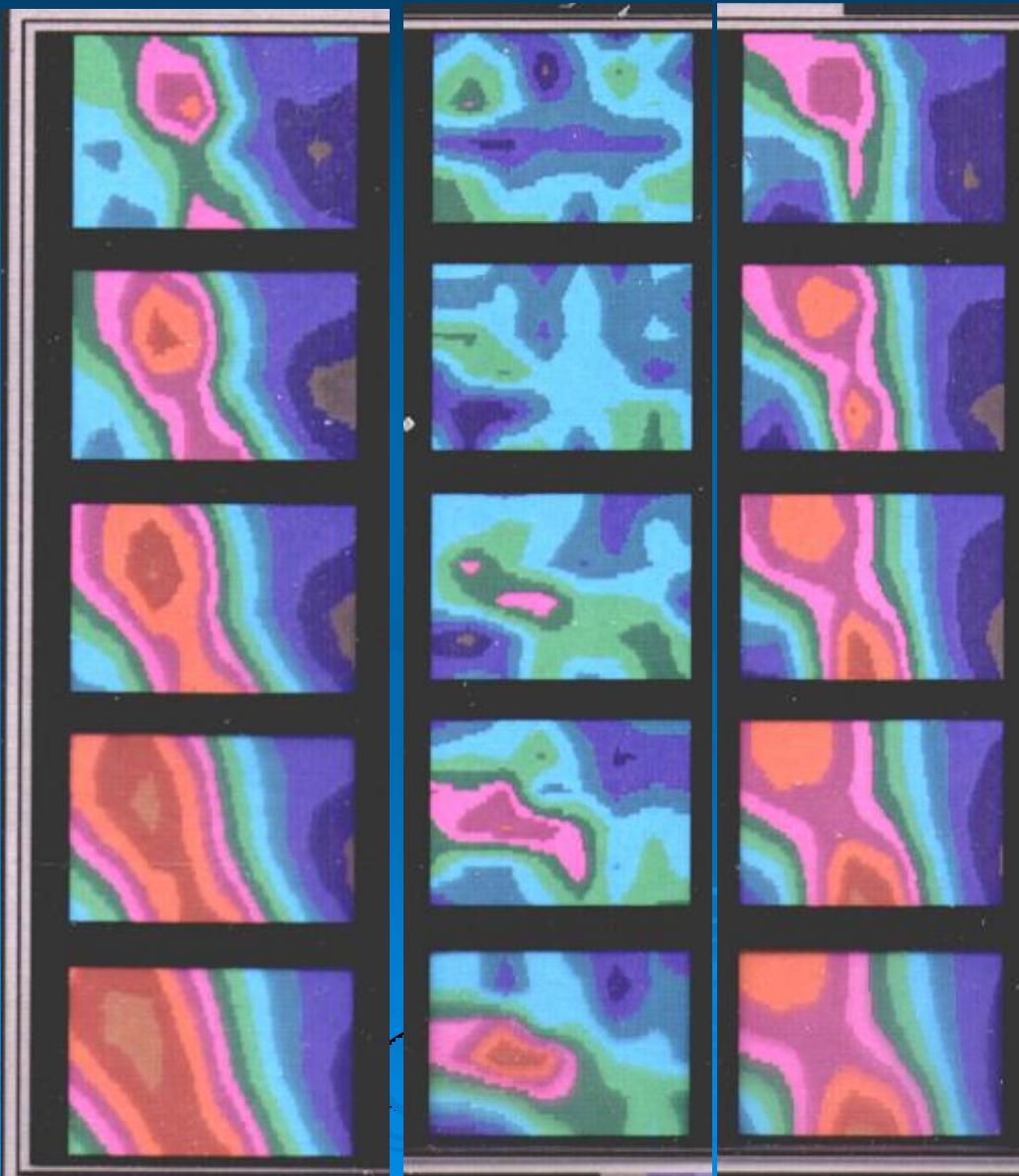
# Знаковое 2х-битовое кодирование амплитуд

(R) Basil. Array's image.USSR.1989.



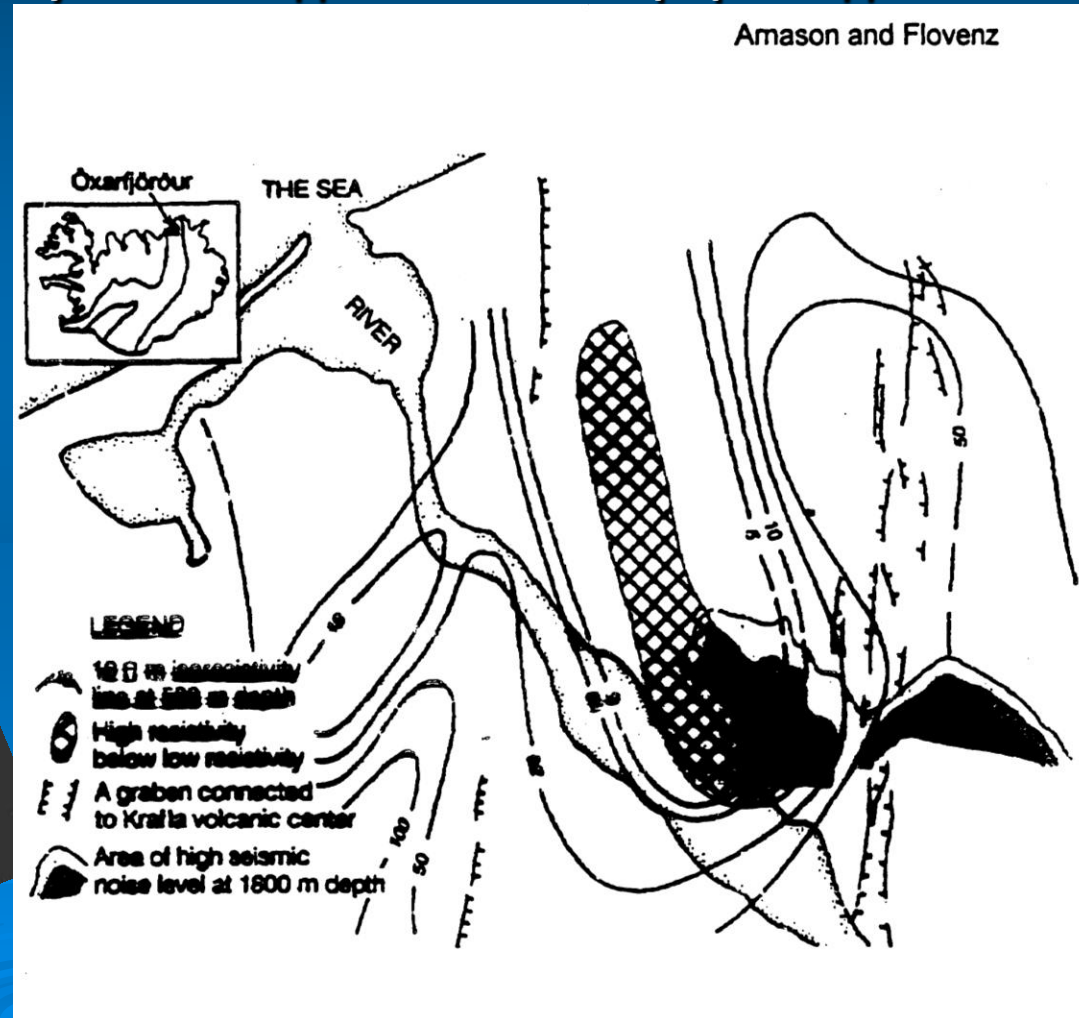
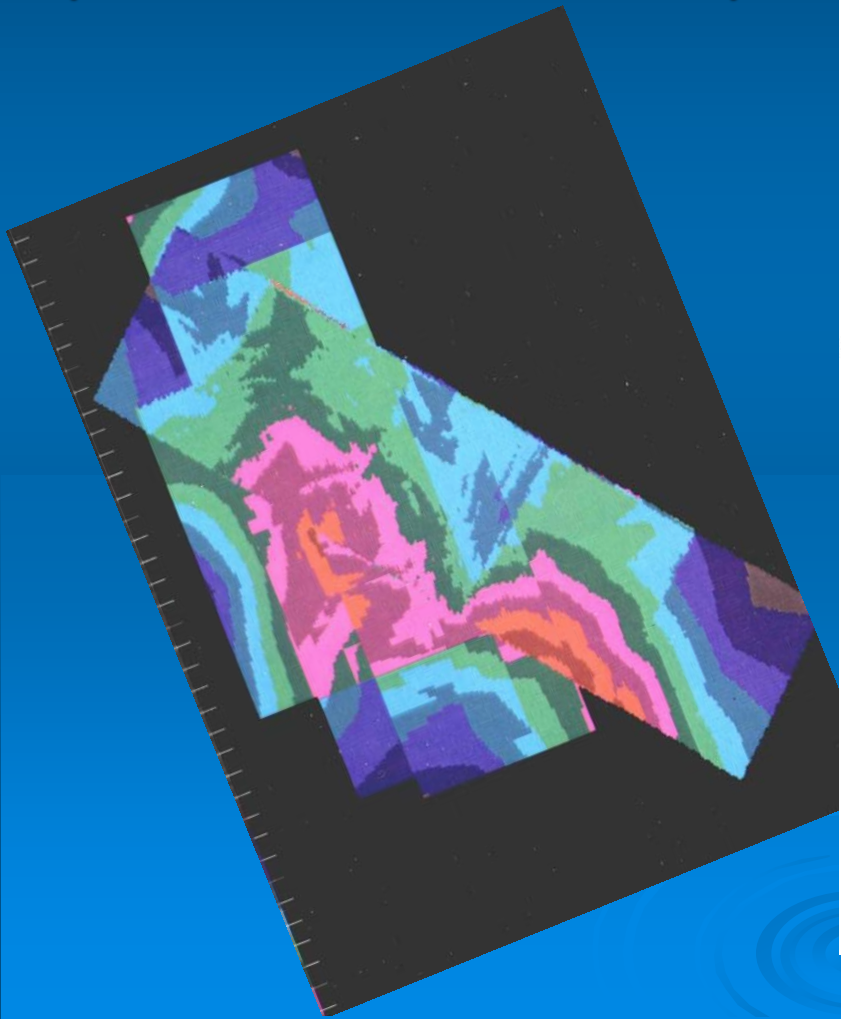
*Характер распределения энергии эндогенных микросейсм (SNR-  
maps), зарегистрированных в тихое время и в условиях сильных  
поверхностных помех*

