

Сейсмическая томография в вулканологии

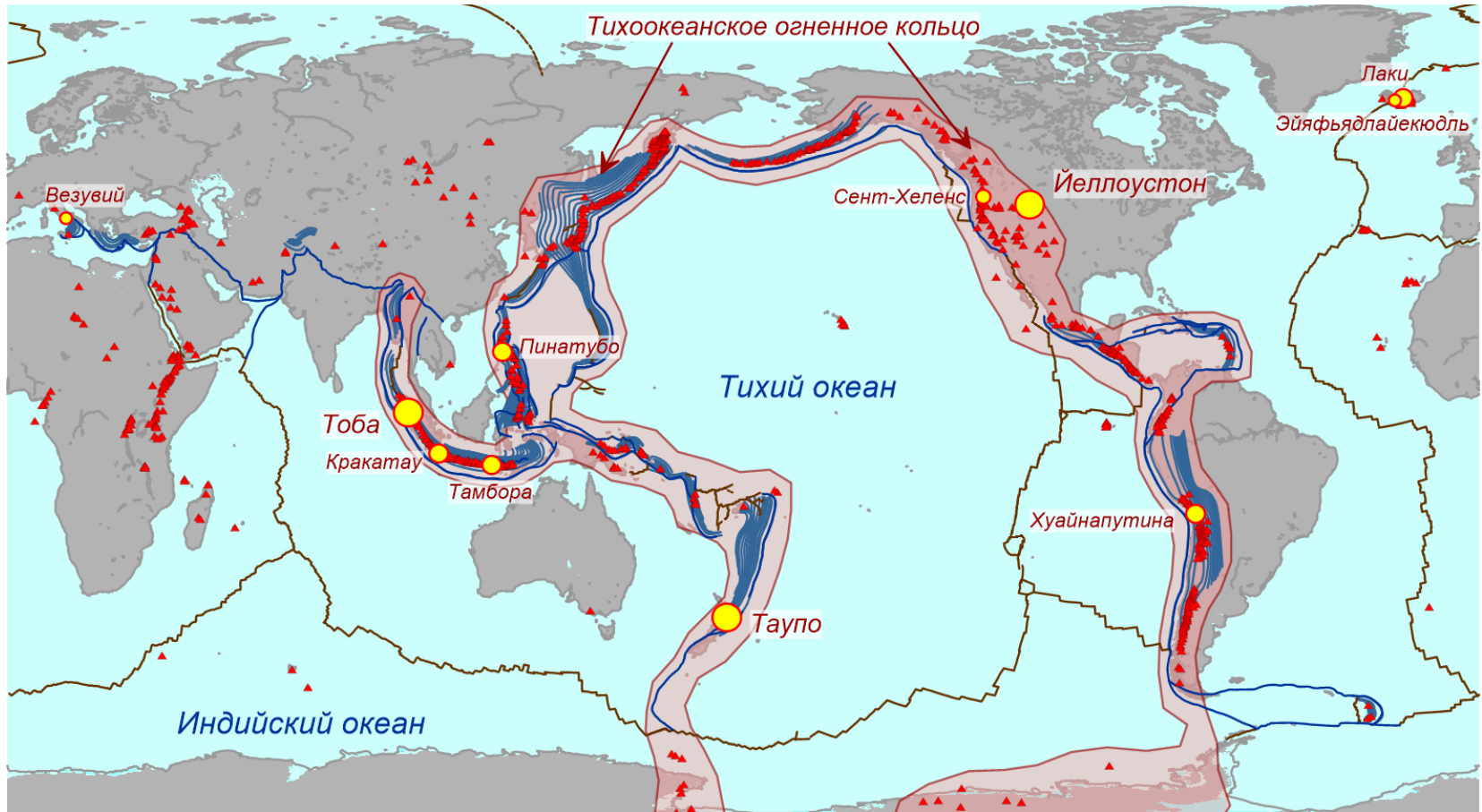
Иван Кулаков (1,2)

- (1) Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А. Трофимука (KoulakovIY@ipgg.sbras.ru),
- (2) Новосибирский государственный университет



«Декабрьские чтения», Институт математики СО РАН
24 декабря 2016 года

Некоторые известные извержения вулканов



Знаменитые вулканы:

(указана дата и объем в куб. км выброшенного вещества):



Супервулканы

более 1000 куб. км в твердом эквиваленте

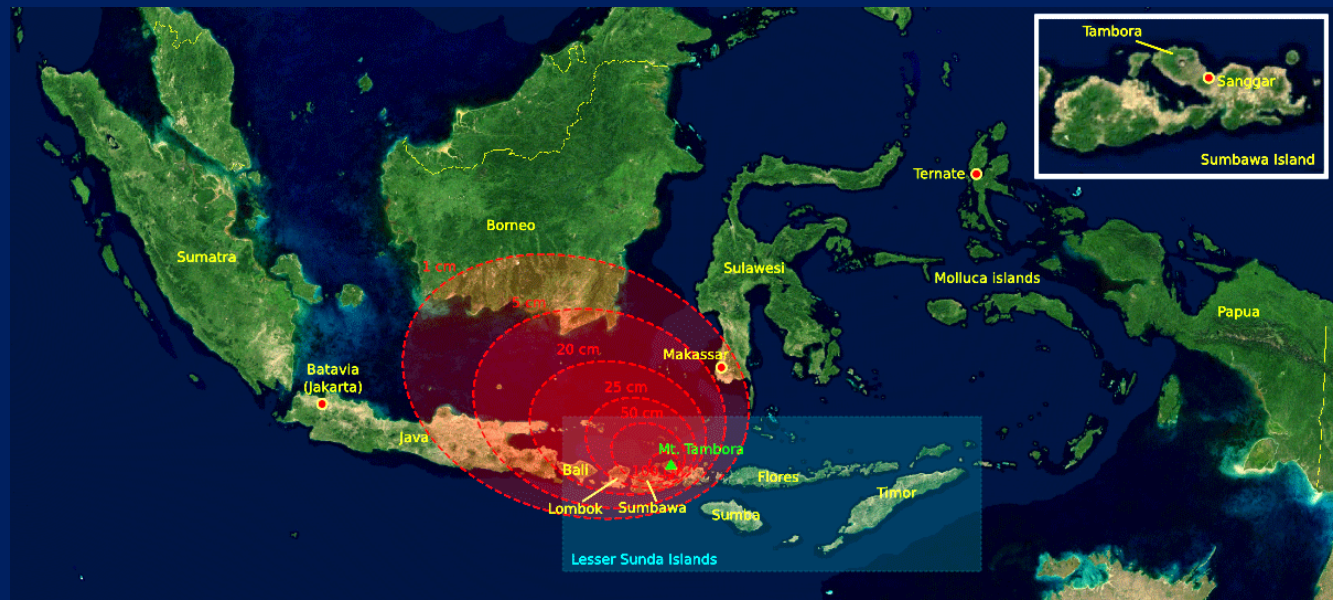


Вулкан Тамбора (Индонезия) 1815 год - крупнейшее извержение в человеческой истории

1812 г. – вулкан проснулся

10 апреля 1815 г. – взрыв, который
был слышен на Суматре на
расстоянии 2600 км

Кромешная тьма на расстоянии 600
км от вулкана



Вулкан Тамбора (Индонезия) 1815 год - крупнейшее извержение в человеческой истории

Извергнуто 150 – 180 км³ материала

Эруптивная колонна достигла
стратосферы – 43 км

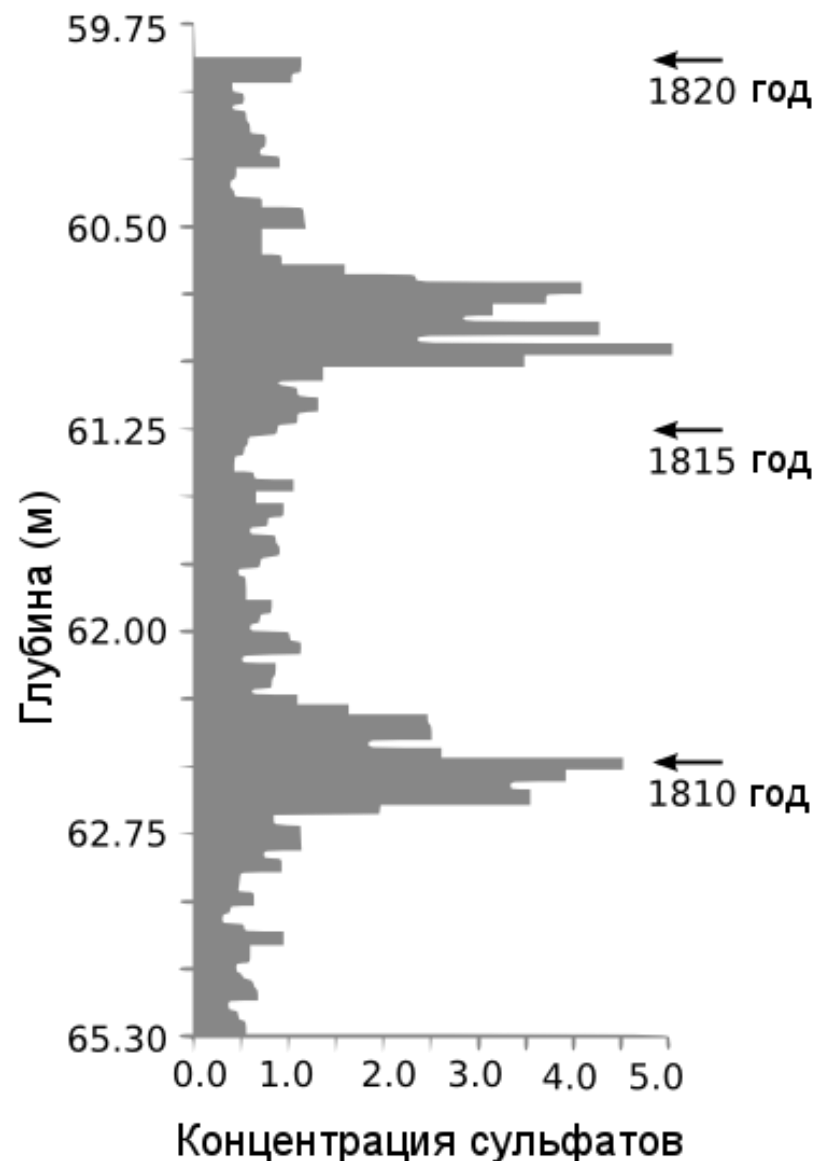
Глобальное влияние на климат:

1816 год без лета

В июне – снег 30 см в Квебеке

Голод и эпидемия тифа в Европе
привели к беспорядкам

Массовый голод и холера в Индии



Концентрация сульфатов в ледяном керне из Центральной Гренландии. По нему можно определить уровень загрязнения атмосферы вулканическими выбросами. Кроме того, керн указывает на неизвестное извержение начала 1810-х годов

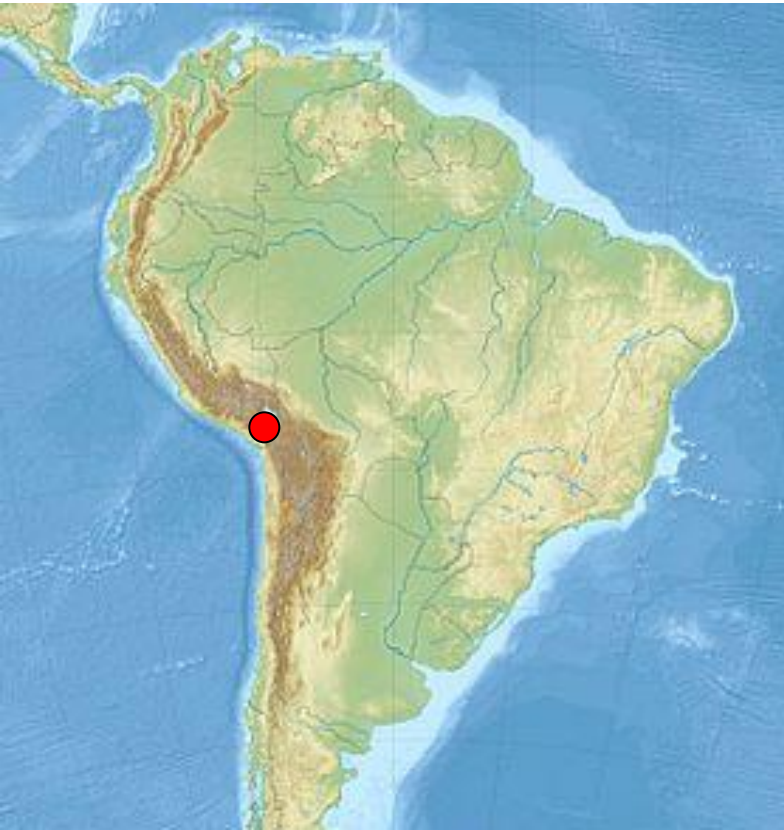
Нуаунапутина volcano (Перу):

16 февраля – 9 марта 1601 г.

Причина «малого ледникового периода» в Европе:

В 1601-1603 годы –
страшнейший голод в России,
вызвавший смутное время

Объем извержения –
«только» 30 куб. км.



**Предотвратить или ослабить
вулканические катастрофы
человек не способен,**

**НО МОЖЕТ ИХ
предсказать**



Как изучают вулканы?











EURO 3

240 TURBO
INTERCOOLER

KAMAZ

A 317 PB 41
RUS



КамАЗ



RA-2216 G

R44





Изучение вулканов сейсмическими методами

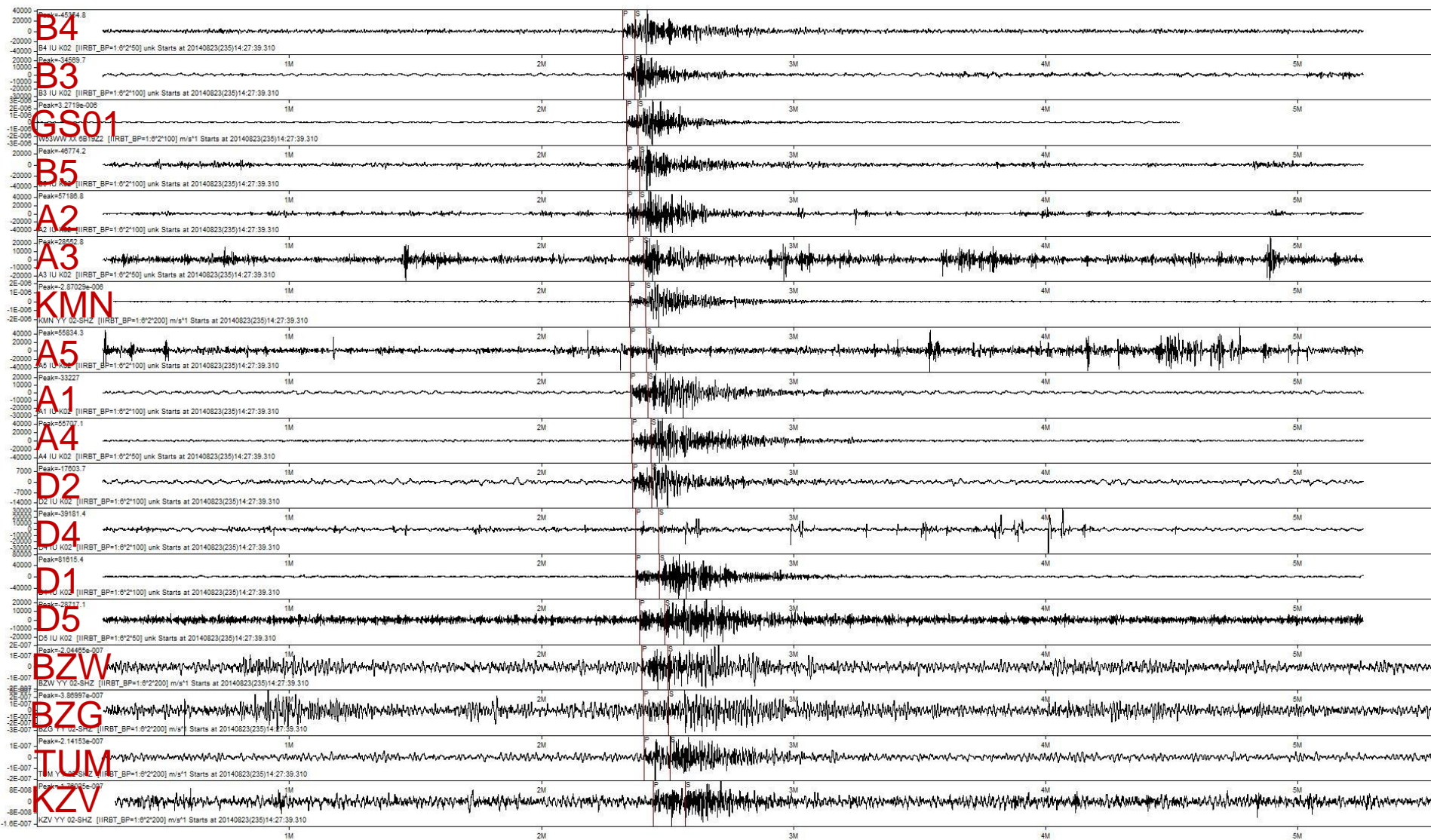


Sensor CME 4111

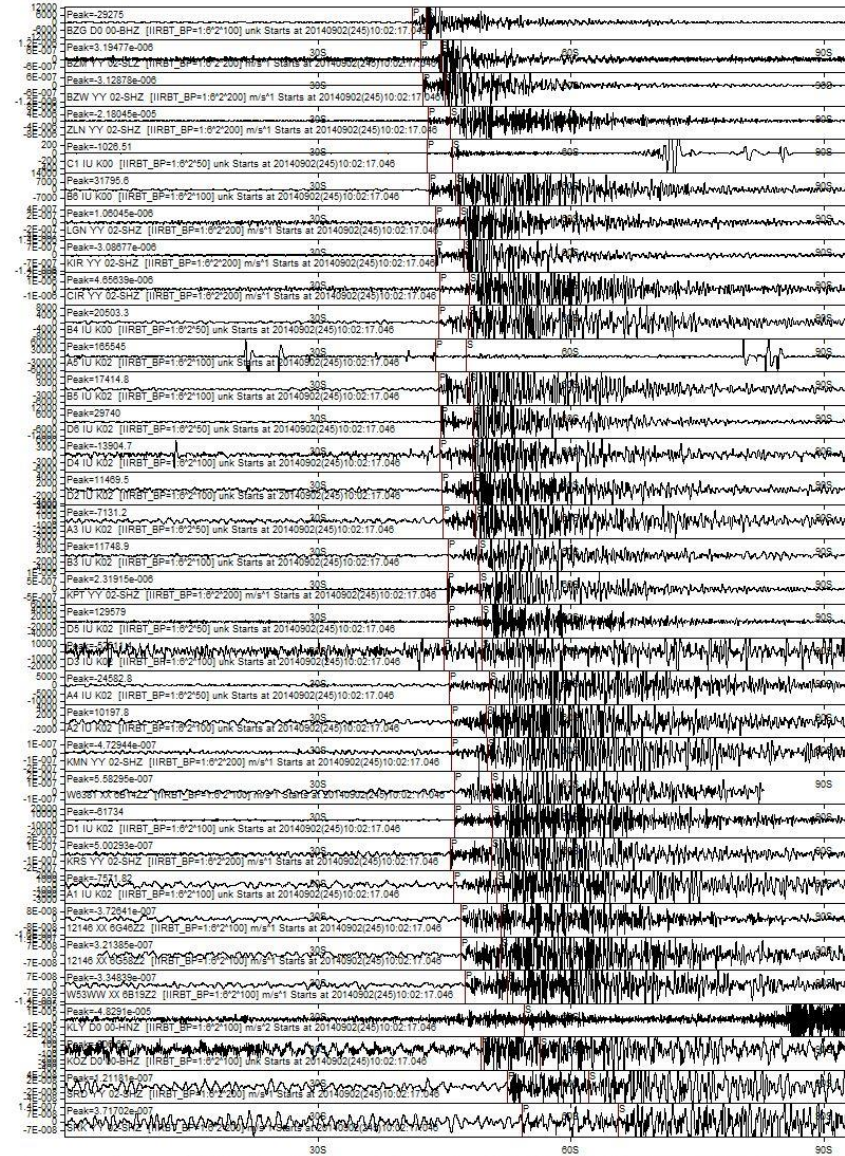
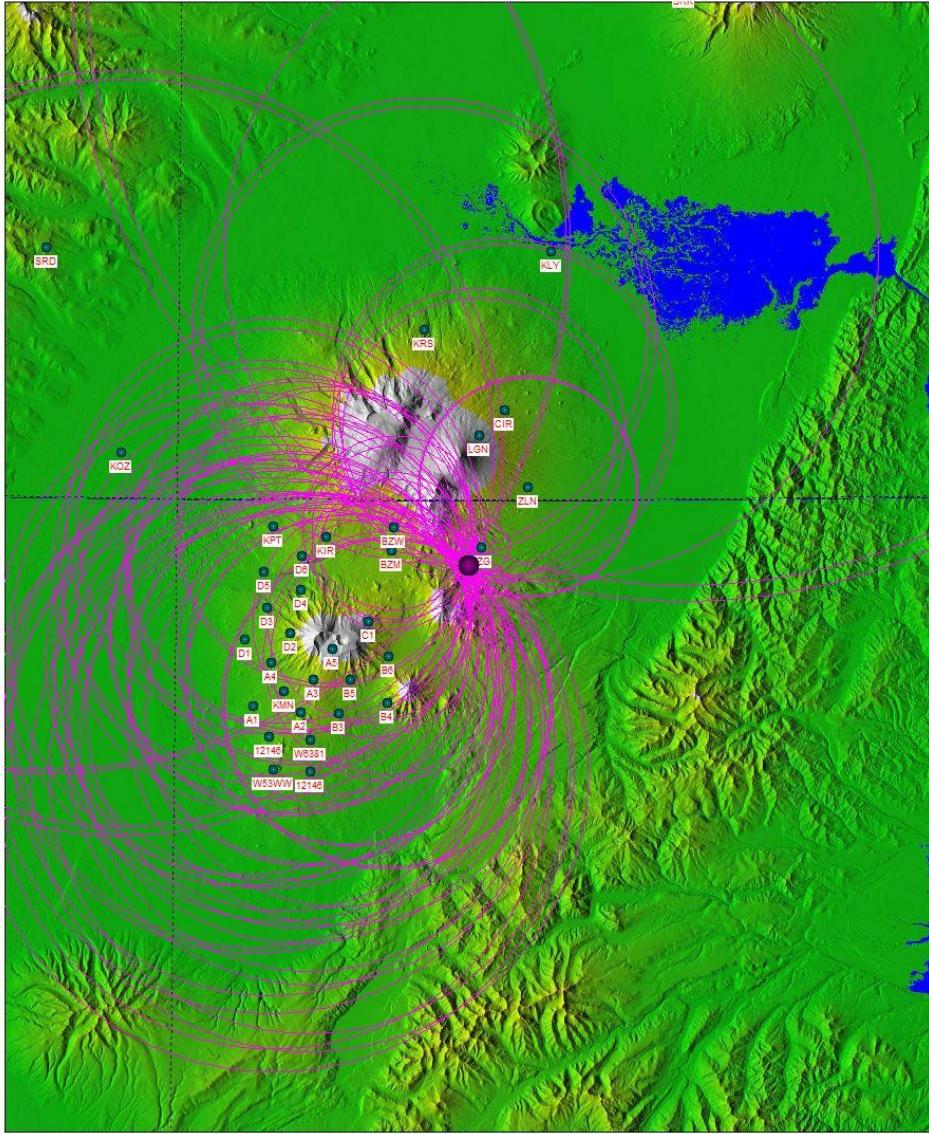
Recorder Baikal



Example of time picking at IPGG and KBGS stations (23.08.2014):



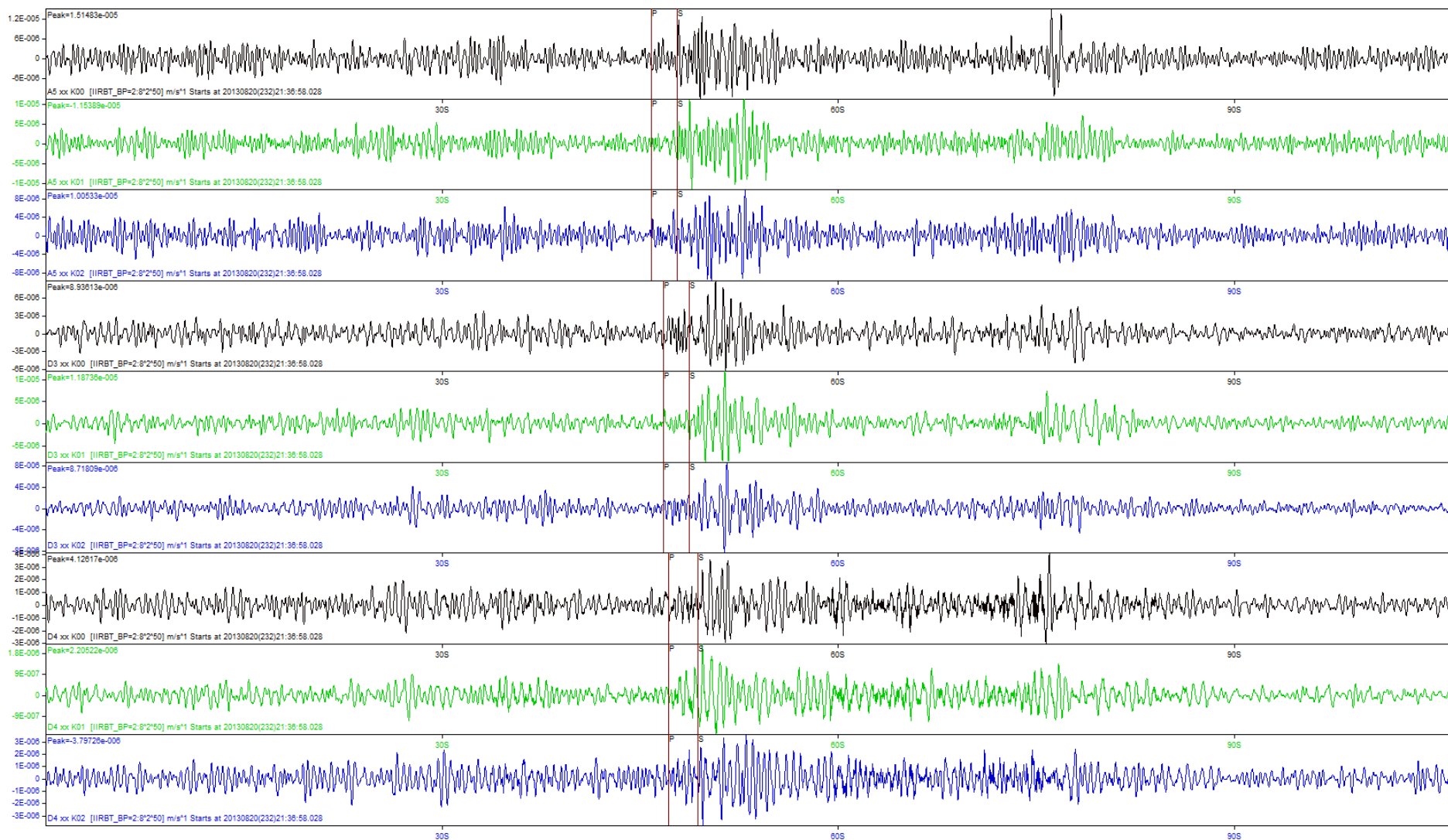
Example of time picking at IPGG and KBGS stations and preliminary location:



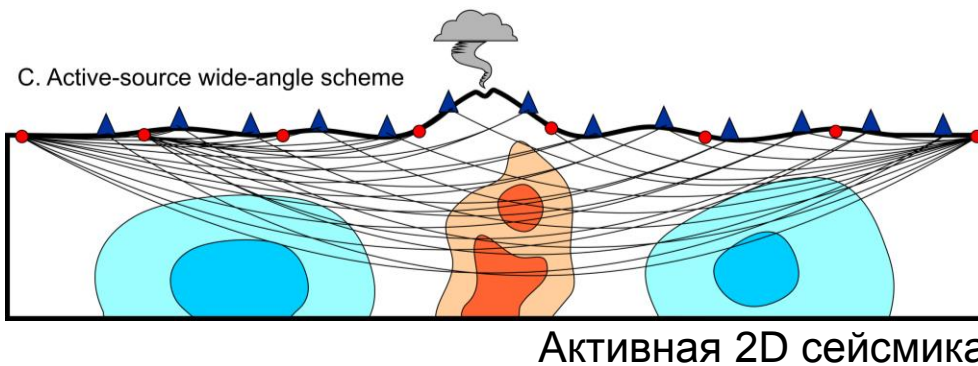
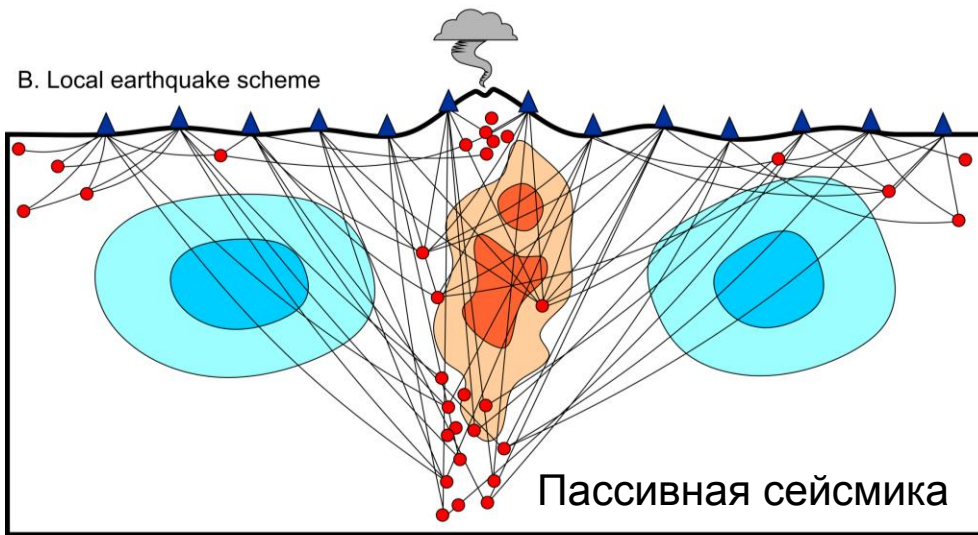
30S 60S 90S

Идентификация событий и снятие времен прихода

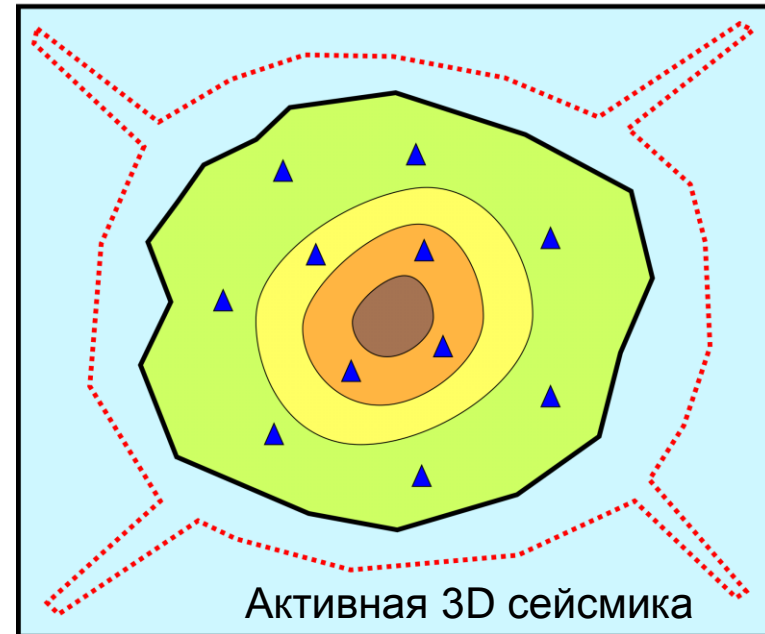
– сложная задача, требующая исследований