- Processing of several seismograms registered by an seismic array under quiet and noisy ambient conditions (depths from 200 to 1000 m)
  - 200
  - 400
- 1st and 3rd columns - quiet conditions (SNR-maps are reestablished)
  - 600
  - 800
- 2nd column - noisy conditions
  - 1000



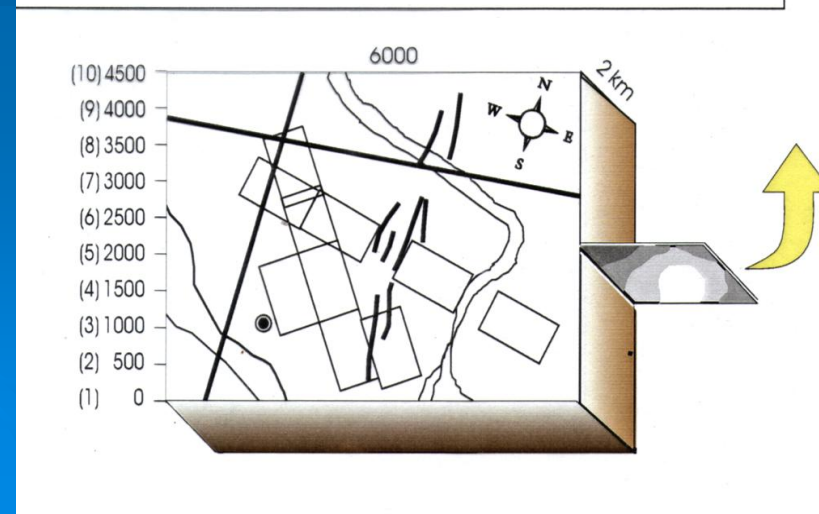
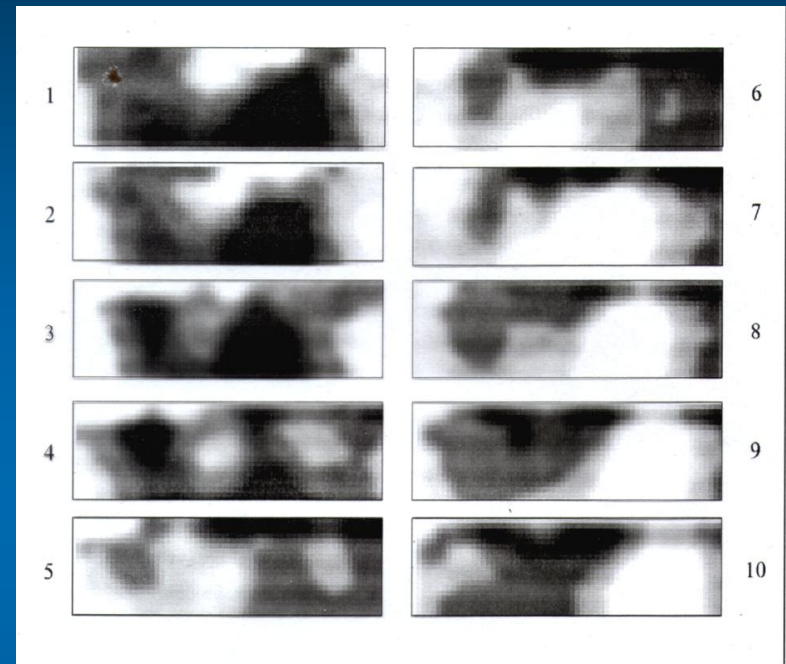
(a) Пример скомпилированной карты сейсмической эмиссии, ассоциированной с гидротермальной активностью, на глубине 1800м. Карта рассчитана по данным 10 сейсмических антенн.

(б) Сопоставление полученных результатов с данными электроразведки (Arnasson K. and Flovenz O.G.)



# *Vertical cross-sections of the entire volume of investigation*

- Vertical cross-sections of the entire volume of investigation (6 x 4.5 x 2 km.).
- The distances between vertical cross-sections are 500 m. Dark areas correspond to higher levels of seismic emission