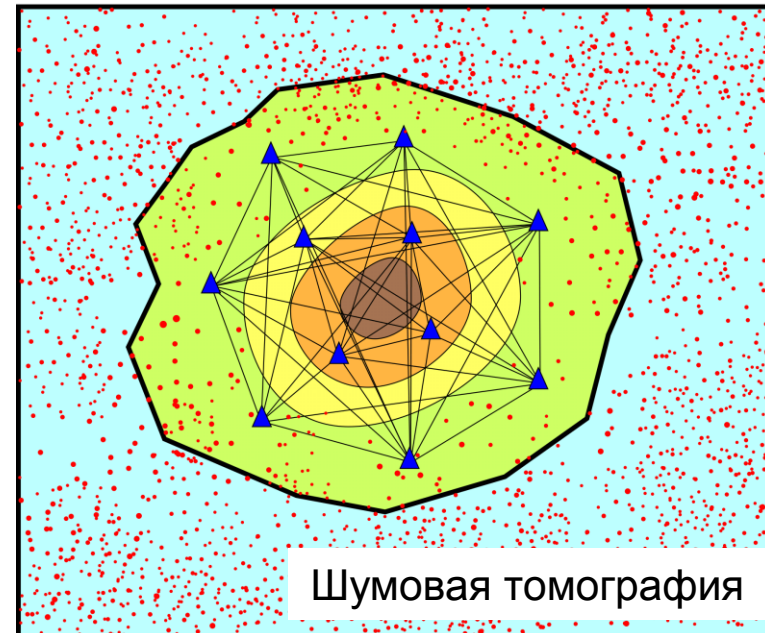
Системы наблюдения для изучения вулканов различными сейсмическими методами



A. Active-source scheme (airgun shots)

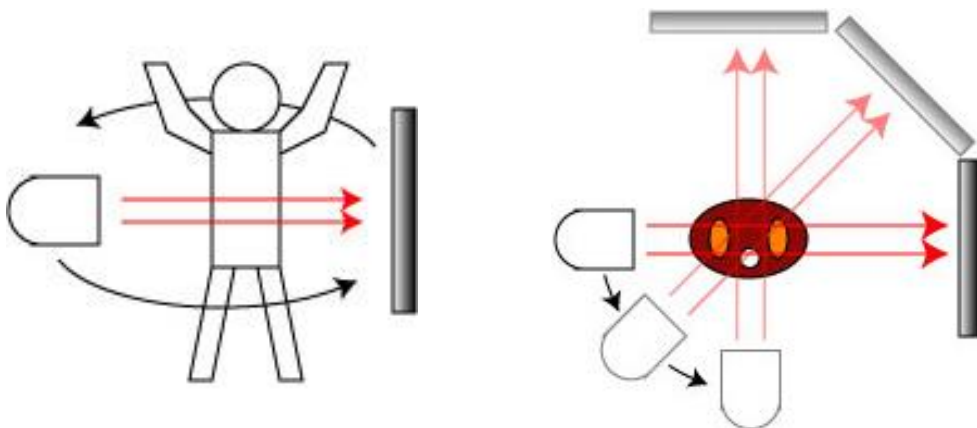


B. Scheme for ambient noise tomography



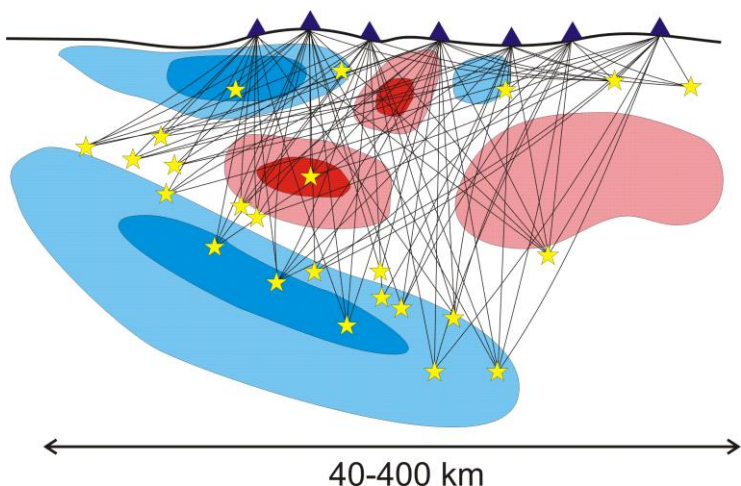
Лучевая томография

Медицинская томография:



- Источник: X-rays.
- Лучи – прямые линии.
- Измеряется затухание
- Все направления просвечивания доступны

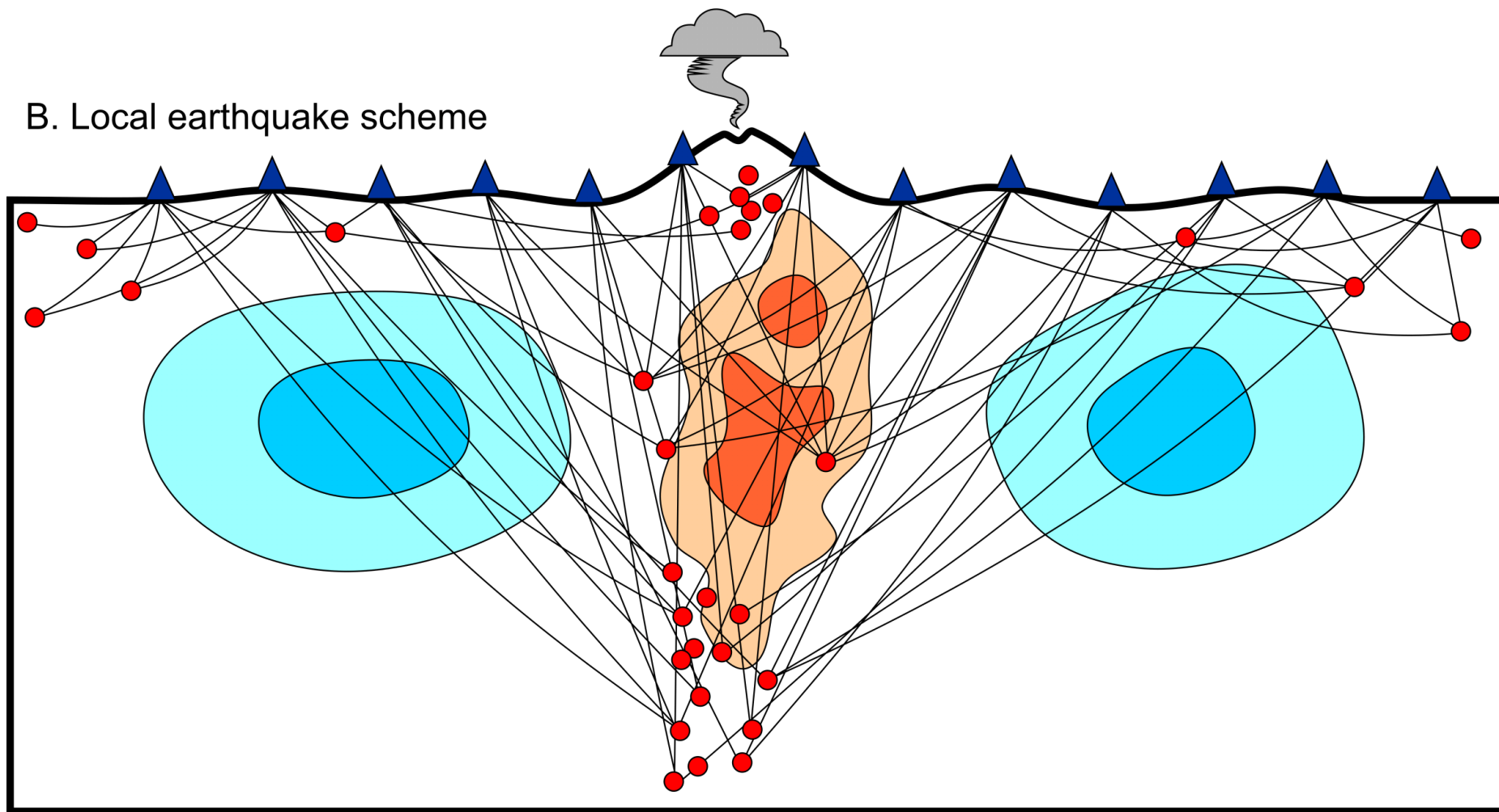
Сейсмическая томография:



- Необходимо определить 3D сейсмическую структуру (скорости P и S волн)
- Источник: Землетрясения (неизвестны) или искусственные взрывы-удары (известны)
- Лучи – кривые, зависящие от скорости (неизвестны).
- Распределение приемников и источников часто крайне неравномерно
- Направления просвечивания изучаемого объекта сильно ограничено

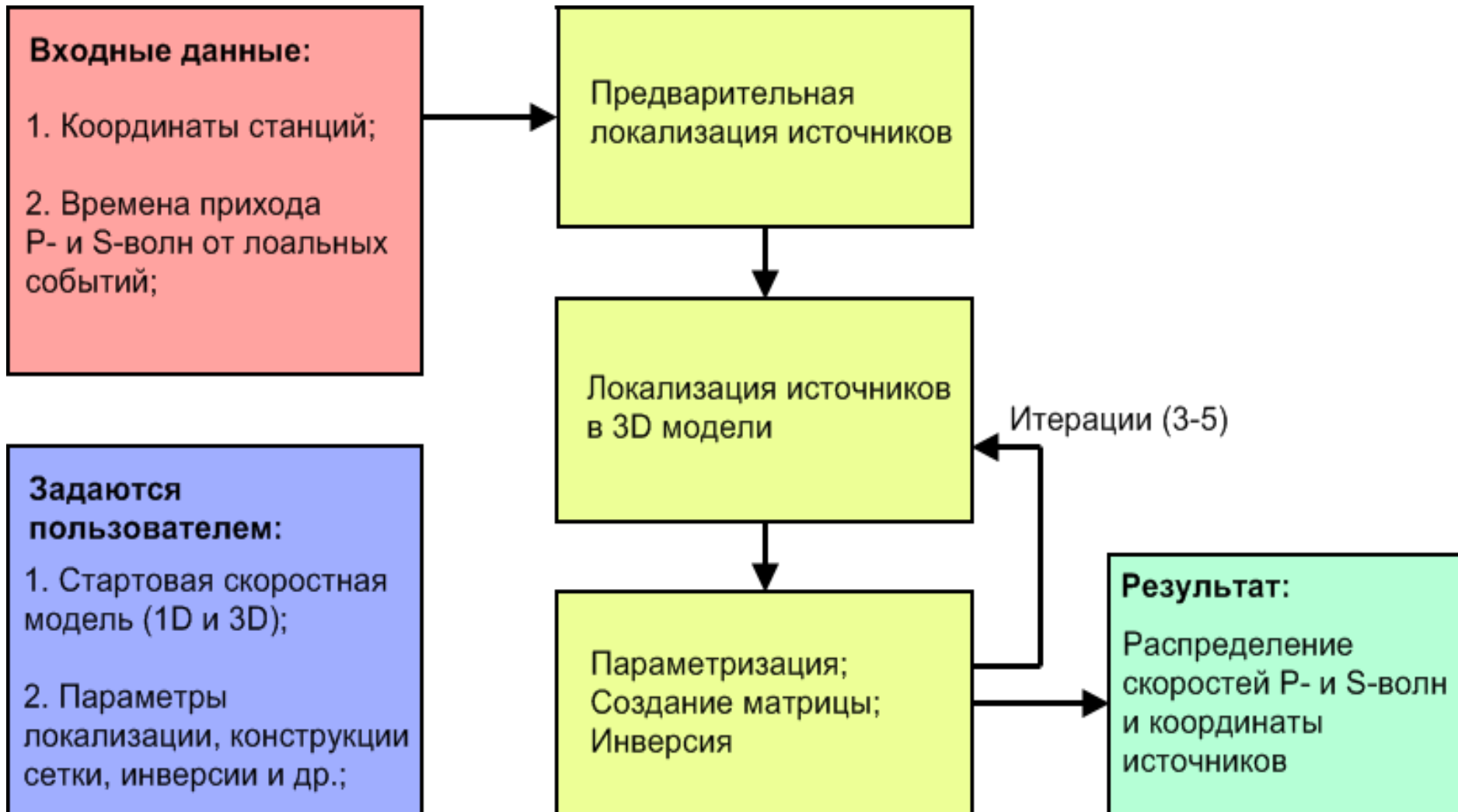
Метод 1: Сейсмическая томография с использованием времен пробега сейсмических волн от пассивных источников (LOTOS code)

B. Local earthquake scheme



Масштабы от 1s км до 100s км;
Данные с локальных сетей

Структура алгоритма пассивной сейсмической томографии LOTOS



Расчет матрицы 1х производных

$$\sum_{i=1, N} S_{ij} d\sigma_i = dt_j$$

N – количество параметров

S_{ij} – длина j -го луча в i -й ячейке

$d\sigma_i$ – искомая медленность в i -й ячейке;

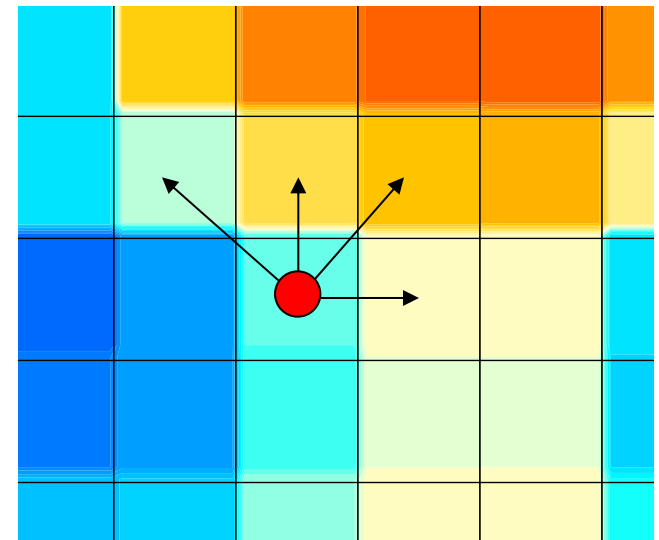
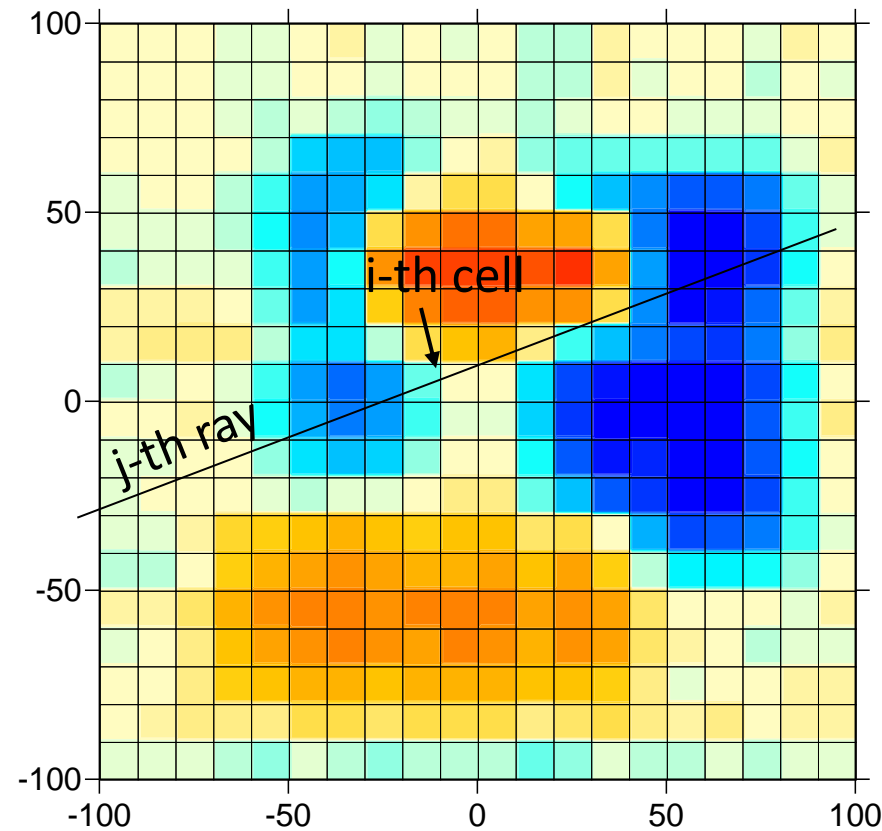
dt_j – временная невязка вдоль j -го луча;

Сглаживание:

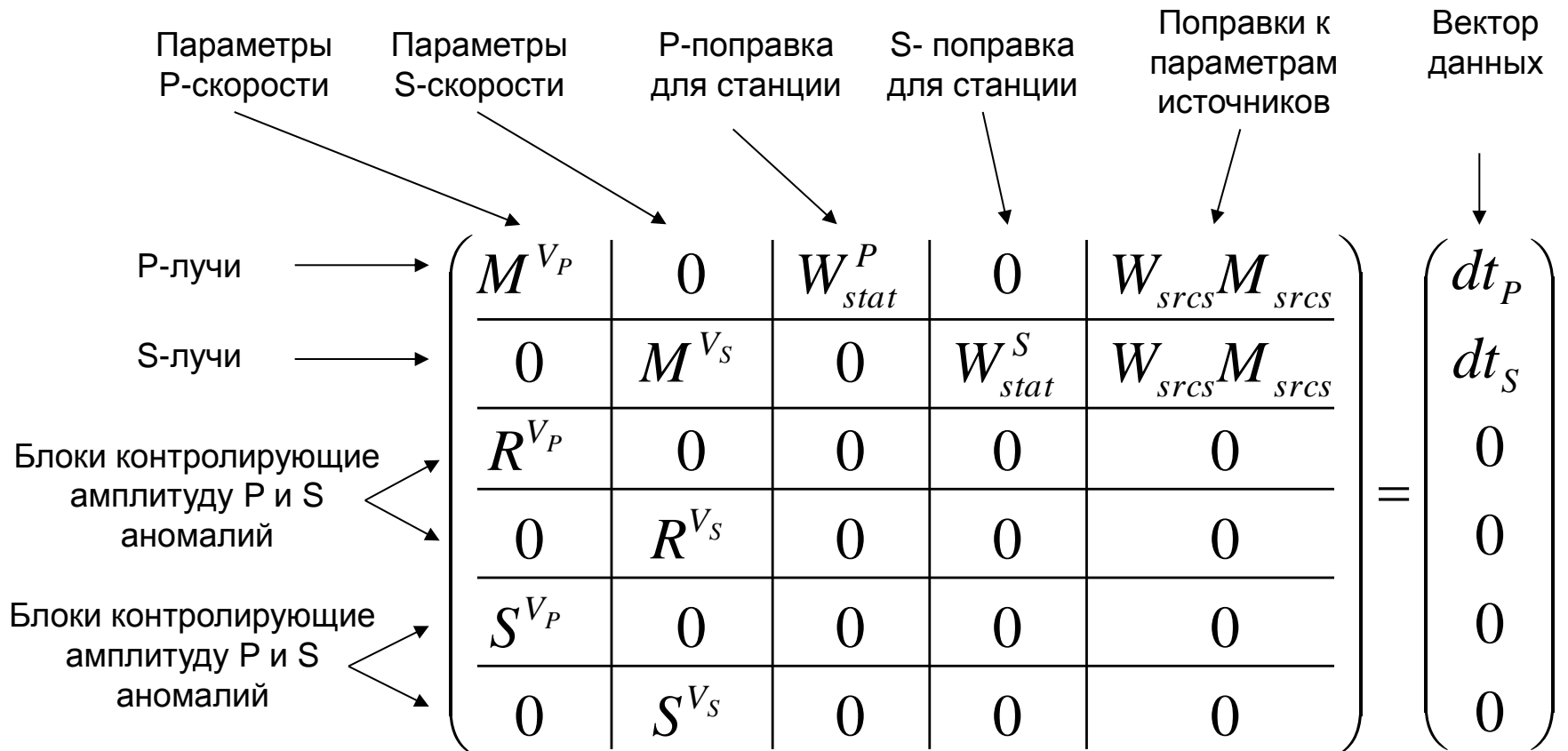
$$W(\sigma_k - \sigma_m) = 0$$

k, m – номера соседних ячеек

W – вес сглаживания



Создание и инверсия матрицы:



Инверсия большой разреженной матрицы производится методом LSQR
 Paige and Saunders, 1982
 Nolet, 1987

LSQR algorithm for solving a system of linear equations (Page, Saunders, 1982)

```
subroutine pstomo(m,n,x,u,v,w,itmax,nz,aaa,ncolrow,ncol)
real x(n),u(m),v(n),w(n),aaa(nz)
integer ncolrow(nz),ncol(m)
x=0.; v=0.
call normlz(m,u,beta)
b1=beta
call atupv(m,n,u,v,nz,aaa,ncolrow,ncol)
call normlz(n,v,alfa)
rhobar=alfa; phibar=beta
w=v
do iter =1,itmax ! repeat for fixed nr of iterations
  a=-alfa
  u=a*u ! bidiagonalization
  call avpu(m,n,u,v,nz,aaa,ncolrow,ncol)
  call normlz(m,u,beta)
  b=-beta
  v=b*v
  call atupv(m,n,u,v,nz,aaa,ncolrow,ncol)
  call normlz(n,v,alfa)
  rho=sqrt(rhobar*rhobar+beta*beta)
  c=rhobar/rho; s=beta/rho
  teta=s*alfa; rhobar=-c*alfa
  phi=c*phibar; phibar=s*phibar
  t1=phi/rho; t2=-teta/rho
  xnorm=0.0
  do i=1,n ! update solution x and storage vector w
    x(i)=t1*w(i)+x(i)
    xnorm=xnorm+abs(x(i))
    w(i)=t2*w(i)+v(i)
  end do
  r=phibar/b1
  xnorm=xnorm/n
end do
return
end
```

```
subroutine avpu(m,n,u,v,nz,aaa,ncolrow,ncol)
real u(m),v(n),aaa(nz)
integer ncolrow(nz),ncol(m)
kount=0
do i=1,m
  nc=ncol(i)
  do j=1,nc
    kount=kount+1
    u(i)=u(i)+aaa(kount)*v(ncolrow(kount))
  end do
end do
return
end
```

```
subroutine atupv(m,n,u,v,nz,aaa,ncolrow,ncol)
real u(m),v(n),aaa(nz)
integer ncolrow(nz),ncol(m)
kount=0
do i=1,m ! work row by row (here too!)
  nc=ncol(i)
  do j=1,nc
    kount=kount+1
    jj=ncolrow(kount)
    v(jj)=v(jj)+aaa(kount)*u(i)
  end do
end do
return
end
```

```
subroutine normlz(n,x,s)
real x(n)
s=0.
do i=1,n
  s=s+x(i)**2
end do
s=sqrt(s)
ss=1./s
x=x*ss
return
end
```

LSQR algorithm for solving a system of linear equations

(Page, Saunders, 1982, Nolet, 1987)

Достоинства:

-не требует хранения матриц в оперативной памяти компьютера. Только ненулевые элементы.

-Высокая скорость расчетов

-Высокая точность

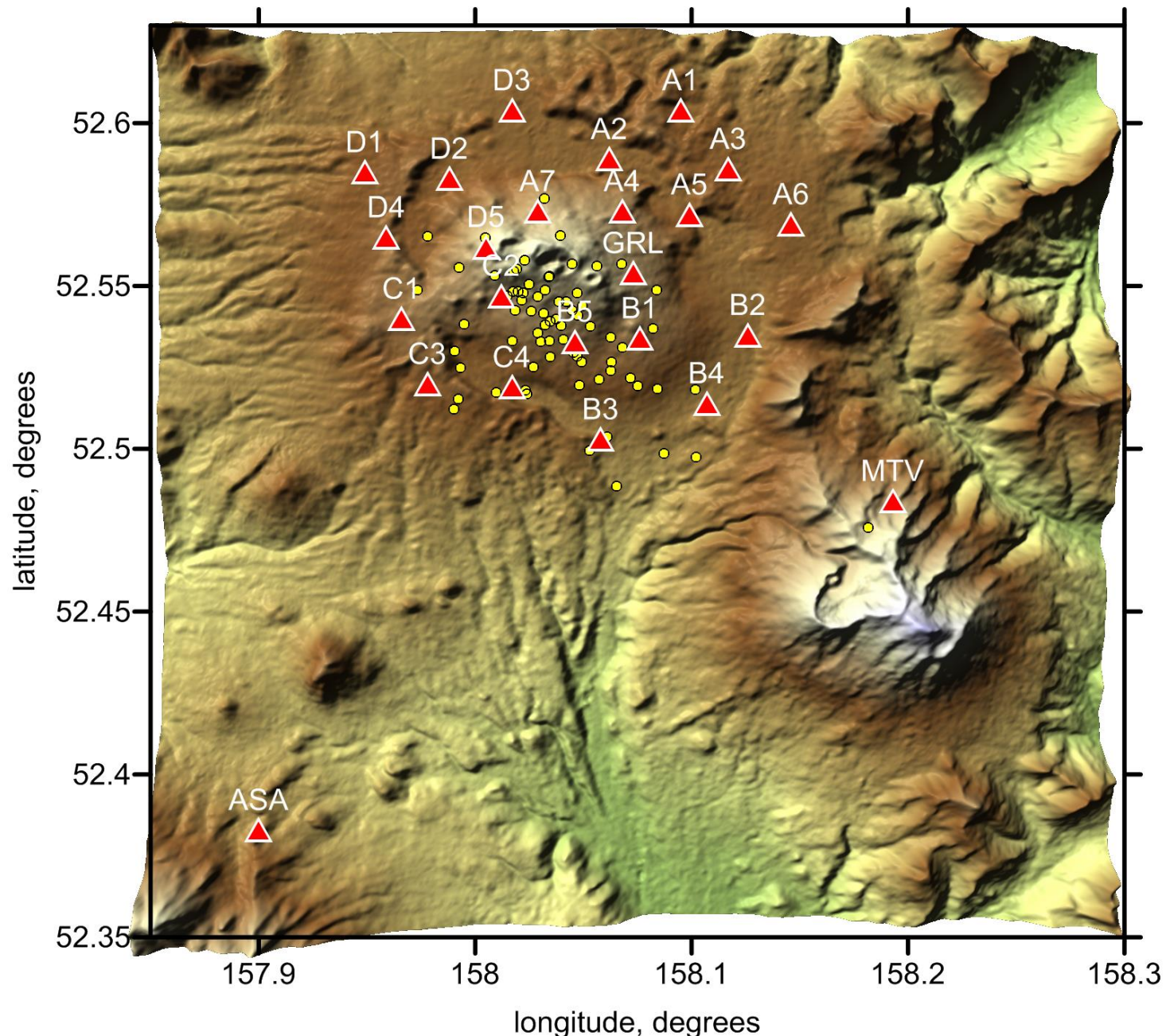
-Простота

Недостаток:

-Не вычисляется псевдообратная матрица

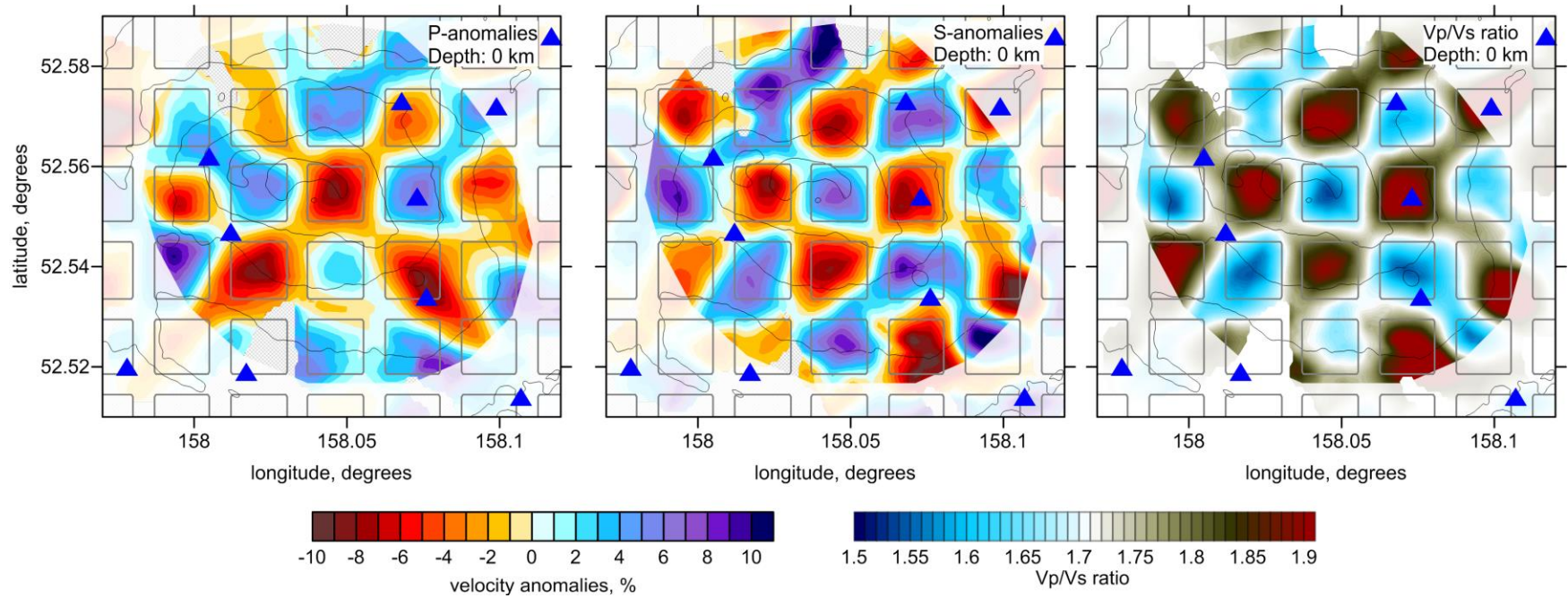
-Невозможно рассчитать матрицу разрешения, которая используется для оценки качества решения

Сейсмическая сеть на вулкане Горелый (08.2013 – 08.2014)

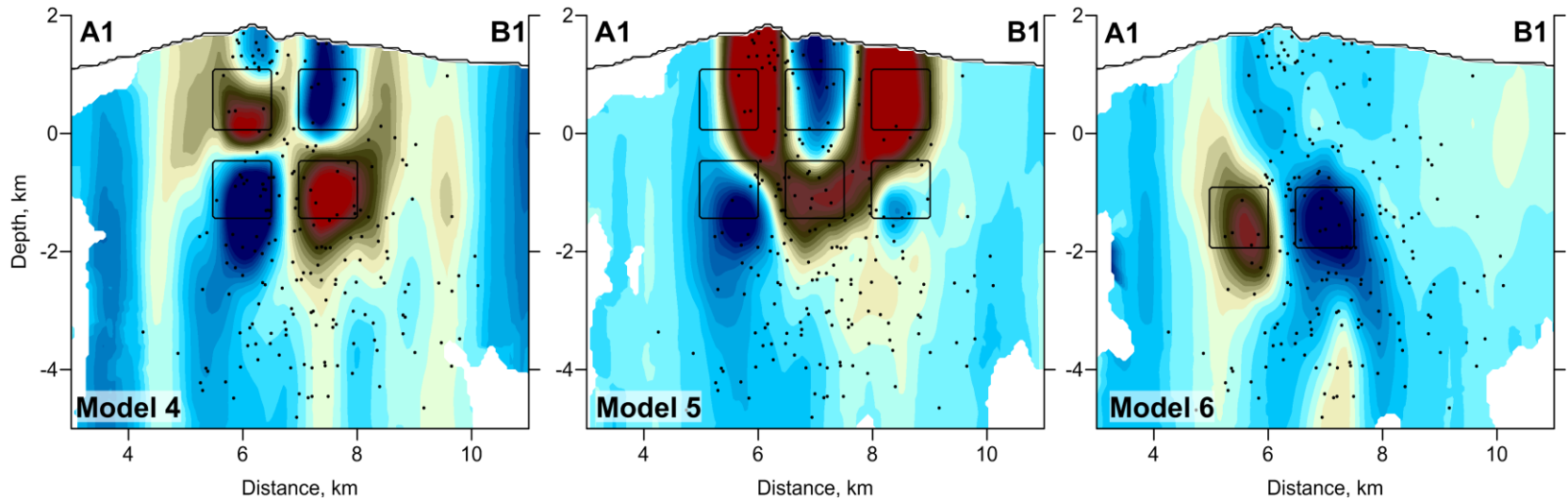


Синтетические тесты:

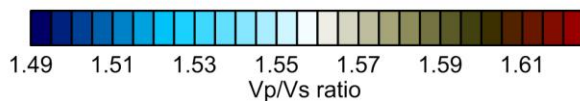
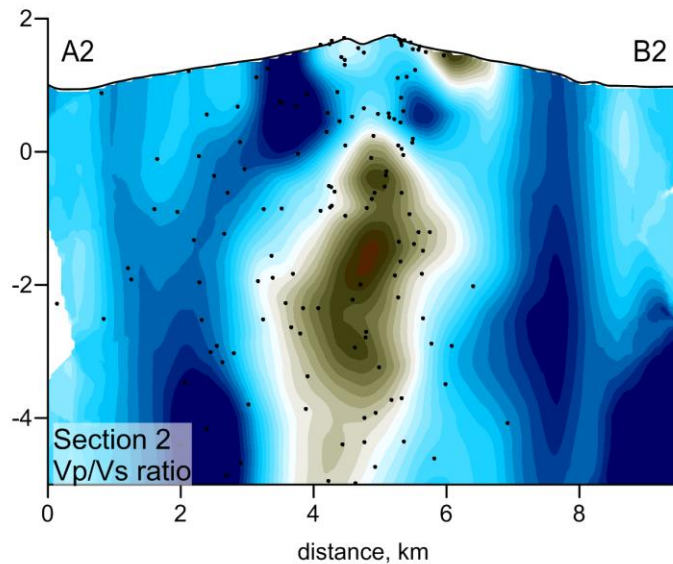
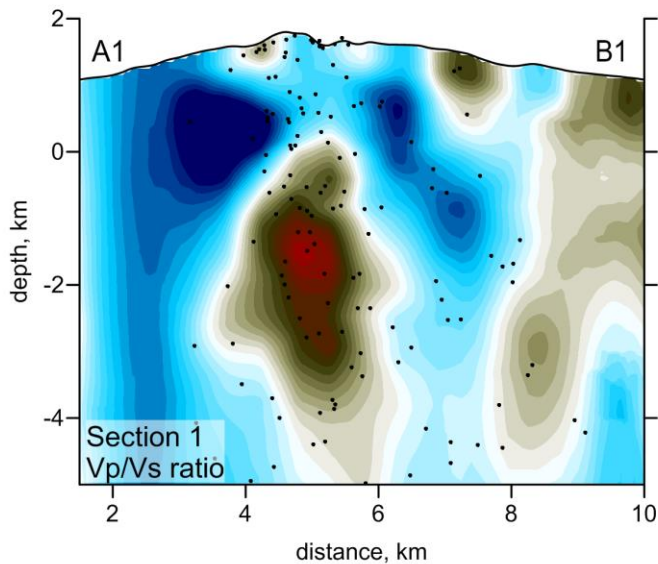
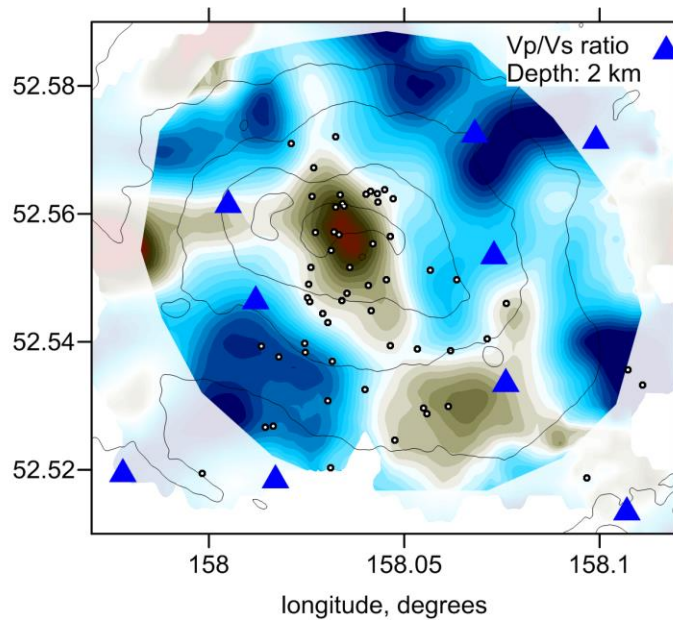
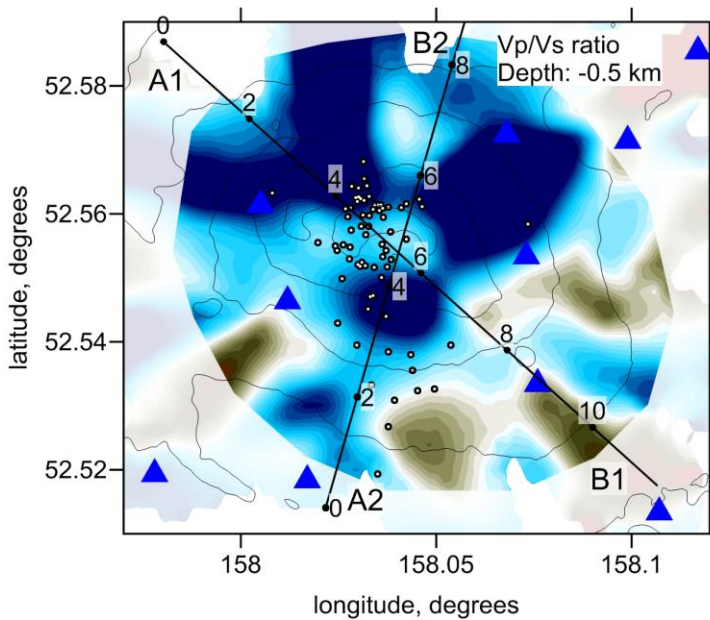
А. Горизонтальная шахматная доска



В. Вертикальные неоднородности



Отношение V_p/V_s
под вулканом
Горелый на
горизонтальных и
вертикальных
сечениях

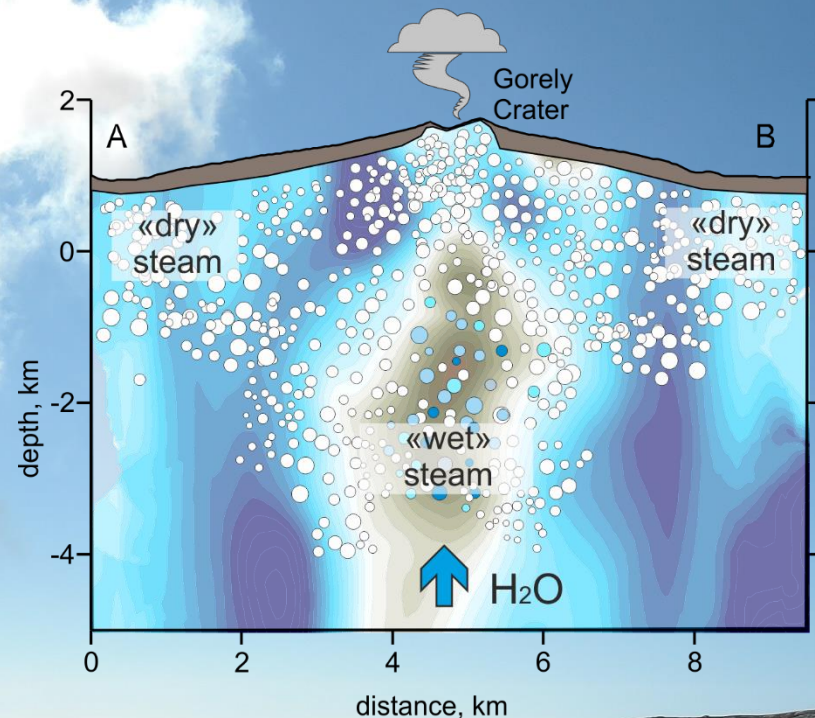


Особенность:
очень низкое
значение V_p/V_s –
свидетельствует
о насыщении
системы газами

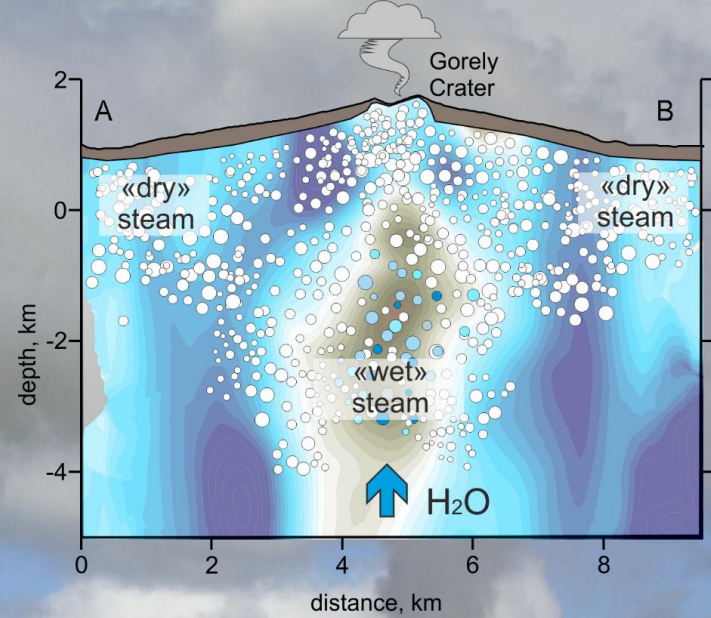
11 000 тонн в
сутки газа
извергается из
вулкана

Вулкан Горелый – огромный паровой котел

«Предохранительный клапан» - фумарола в кратере, которая выбрасывает 11,000 тонн газов в день

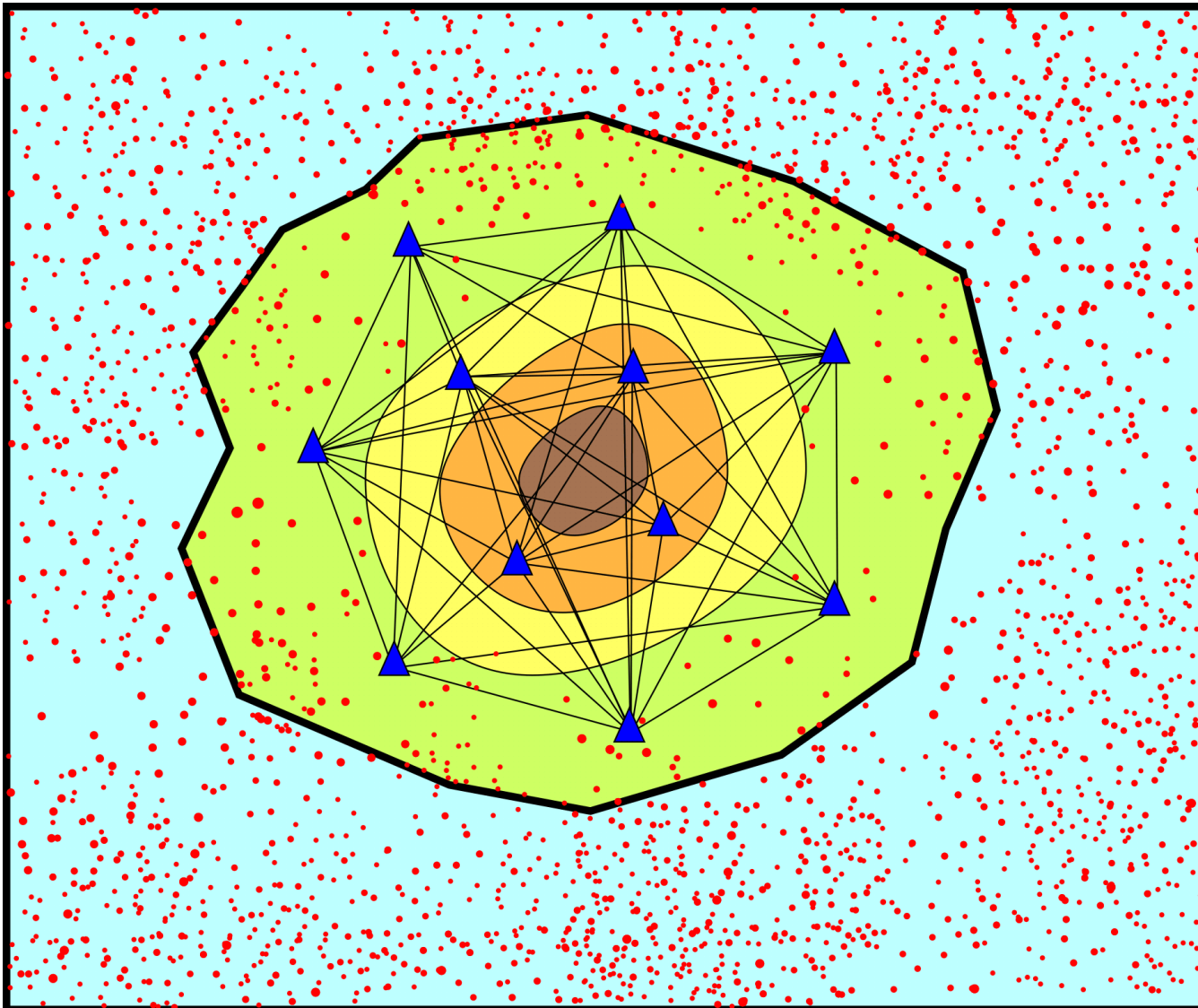


Мутновская
гидротермальная
электростанция
расположена на краю
«парового котла»

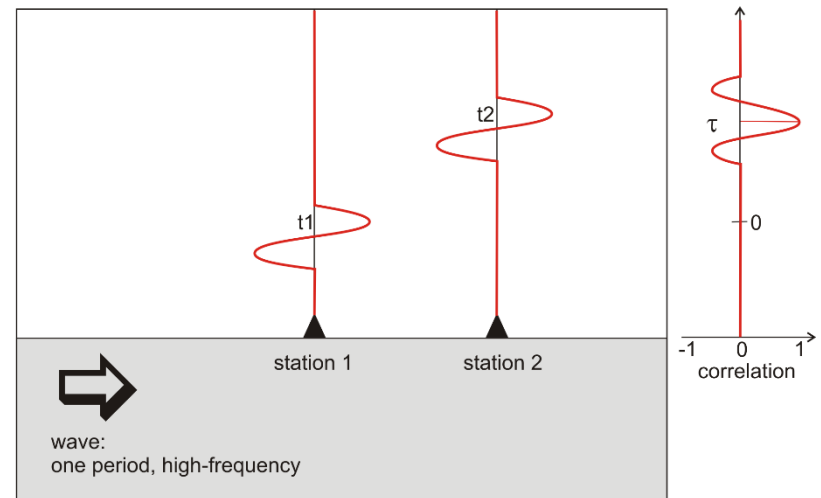
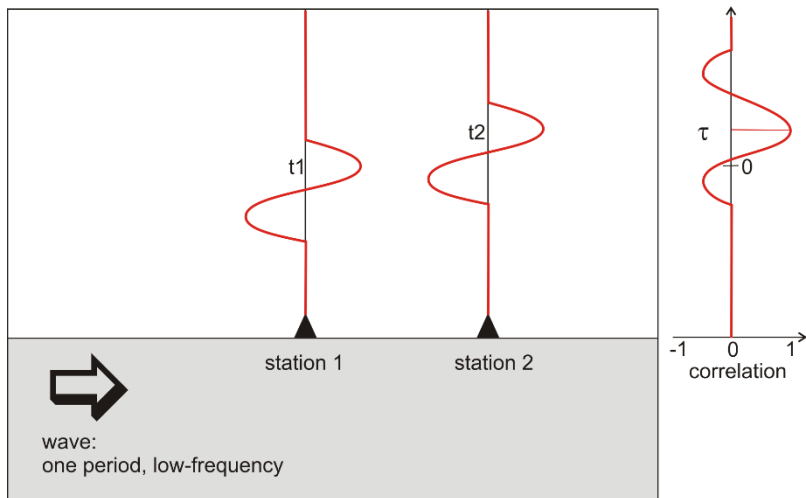
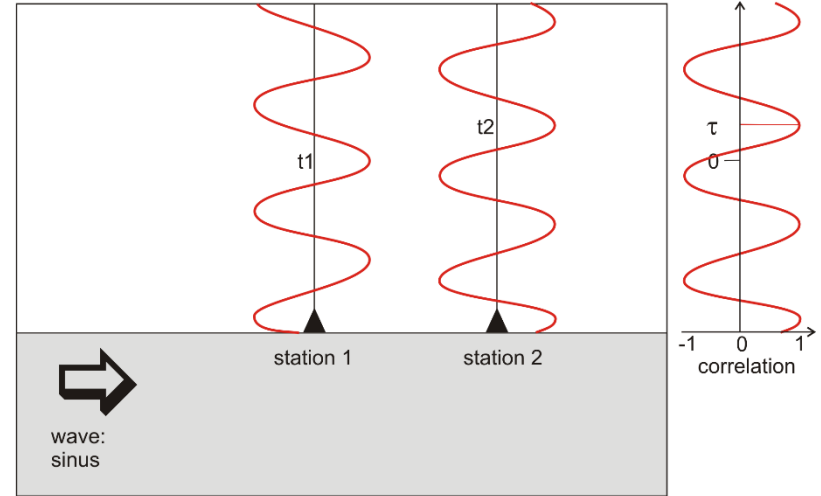
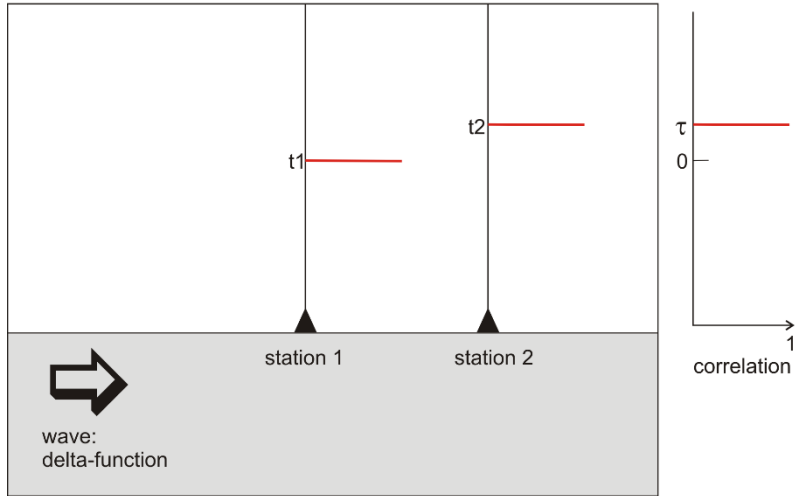