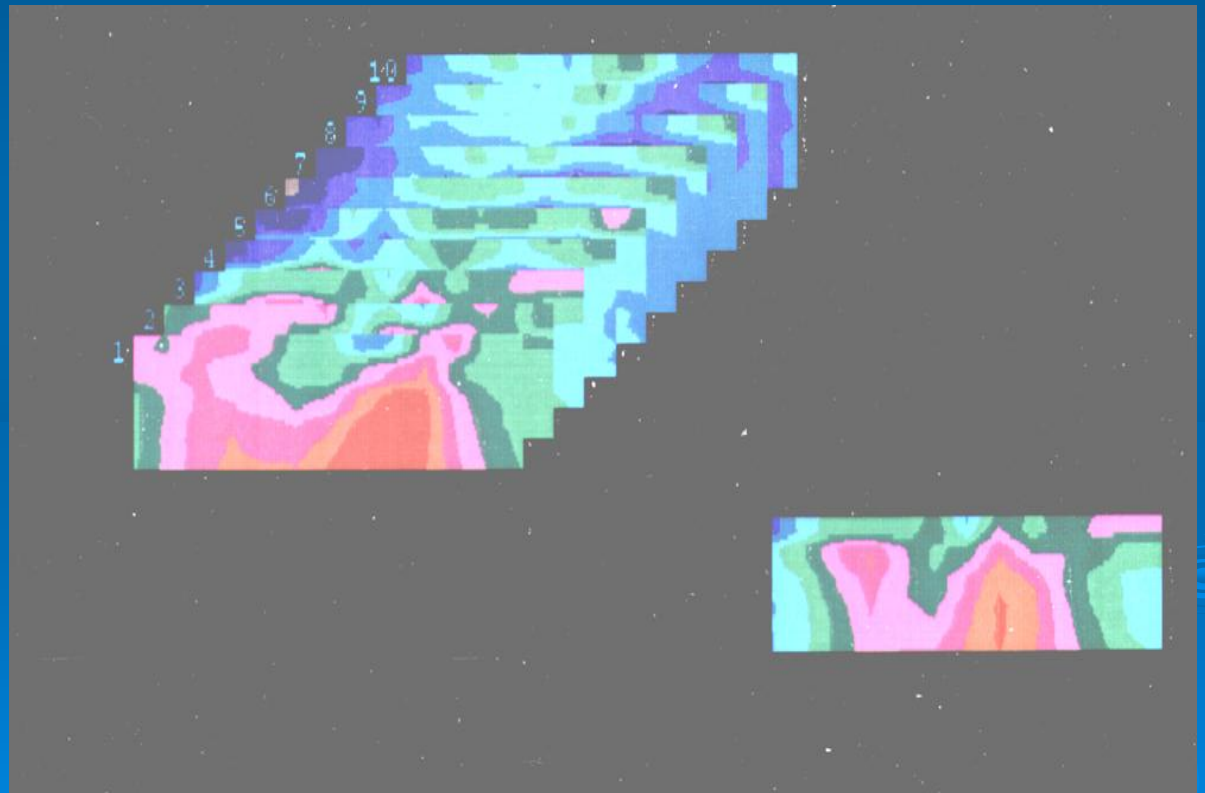




# *Vertical cross-sections of the entire volume under study*

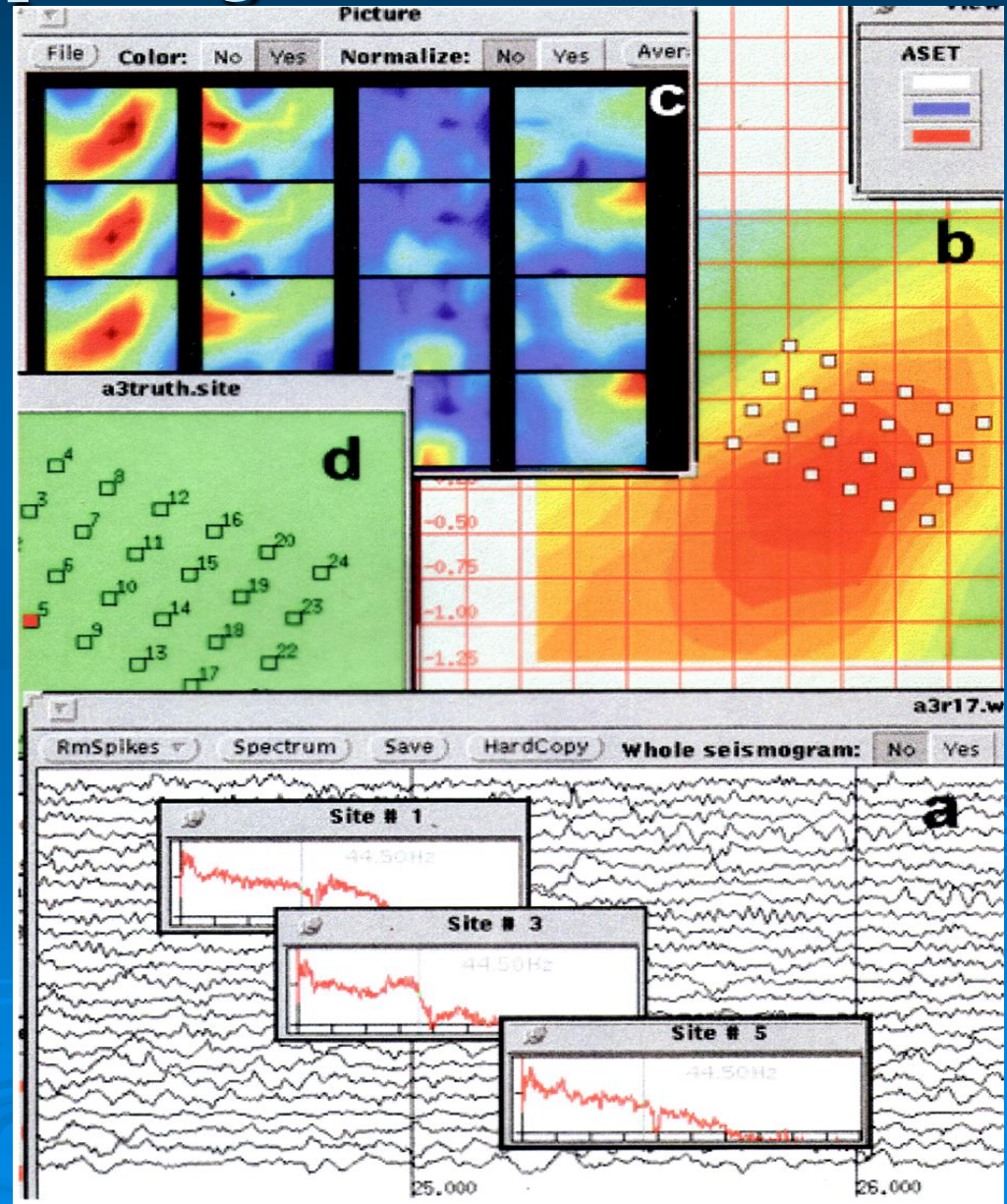
➤ **W-E  
crosssections**

➤ **6 x 4.5 x 2  
km**



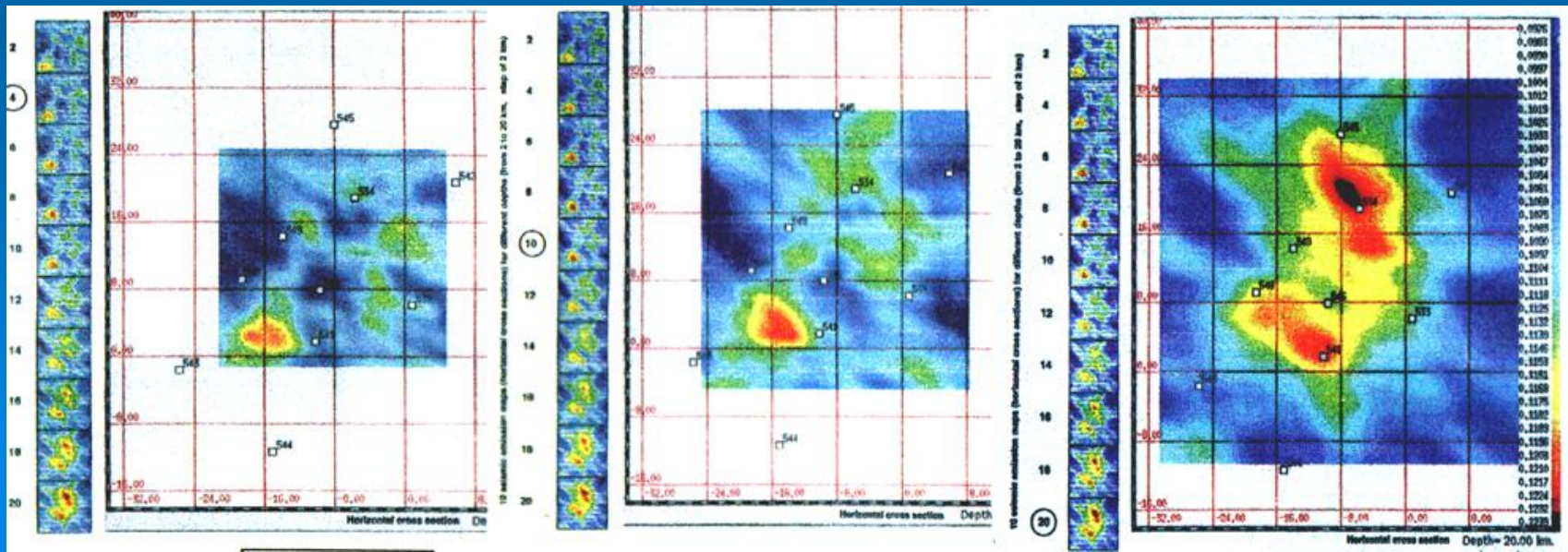
# Multi-window ASET SUN-UNIX based software package

- a) Preprocessing window
- b) Image editing window
- c) Main data processing window
- d) Site editing window



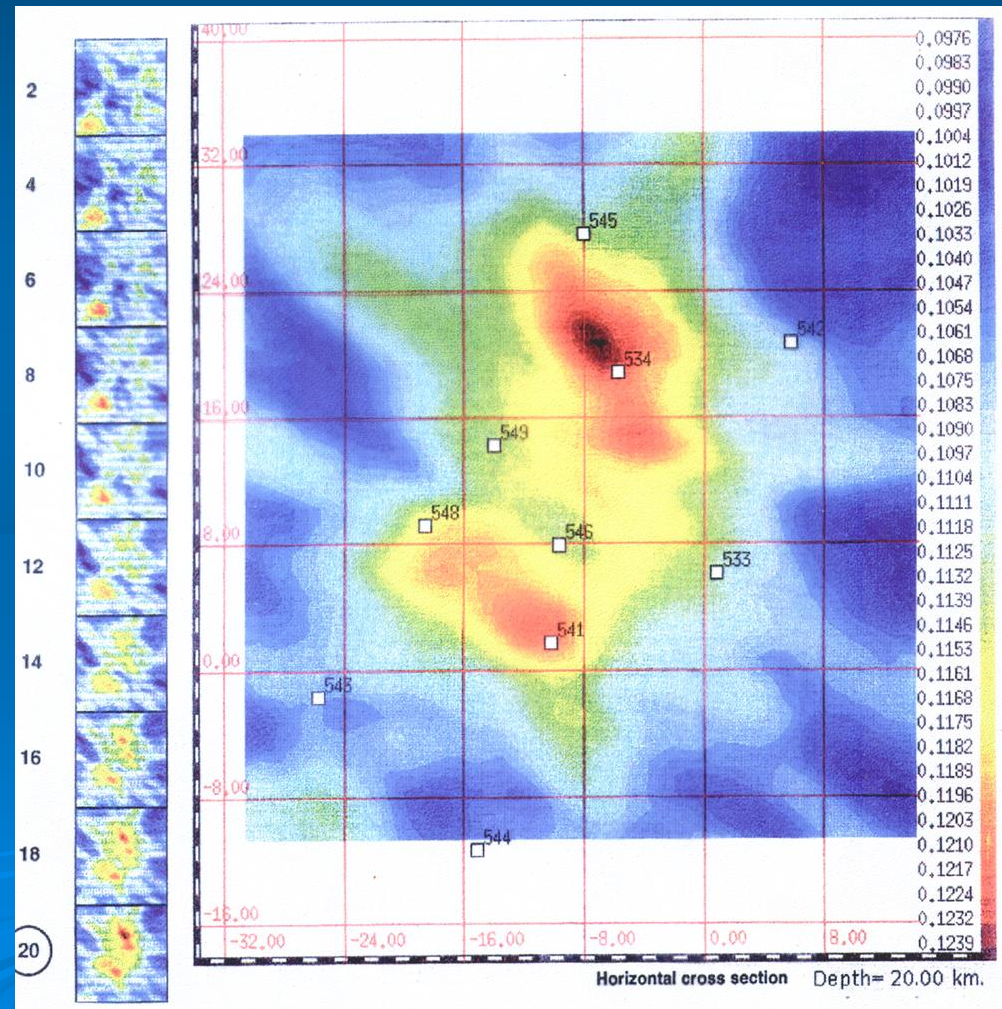
# Seismic Network Emission Tomography

- Data of the Cusiana Seismic Network in the oil bearing province of Columbia within the seismic active zone. The network consists of 10 seismic stations. (40 x 40 km)
- 10 horizontal sections at fixed depths beneath the array, spaced 2 km apart (from 2 to 20 km depth). 3 sections are shown here (4, 10, 20 km)



# *Seismic Network Emission Tomography*

- Horizontal section at a depth of 20 km
- Duration of the analyzed seismic recording is 1 hour



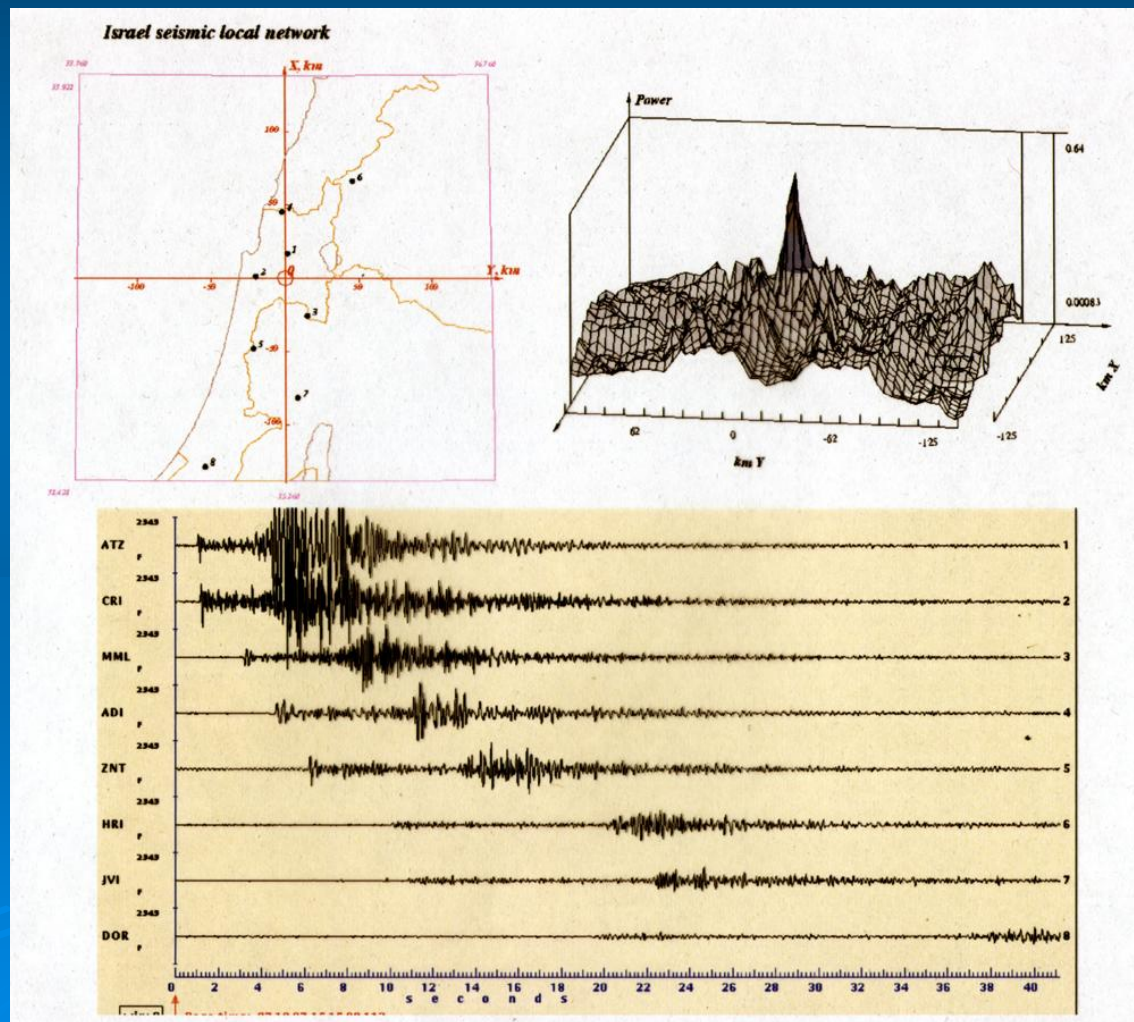
- ***Впервые было показано, что пространственное распределение энергии эндогенных микросейсм стабильно во времени. Рассчитанная трехмерная модель соответствует активной гидротермальной зоне. Метод может использоваться для решения разведочных задач***
- ***Данное исследование дало толчок интенсивному развитию разнообразных пассивных сейсмических методов, широко применяющихся в настоящее время***

# *Автоматическая система обнаружения и локации сейсмических событий разного масштаба*

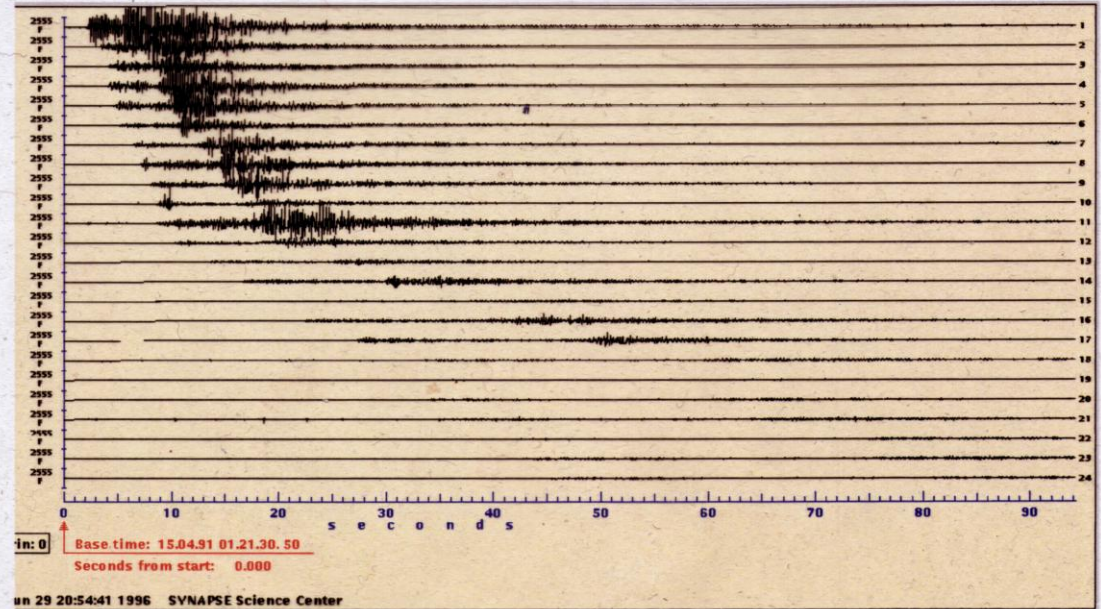
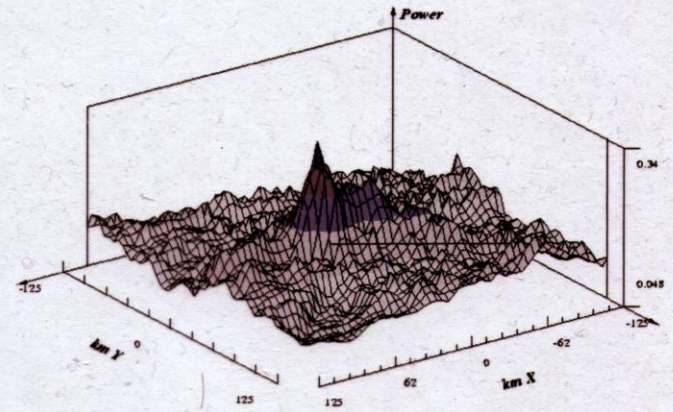
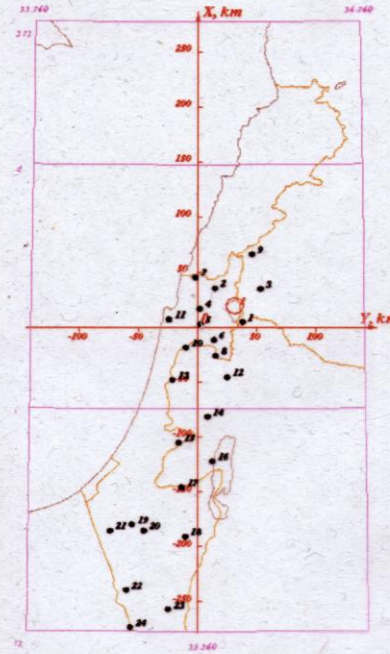
- Традиционные методы локации базируются на достаточно сложной процедуре выделения и точной оценки параметров фаз
- Если событие регистрируется группой или сетью станций, совокупность записей можно анализировать как многоканальную сейсмограмму
- На базе принципов эмиссионной томографии был разработан робастный и быстрый метод обнаружения и локализации реальных сейсмических источников разного масштаба и создана автоматическая система сейсмического мониторинга.