Метод 2: Сейсмическая интерферометрия – выявление поверхностных волн из кросс-корреляции сейсмического шума

B. Scheme for ambient noise tomography

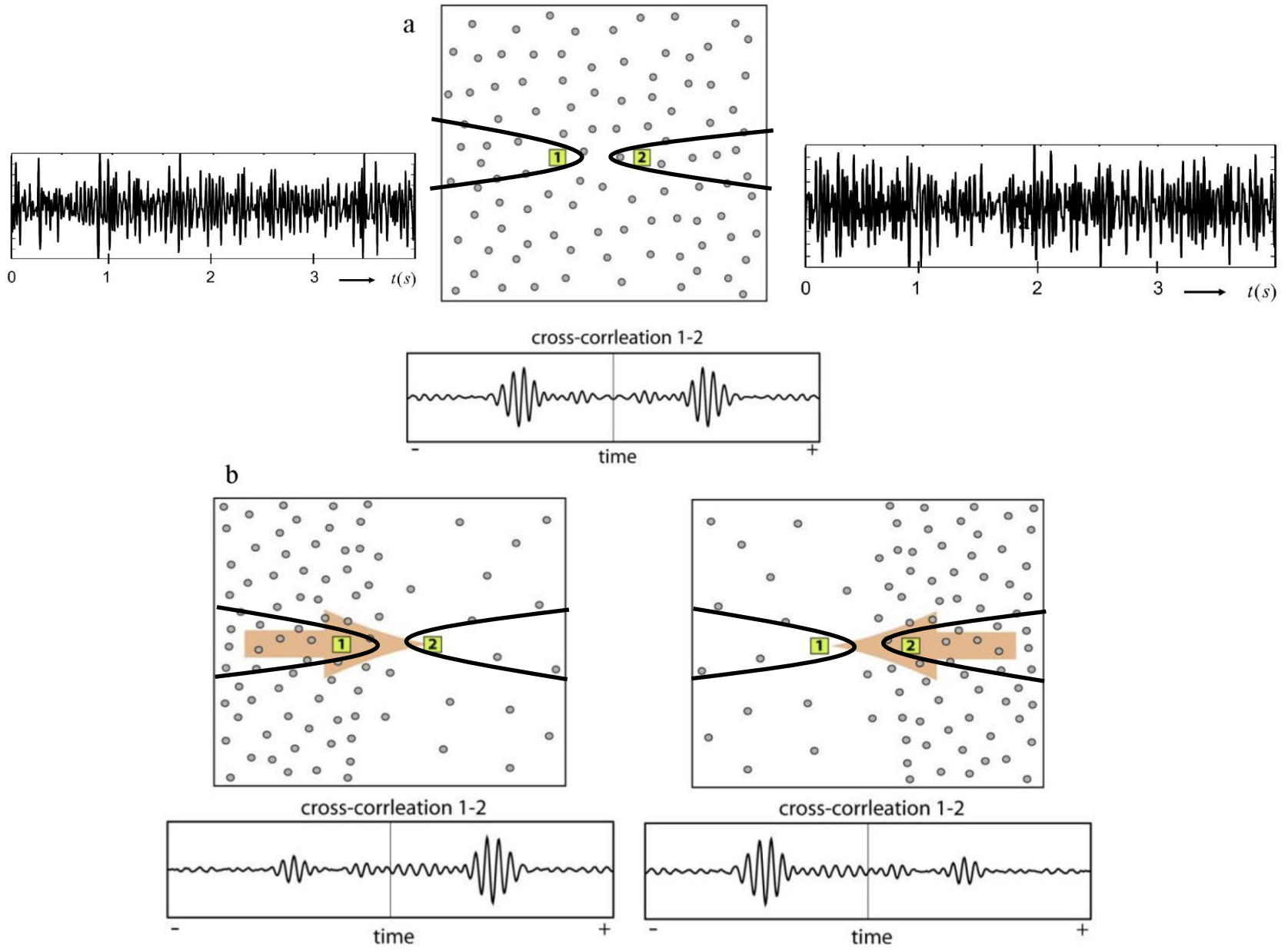


Метод 2: Сейсмическая интерферометрия – выявление поверхностных волн из кросс-корреляции сейсмического шума

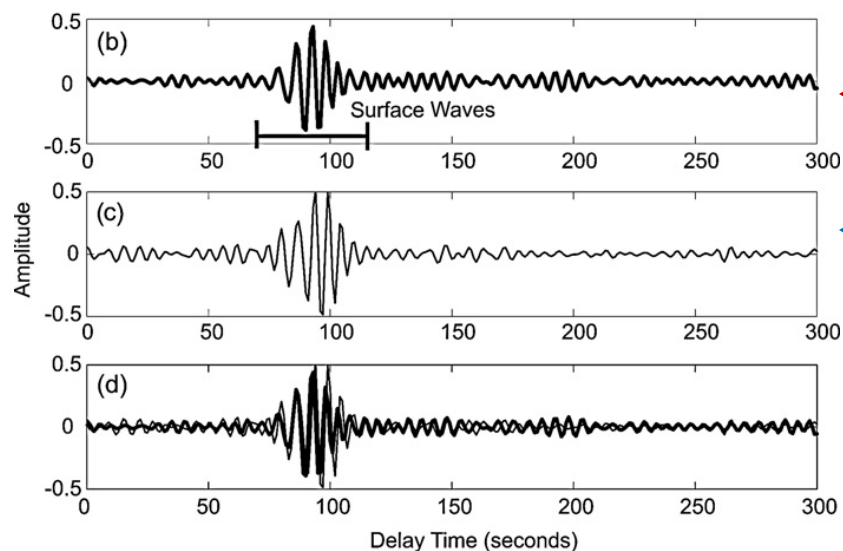
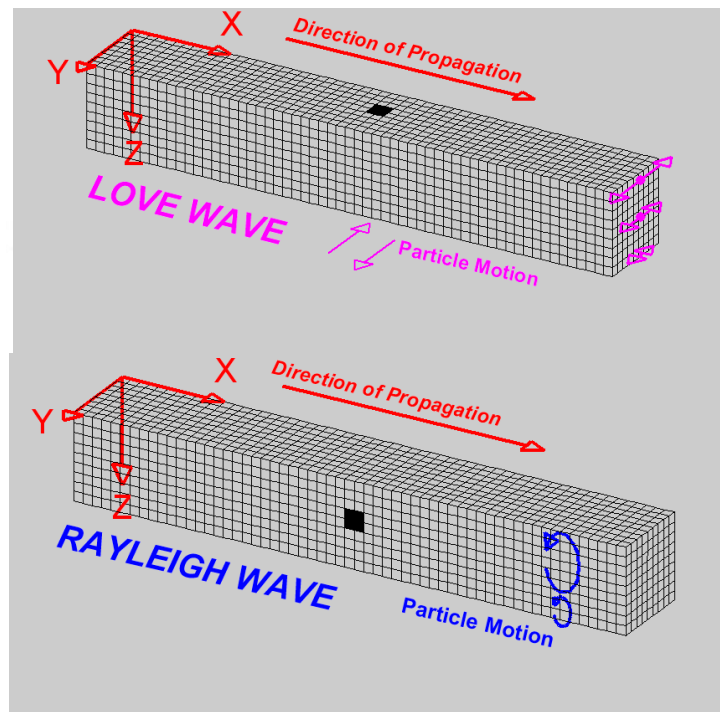
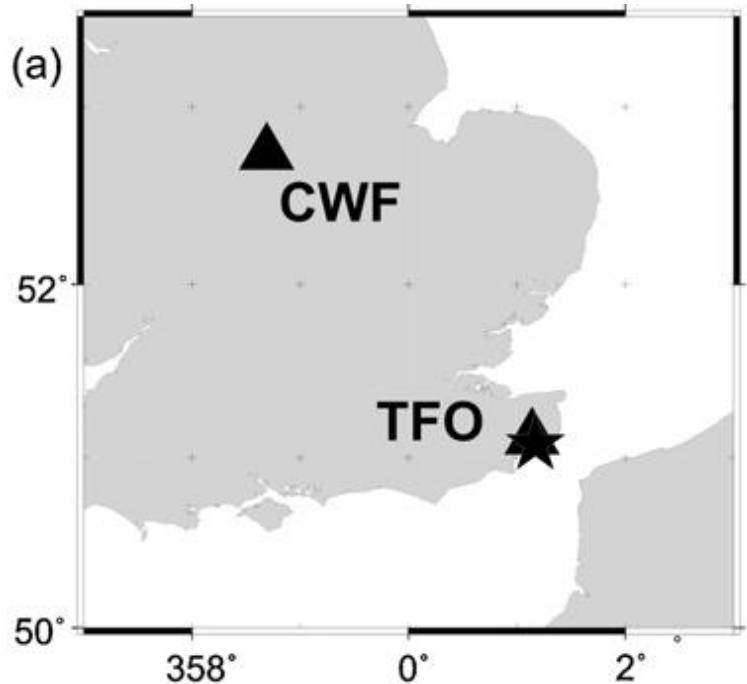


Результат корреляции обладает схожими свойствами, что и общий сигнал

Метод 2: Сейсмическая интерферометрия – выявление поверхностных волн из кросс-корреляции сейсмического шума



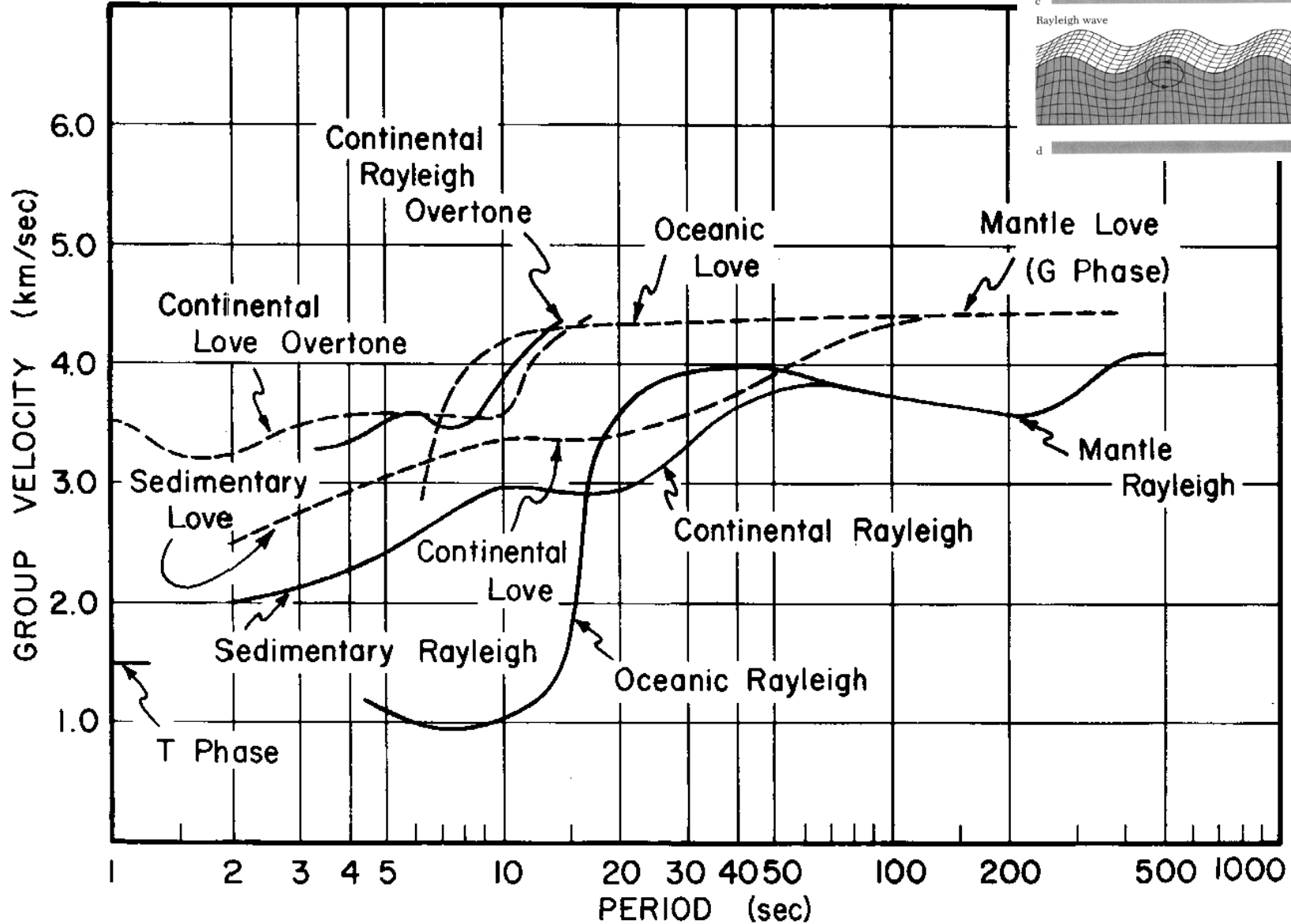
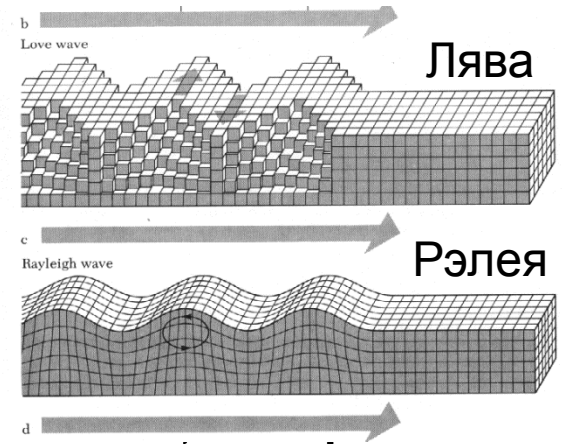
В результате корреляции выявляется поверхностная волна Рэлея или Лява (в зависимости от поляризации сигнала)



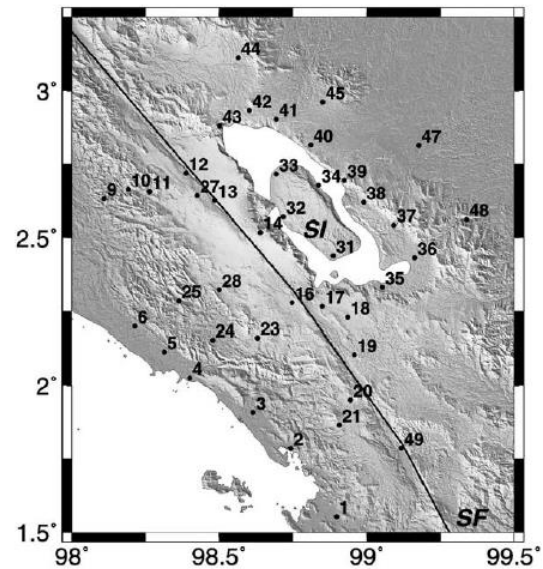
← Функции Грина из кросс-корреляции шума для пары станций