# Автоматическая система обнаружения и локации сейсмических событий разного масштаба

- Local earthquake recorded by the Israeli Seismic Network
- Area of scanning is 255 x 255 km, scanning grid spacing 5 km
- Number of seismic stations is 8



*rael seismic local network*

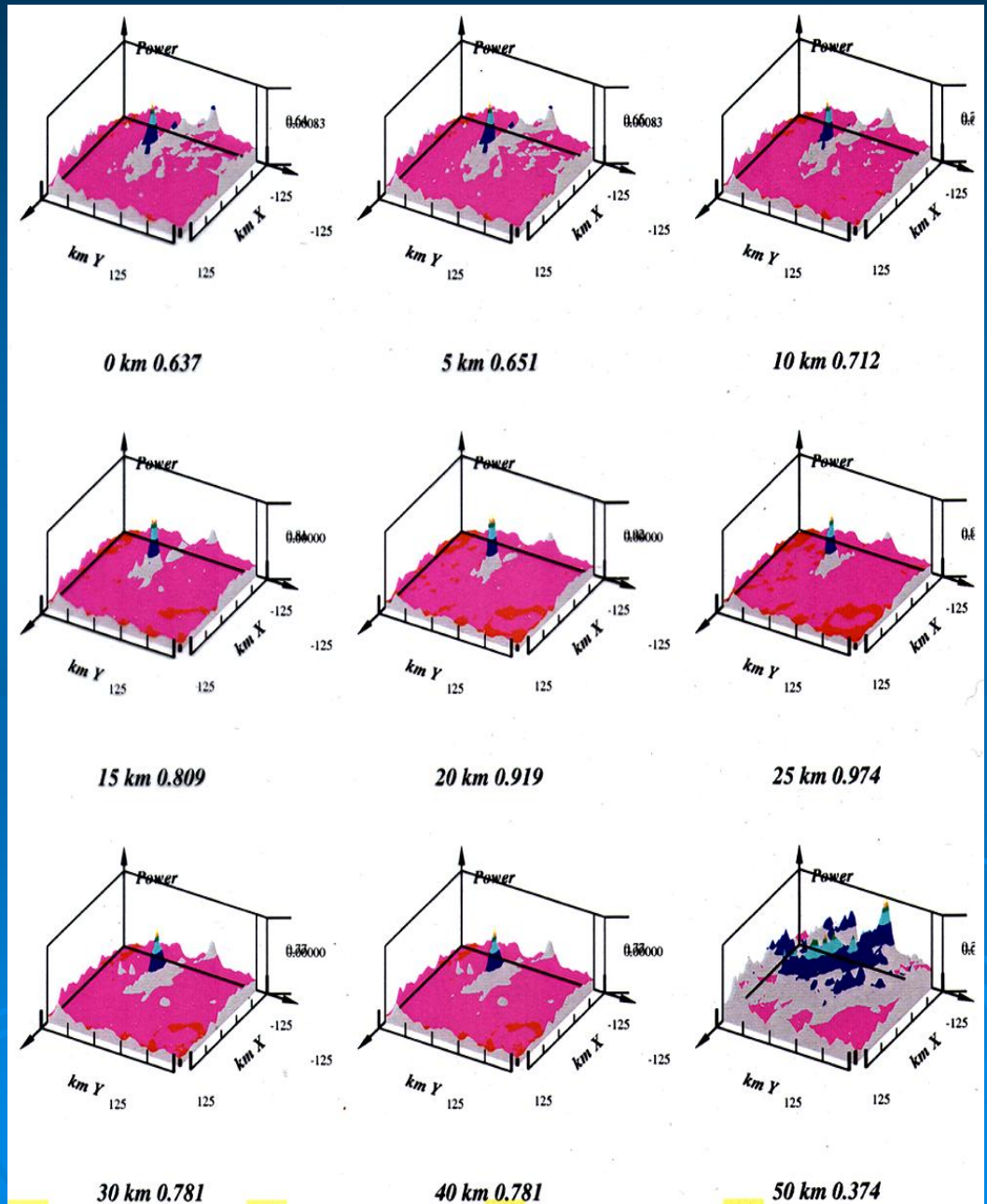


- Local earthquake recorded by the Israeli Seismic Network
- Area of scanning is 255 x 255 km, scanning grid spacing 5 km
- Number of seismic stations is 24

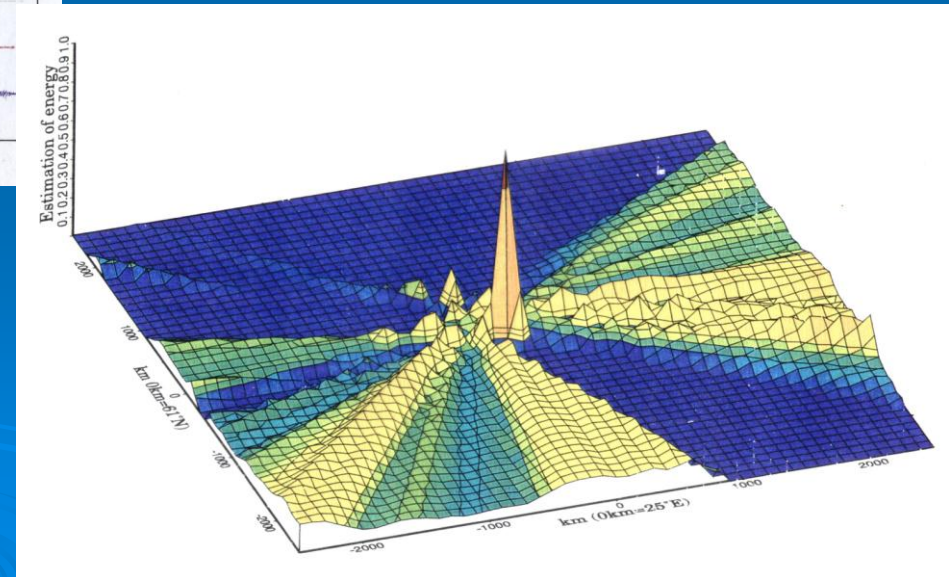
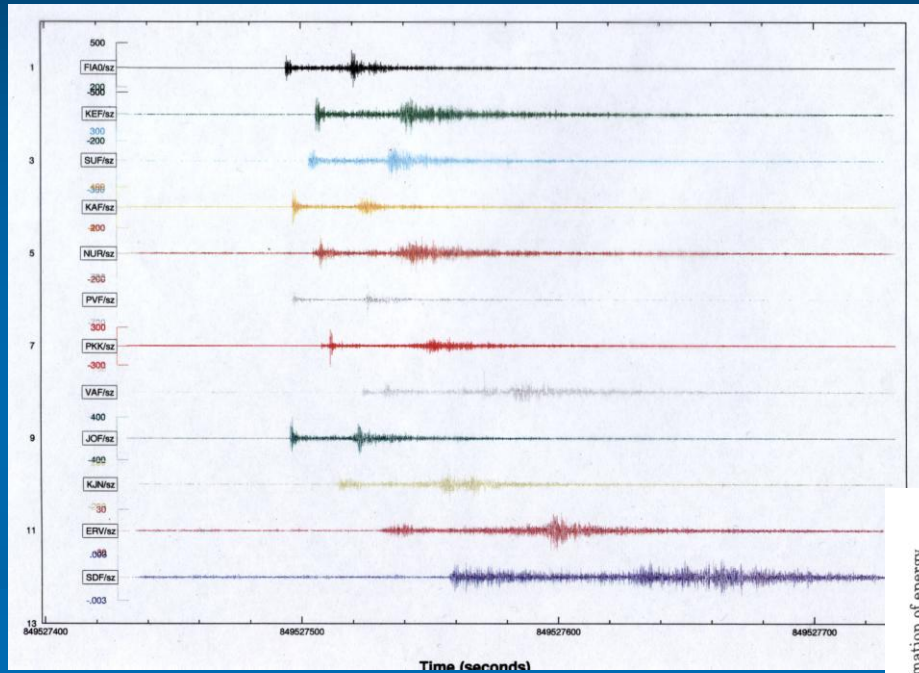


# Оценка глубины

- SNR maps calculated for the depths: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 and 50 km
- Values of *SNR*-map maxima are shown below each *SNR*-map
- Absolute maximum of *SNR*-map corresponds to the depth of hypocenter (25 km)



# Detection and location of quarry blast recorded by Finland Seismic Network



# *Автоматическая система обнаружения и локации событий разного масштаба*

- Могут использоваться все доступные типы волн (в режиме когерентного или некогерентного анализа)
- Метод обеспечивает возможность оперативного анализа и мониторинга сейсмичности, связанной с макро и микро источниками, в том числе контроля ГРП

# ***3D дифракционная томография с направленным облучением. От анализа микросейсм к трехмерной сейсморазведке***

- **Метод ОГТ остается основным и наиболее эффективным способом поиска и разведки структур, к которым приурочены месторождения углеводородов.**
- **По сути дела, ОГТ представляет собой частный случай пространственной системы возбуждения и приема сейсмических сигналов, которая обеспечивает возможность фокусировки сейсмических волновых полей на внутренних точках среды.**
- **Принципиальная особенность технологии ОГТ состоит в том, что метод ориентирован в основном на выделение и прослеживание границ и хуже работает в сложных средах с невыдержанными границами, часто представляющими разведочный интерес.**

# *3D дифракционная томография с направленным облучением*

- Пассивные методы обеспечивают возможность объемной геолокации достаточно сложных объектов.
- Основные ограничения связаны с низкой разрешающей способностью и надежностью обнаружения структур, отличающихся слабой эмиссионной способностью, т.е. они плохо различают в исследуемой толще «молчащие», неактивные объекты.
- Однако, мы можем использовать сформулированные подходы, если организуем направленную подсветку среды внешними источниками.

- В основе иного подхода лежит идея перехода от корреляции отражений и трассирования отражающих границ к сканированию среды с использованием направленных свойств пространственных систем излучения и приема.
- Суть развиваемого метода 3D дифракционной томографии с направленным облучением сводится к использованию управляемых излучающей и приемной пространственных систем для формирования направленного излучения и приема сейсмической энергии и синхронному сканированию среды этими двумя лучами, в процессе которого появляется возможность построения трехмерного изображения внутренней структуры среды.

# 3D Diffraction Tomography

Размер площадки по X--36 м (4--40 м), по Y--20 м (-4--16 м)

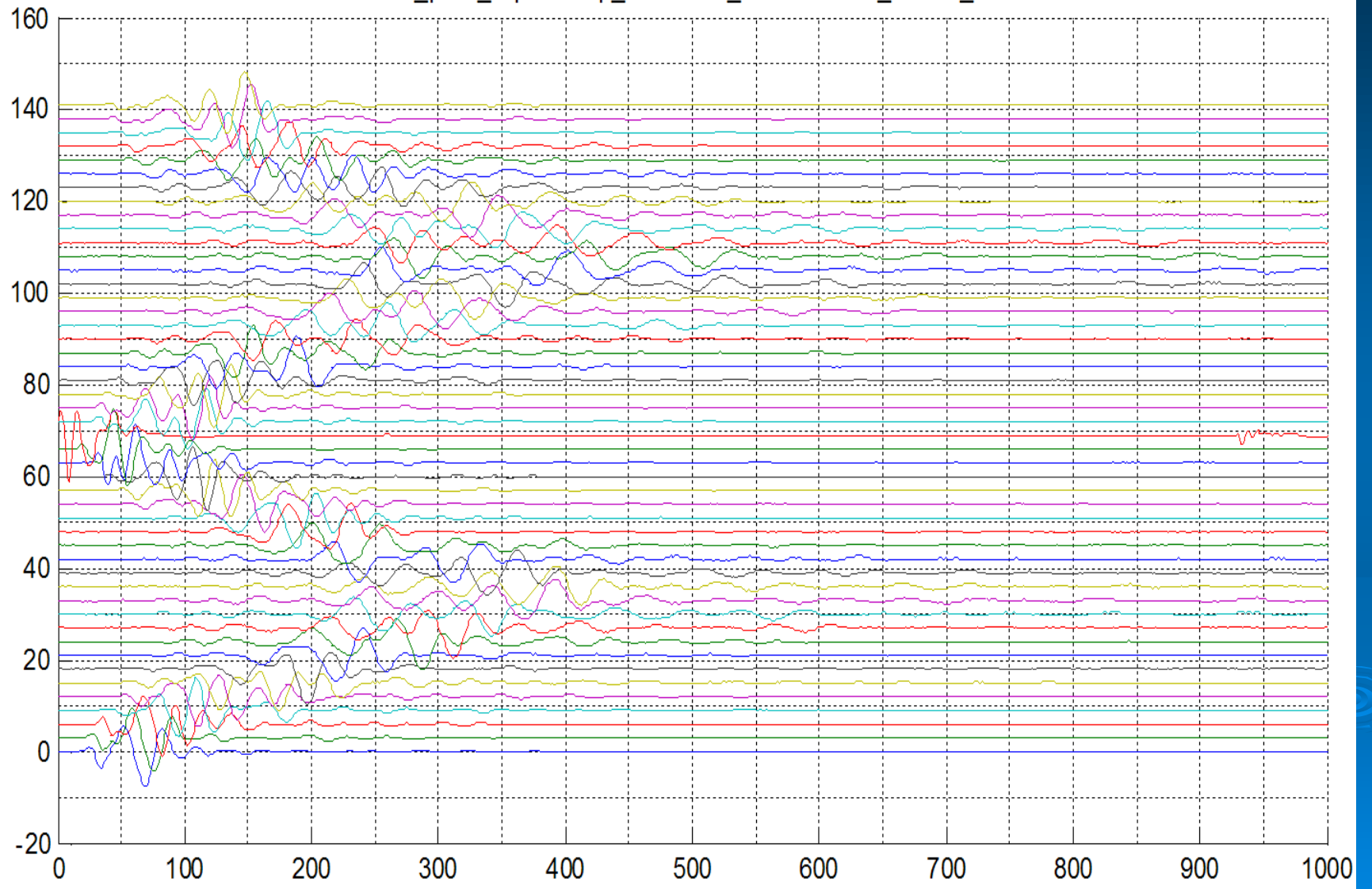
Использовалась скоростная колонка:

№ слоя	Отметка кровли (м)	Мощность (м)	Скорость (м/с)
1	0	4.5	1100
2	4.5	2	1700
3	6.5	1	1500
4	7.5	16	1800
5	23.5	100	2000

Схема расстановки точек приема и излучения и сетки опроса (\*):

Y/X(m)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	Y/X(m)
16		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		16
12	24ch/p01	*23ch/p02	*22ch/p03	*21ch/p04	*20ch/p05	*19ch/p06	*18ch/p07	*17ch/p08	*16ch/p09	*15ch/p10	*14ch/p11	13ch/p12	12
8	01ch/p24	*02ch/p23	*03ch/p22	*04ch/p21	*05ch/p20	*06ch/p19	*07ch/p18	*08ch/p17	*09ch/p16	*10ch/p15	*11ch/p14	12ch/p13	8
4	25ch/p25	*26ch/p26	*27ch/p27	*28ch/p28	*29ch/p29	*30ch/p30	*31ch/p31	*32ch/p32	*33ch/p33	*34ch/p34	*35ch/p35	36ch/p36	4
0	48ch/p48	*47ch/p47	*46ch/p46	*45ch/p45	*44ch/p44	*43ch/p43	*42ch/p42	*41ch/p41	*40ch/p40	*39ch/p39	*38ch/p38	37ch/p37	0
-4		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		-4
Y/X(m)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	Y/X(m)