← и поверхностная волна от источника, совпадающего с одной из станций

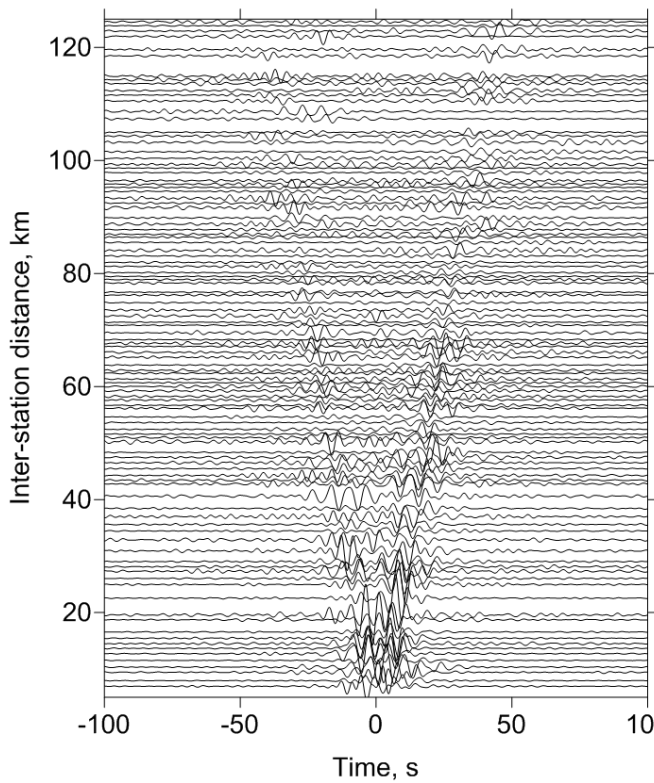
Дисперсия поверхностных волн



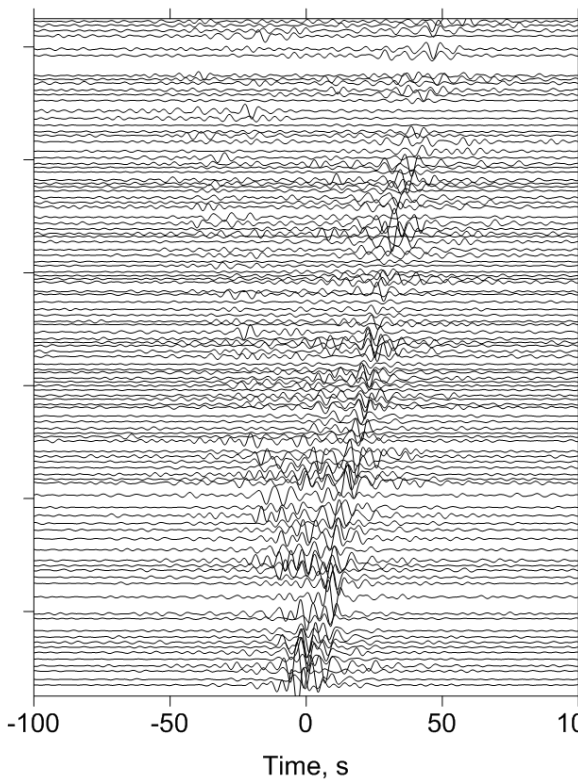
Функции Грина как функция расстояния между станциями для ст. 2, фильтрованные полосовым фильтром с центральным периодом 4 с



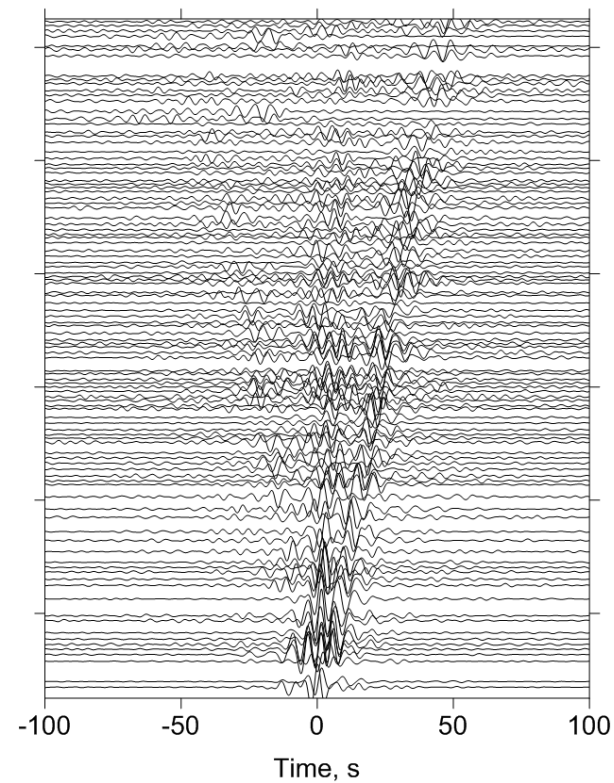
Cross-correlation of transverse components (T-T)
Period: 4s



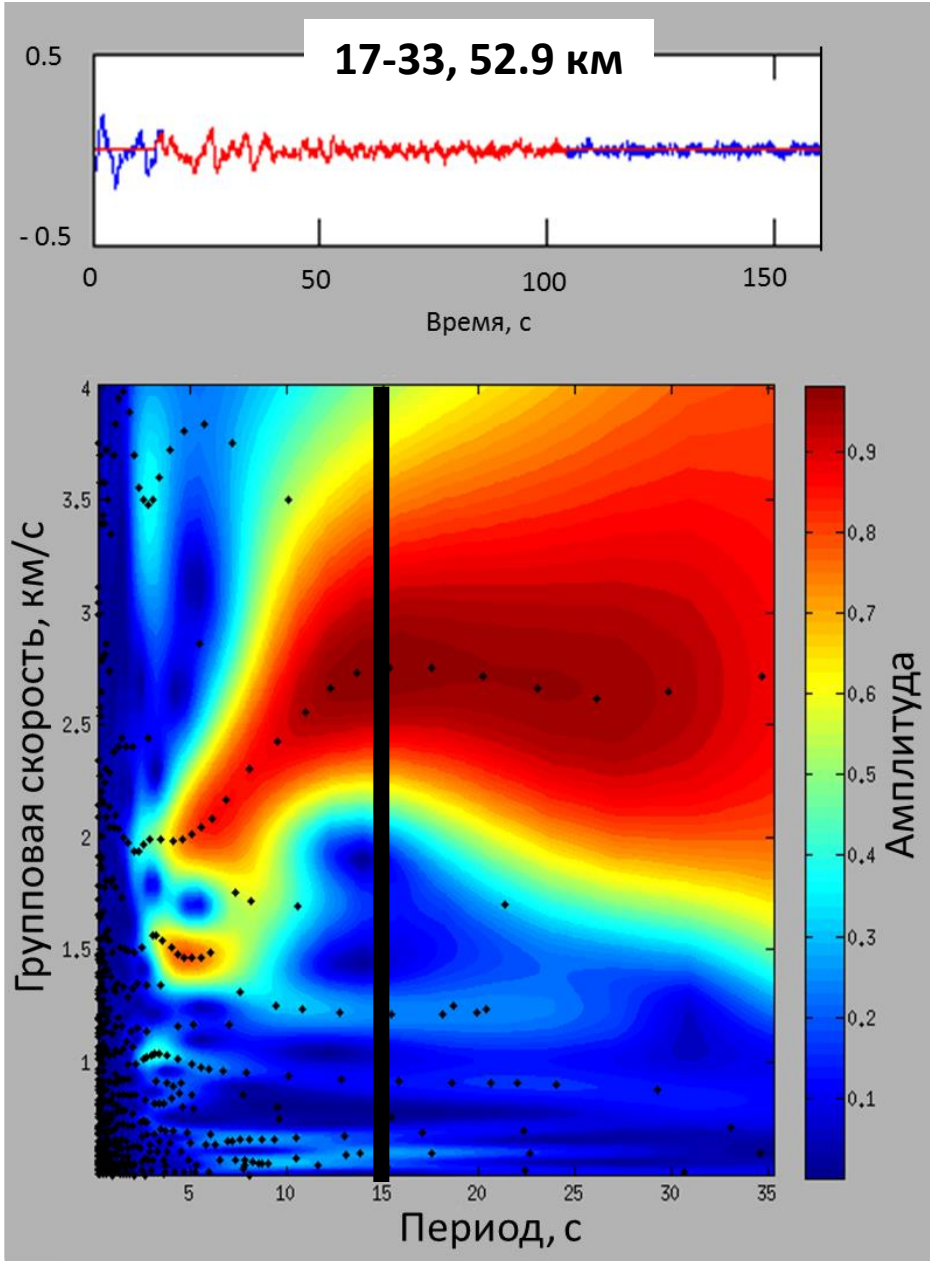
Cross-correlation of radial components (R-R)
Period: 4s



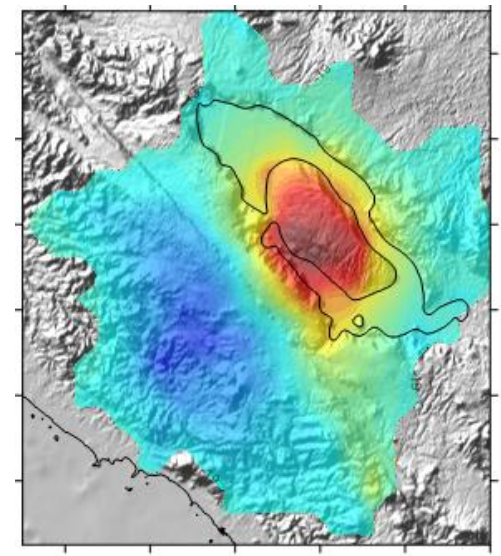
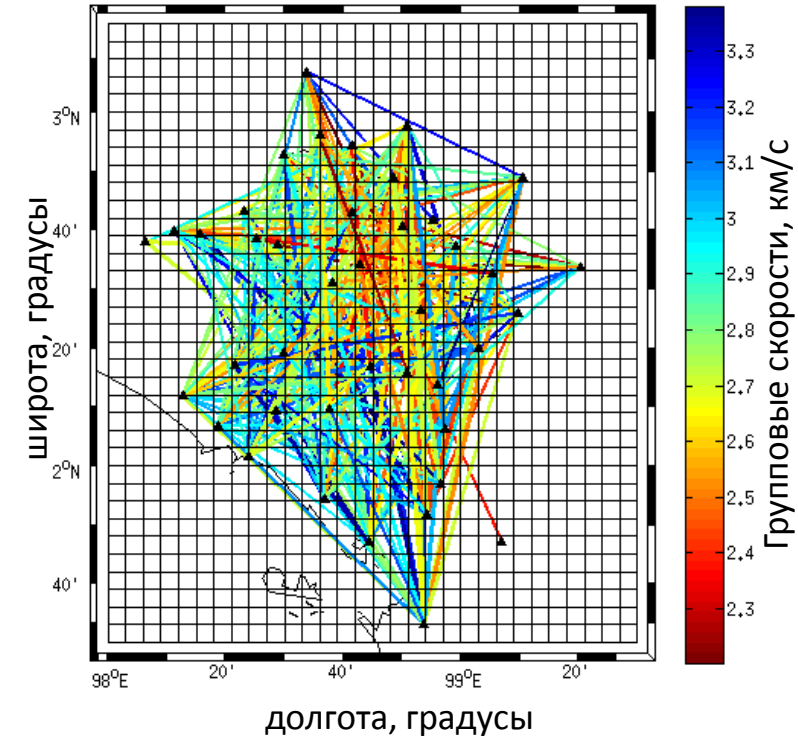
Cross-correlation of vertical components (Z-Z)
Period: 4s



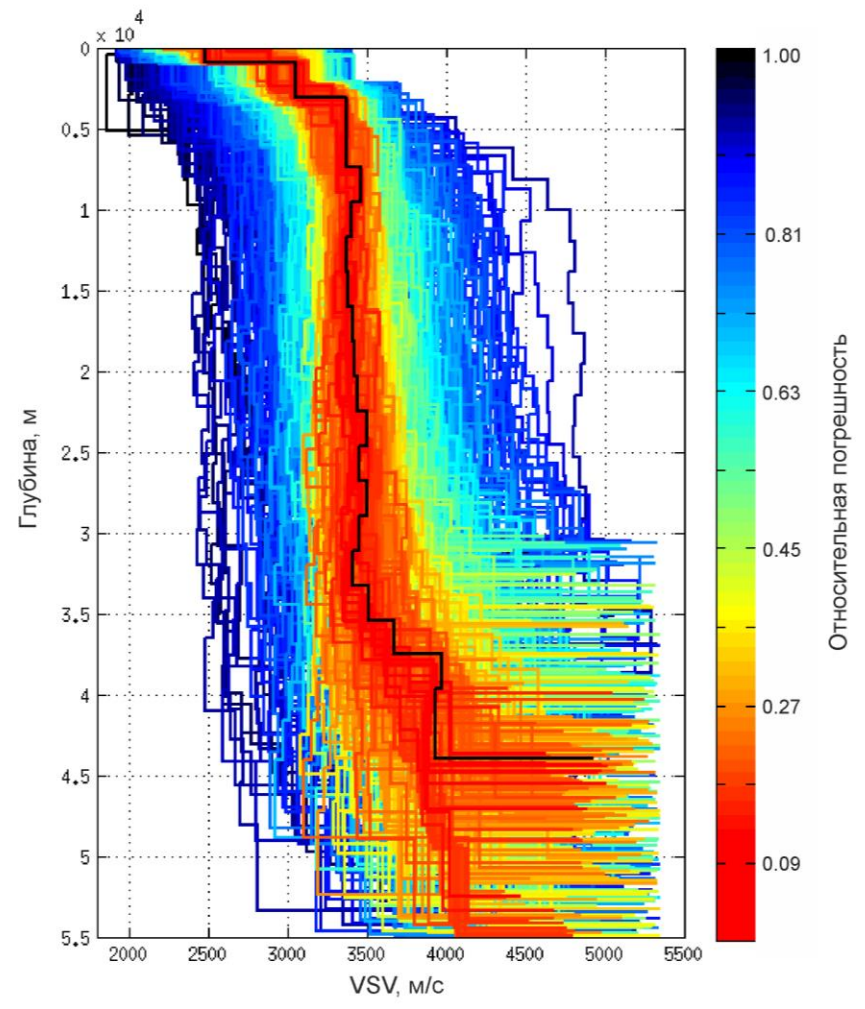
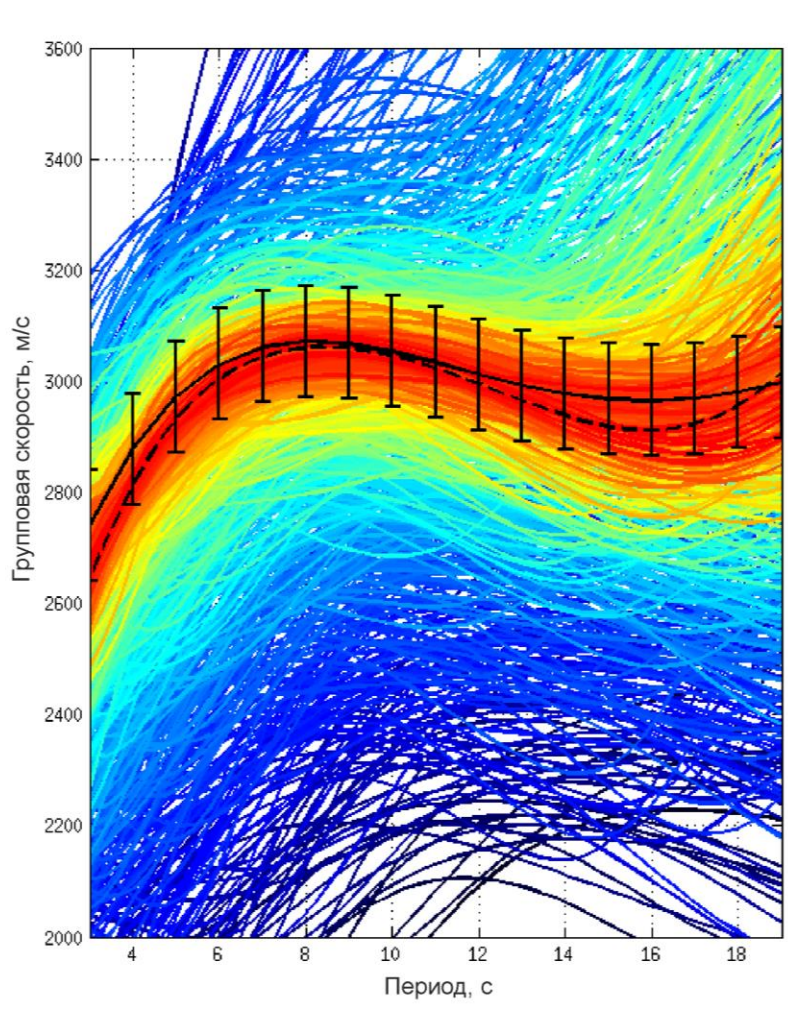
Дисперсионная кривая