Plot seis\_prob\_exp1.m exp\_MGU\seis\_sum\PR0001\_P0001\_sum.txt

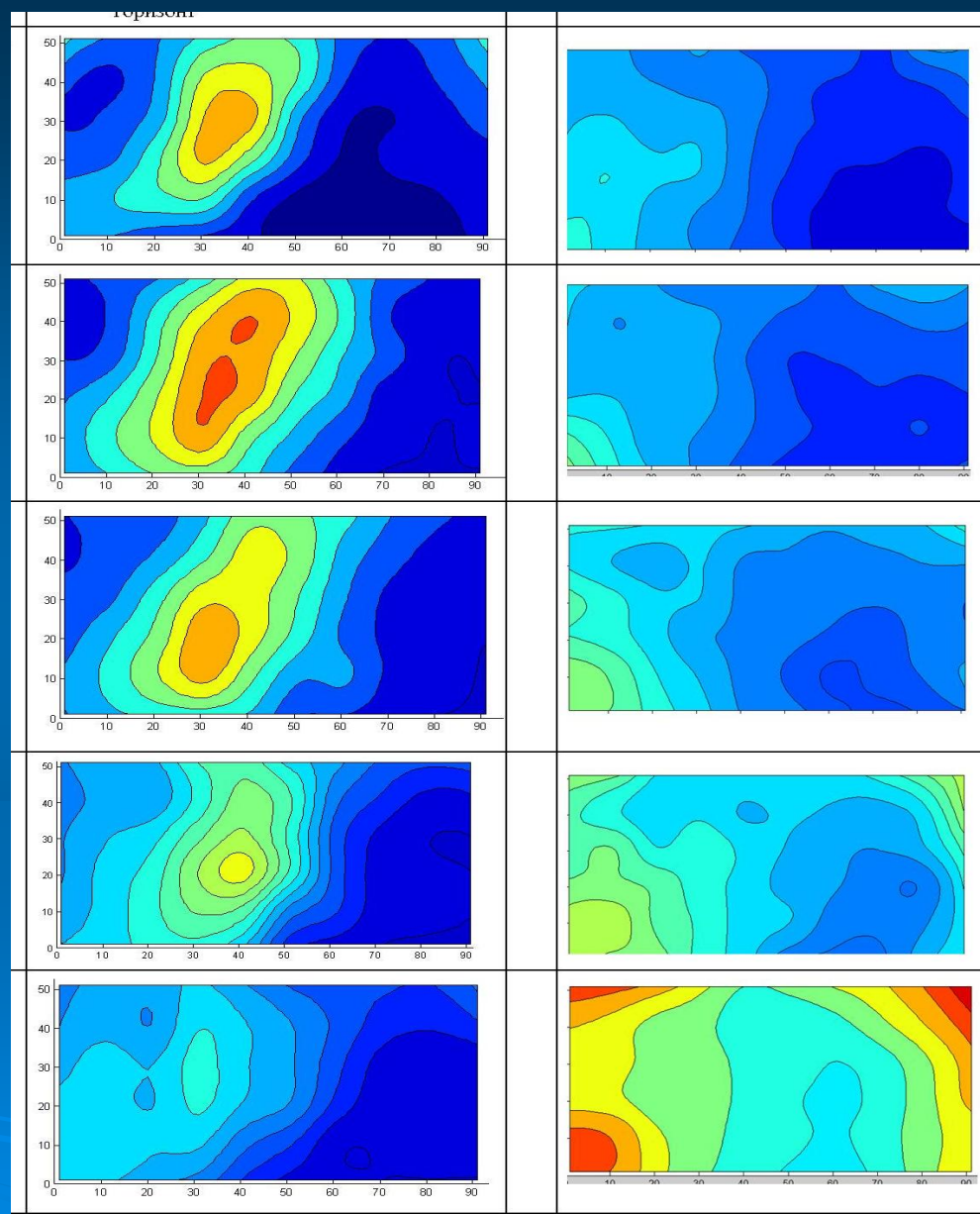




➤ Обработка данных, зарегистрированных 48 канальной расстановкой (4 x 12) с использованием ударных излучателей в зоне приема.

➤ Результатом обработки являются не временные разрезы, а трехмерное изображение мелкозаглубленного объекта (инженерного туннеля).

➤ Показаны горизонтальные сечения рассчитанной 3D матрицы оценок энергии дифрагированных волн (глубины от 4 до 20 м (слева) и от 24 до 40 м (справа) с шагом 4 м).



- Метод позволяет повысить разрешающую способность и надежность обнаружения в исследуемой среде неоднородностей за счет двойной фокусировки излучающей и приемной сейсмических антенн на внутренних точках среды, накопления и оптимальной согласованной адаптивной фильтрации принимаемых сигналов.
- Метод может быть использован для дополнительной обработки сложных фрагментов уже имеющихся сейсморазведочных данных ОГТ с целью картирования локальных неоднородностей в зонах нарушения прослеживаемости границ. Для этого комплекс может быть встроен в современные системы обработки сейсморазведочных данных.
- Дефектоскопы с фазированными решетками

# Был получен ряд патентов на данный способ 3D сейсморазведки



# Ультразвуковой дефектоскоп томограф A1550 IntroVisor с излучателями-приемниками в виде площадных антенн - фазированных решеток.

- Дефектоскоп, сканер протяженных объектов, или томограф для получения набора срезов или трехмерных изображений внутренних неоднородностей. Показаны два вида многоэлементных антенн - фазированных решеток для излучения и приема сигналов.
- Фазированные решетки позволяют фокусировать излучение и прием на внутренних точках.



# Я хочу выразить благодарность:

- Проф. А.В. Николаеву за его идею сканирования среды и плодотворные обсуждения
- Сотруднику ИФЗ РАН В.Л. Киселевичу за программное обеспечение регистрации, ввода и визуализации данных, участие в разработке программного пакета ASET и обработке данных
- Сотрудникам ИФЗ РАН А.В. Севальневу, В.С.Лаврову, В.Л. Киселевичу, В.Б. Смирнову за участие в подготовке и проведении полевых работ
- Проф. М.Л. Владову, кфмн А.Н. Ошкину и сотрудникам каф. Сейсмометрии геол ф-та МГУ за помощь в проведении экспериментальных работ по 3D сейсморазведке

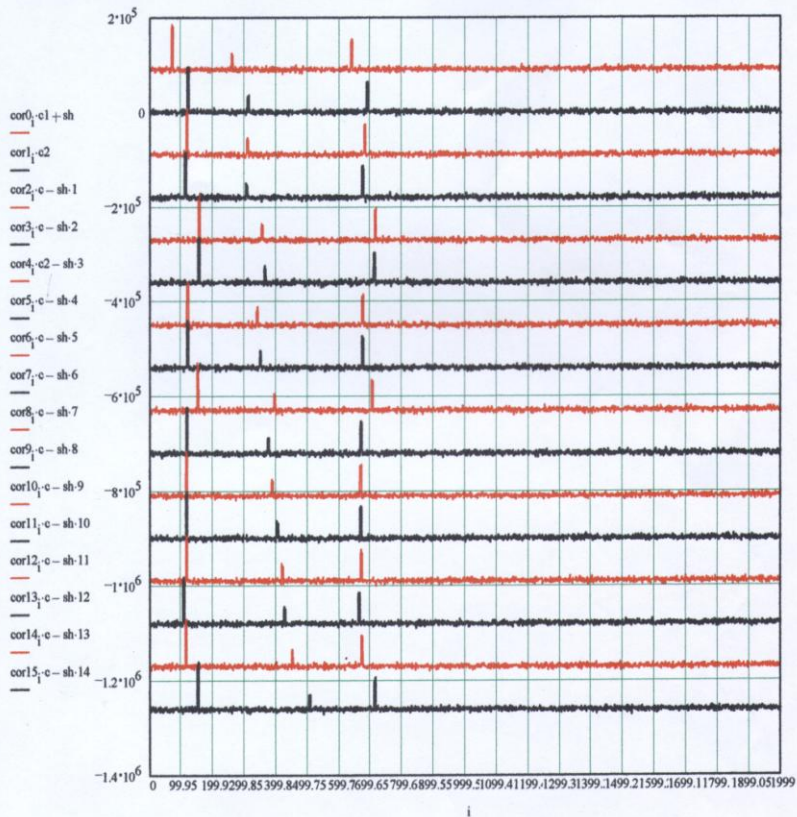
**Благодарю за внимание**



```

rows(ori) = 17 cols(ori) = 4*103 rows(cut) = 17 cols(cut) = 4*103 rows(ou) = 17 cols(ou) = 4*103 f0 := M0<0>
cor0 := M<0> cor1 := M<1> cor2 := M<2> cor3 := M<3> cor4 := M<4> cor5 := M<5> cor6 := M<6> cor7 := M<7>
cor9 := M<9> cor8 := M<8> cor10 := M<10> cor11 := M<11> cor12 := M<12> cor13 := M<13> cor14 := M<14> cor15 := M<15>
cor16 := M<16>
in0 := M2<0> in1 := M2<1> in2 := M2<2> in3 := M2<3> in4 := M2<4> in5 := M2<5> in6 := M2<6> in7 := M2<7>
in9 := M2<9> in10 := M2<10> in11 := M2<11> in12 := M2<12> in13 := M2<13> in14 := M2<14> in15 := M2<15> in16 := M2<16>
n := length(cor0) n1 := 0 n2 := 2000 sh := 90000 c := 100 c1 := 100 c2 := 100 i := n1..n2 - 1
ori = READPRN(humsud1) ou = READPRN(datscan) cut = READPRN(datscan) M0 = oriT M2 = oriT M = ouT

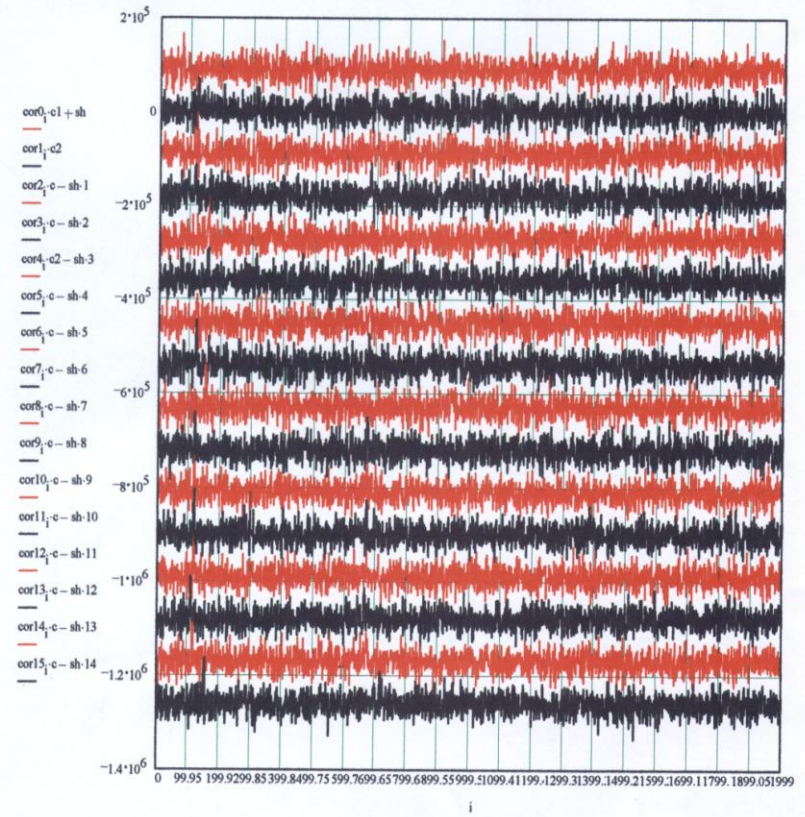
```



```

rows(ori) = 17 cols(ori) = 4*103 rows(cut) = 17 cols(cut) = 4*103 rows(ou) = 17 cols(ou) = 4*103 f0 := M0<0>
cor0 := M<0> cor1 := M<1> cor2 := M<2> cor3 := M<3> cor4 := M<4> cor5 := M<5> cor6 := M<6> cor7 := M<7>
cor9 := M<9> cor8 := M<8> cor10 := M<10> cor11 := M<11> cor12 := M<12> cor13 := M<13> cor14 := M<14> cor15 := M<15>
cor16 := M<16>
in0 := M2<0> in1 := M2<1> in2 := M2<2> in3 := M2<3> in4 := M2<4> in5 := M2<5> in6 := M2<6> in7 := M2<7>
in9 := M2<9> in10 := M2<10> in11 := M2<11> in12 := M2<12> in13 := M2<13> in14 := M2<14> in15 := M2<15> in16 := M2<16>
n := length(cor0) n1 := 0 n2 := 2000 sh := 90000 c := 100 c1 := 100 c2 := 100 i := n1..n2 - 1
ori = READPRN(humsud1) ou = READPRN(datscan) cut = READPRN(datscan) M0 = oriT M2 = oriT M = ouT

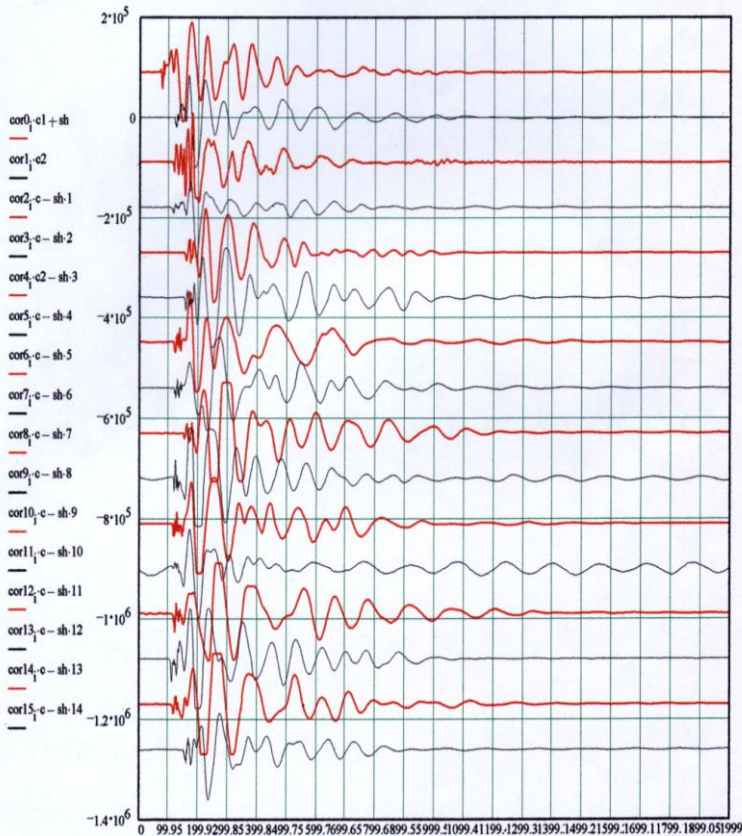
```



```

rows(ori) = 17 cols(ori) = 4*103 rows(cut) = 17 cols(cut) = 4*103 rows(ou) = 17 cols(ou) = 4*103 fd := M0<0>
cor0 := M<0> cor1 := M<1> cor2 := M<2> cor3 := M<3> cor4 := M<4> cor5 := M<5> cor6 := M<6> cor7 := M<7>
cor9 := M<9> cor8 := M<8> cor10 := M<10> cor11 := M<11> cor12 := M<12> cor13 := M<13> cor14 := M<14> cor15 := M<15>
cor16 := M<16>
in0 := M2<0> in1 := M2<1> in2 := M2<2> in3 := M2<3> in4 := M2<4> in5 := M2<5> in6 := M2<6> in7 := M2<7>
in9 := M2<9> in10 := M2<10> in11 := M2<11> in12 := M2<12> in13 := M2<13> in14 := M2<14> in15 := M2<15> in16 := M2<16>
n := length(cor0) n1 := 0 n2 := 2000 sh := 90000 c := 10 cl := 10 c2 := 10 i := n1..n2 - 1
ori := READPRN(humsu9) ou := READPRN(datscan) cut := READPRN(datscan) M0 := oriT M2 := oriT M := oriT

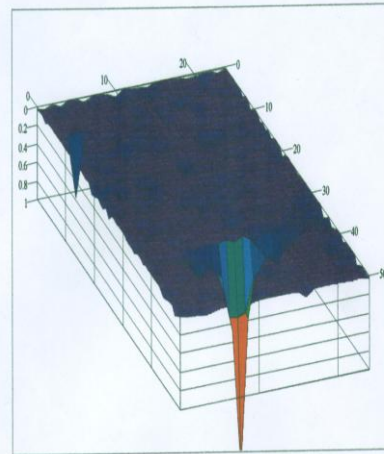
```



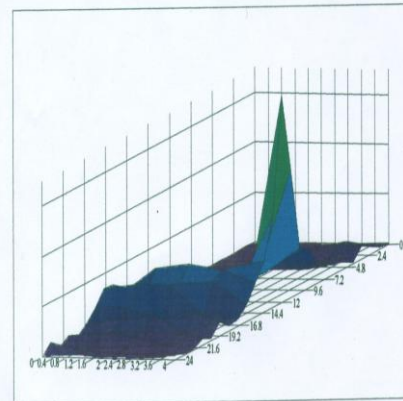
```

M := sm rows(sm) = 1.275*103 cols(sm) = 5 nyu := rows(sm)/nzu nzu := cols(sm) nyu = 25 nzu = 5
iyb := iztek*nyu iye := iyb + nyu - 1 ixb := 0 ise := nzu - 1 Mz := submatrix(M, iyb, iye, ixb, ise)
iz := 0, 1, nzu - 1 iy := 0, 1, nyu - 1 ix := 0, 1, nzu - 1 sm := READPRN(smmap) k1 := 1.5 k2 := 0.7
Mx_{y,u} := (M<iztek>)^{iy+iz*nyu} nzu = 51 iztek = 36 istek = 0 Mxx := MxT*k1 Mz := Mz*k2

```



Mxx



Mz

```

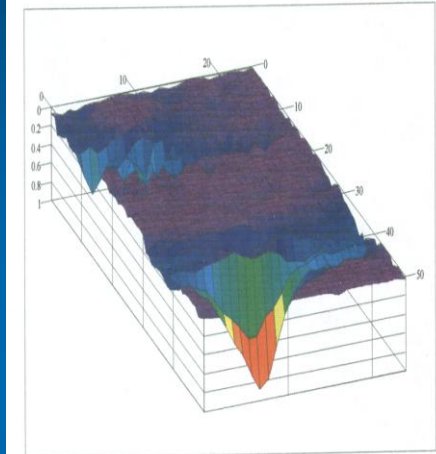
M := sm rows(sm) = 1.275*103 cols(sm) = 5 nyu := rows(sm)/nzu nzu := cols(sm) nyu = 25 nzu = 5
iyb := iztek*nyu iye := iyb + nyu - 1 ixb := 0 ise := nzu - 1 Mz := submatrix(M, iyb, iye, ixb, ise)
iz := 0, 1, nzu - 1 iy := 0, 1, nyu - 1 ix := 0, 1, nzu - 1 sm := READPRN(smmap)

```

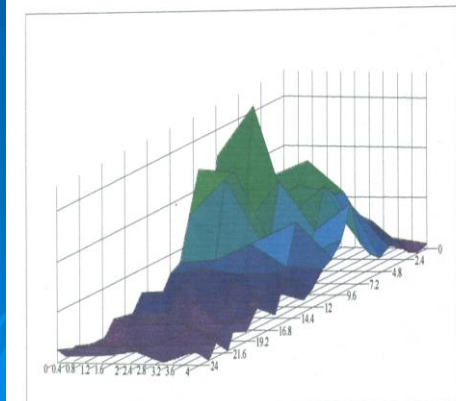
```

Mx_{y,u} := (M<iztek>)^{iy+iz*nyu} nzu = 51 iztek = 10 istek = 0 Mxx := MxT

```



Mxx



Mz