15 с



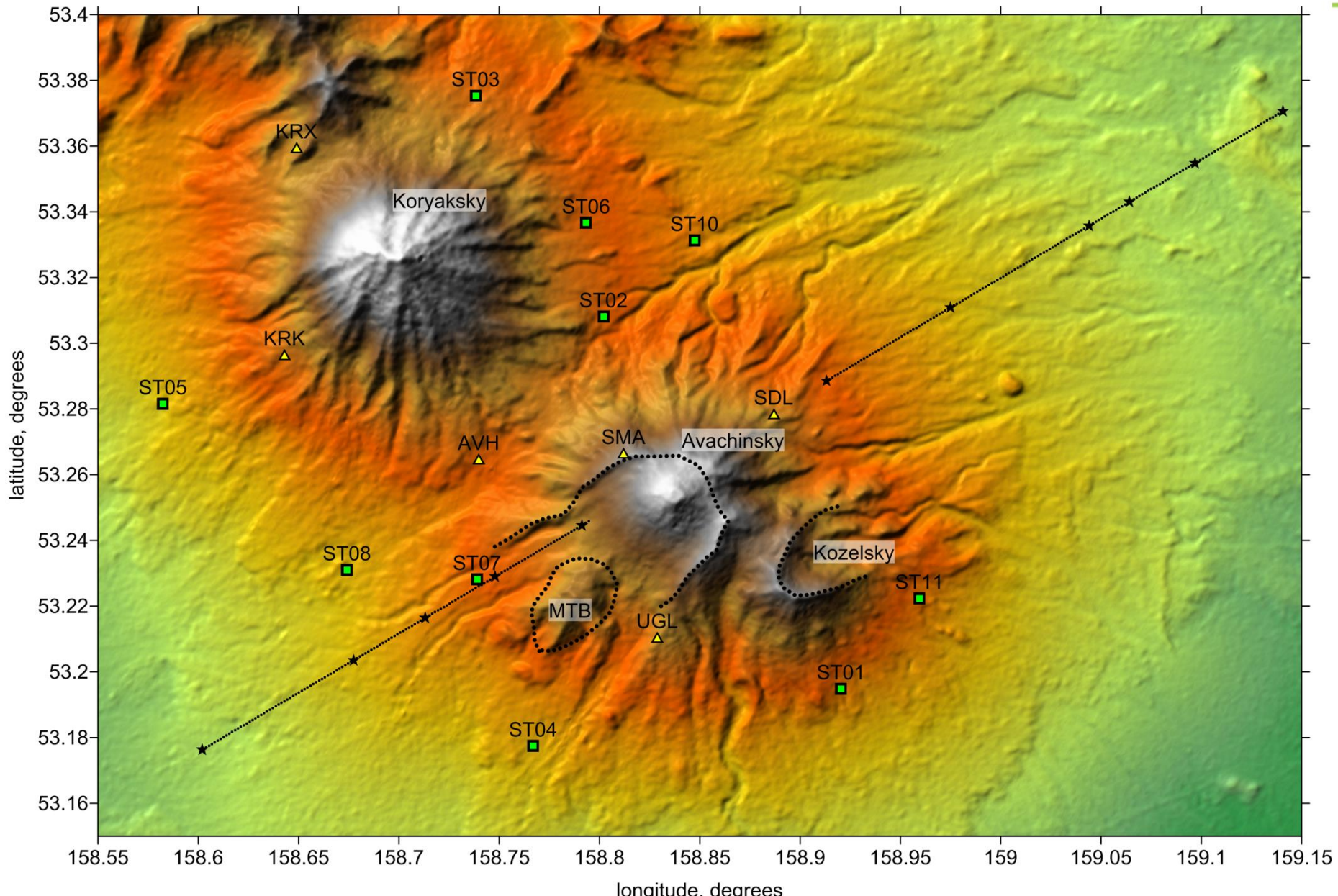
Поиск одномерной модели для точки XY методом Монте-Карло



Волны Рэля

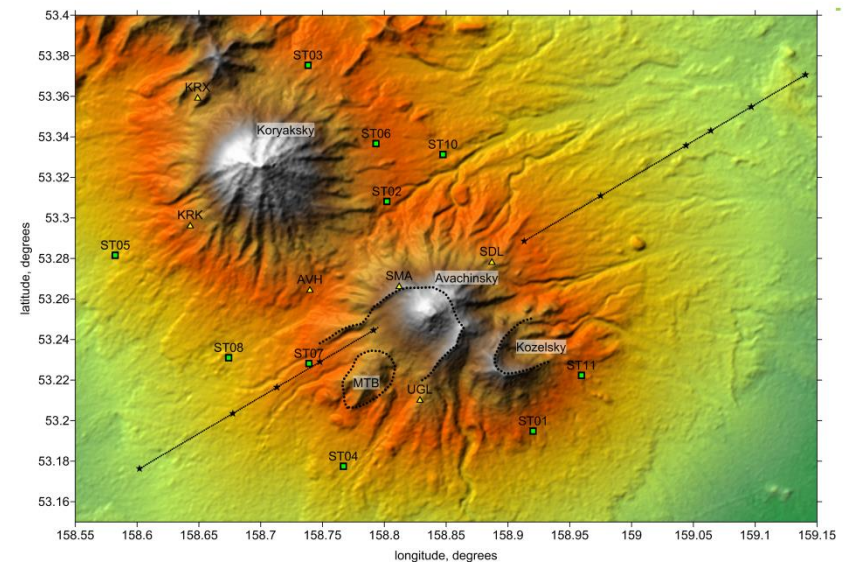
$1500\text{m/s} < V_{s1} < 3000\text{m/s}$, $100\text{m} < D1 < 1000\text{m}$,
 $3800\text{m/s} < V_{s2} < 4300\text{m/s}$, $29000\text{m} < D2 < 40000\text{m}$

Авачинская группа вулканов (Сентябрь 2012 – лето 2013)

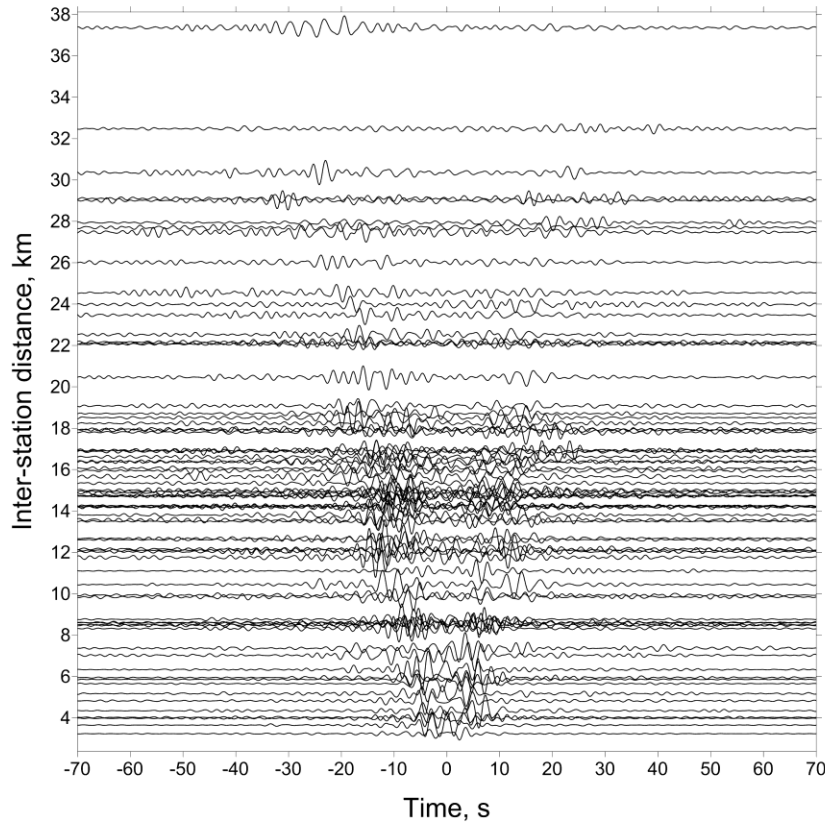




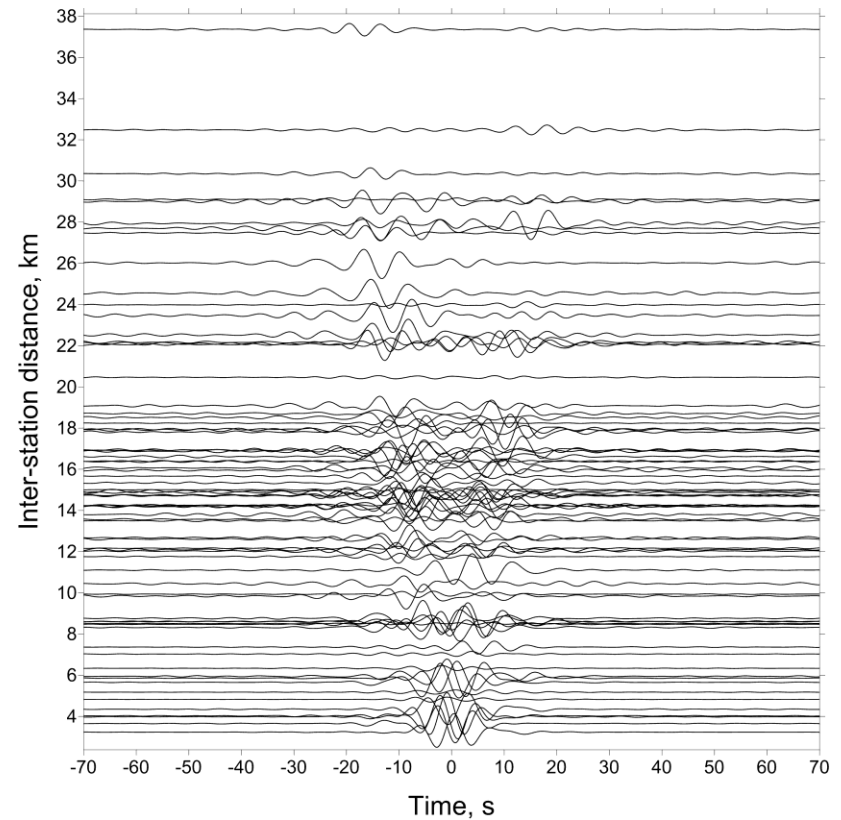
Пример кросс-корреляции сейсмического шума на станциях Авачинской сети



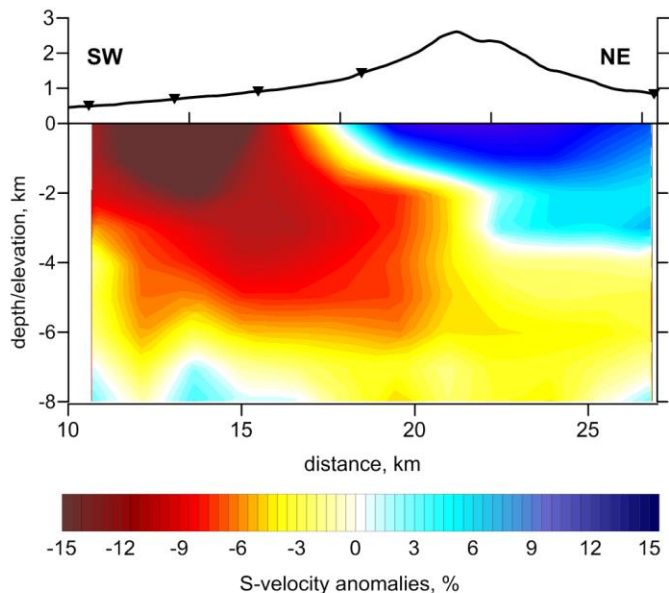
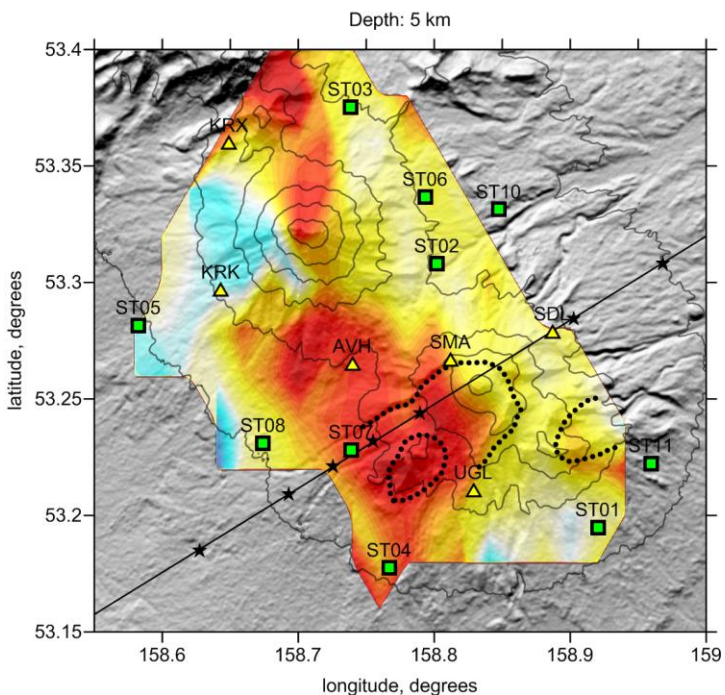
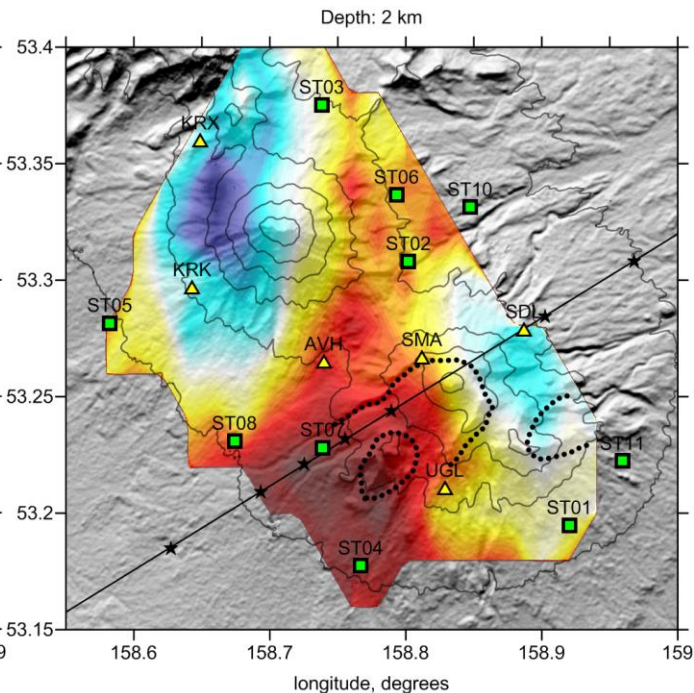
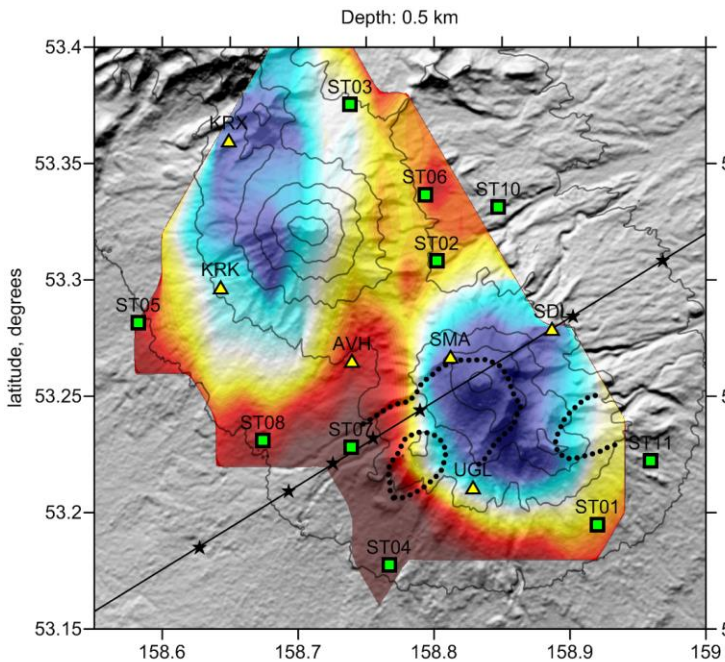
Cross-correlation results for all stations, period: 2 s



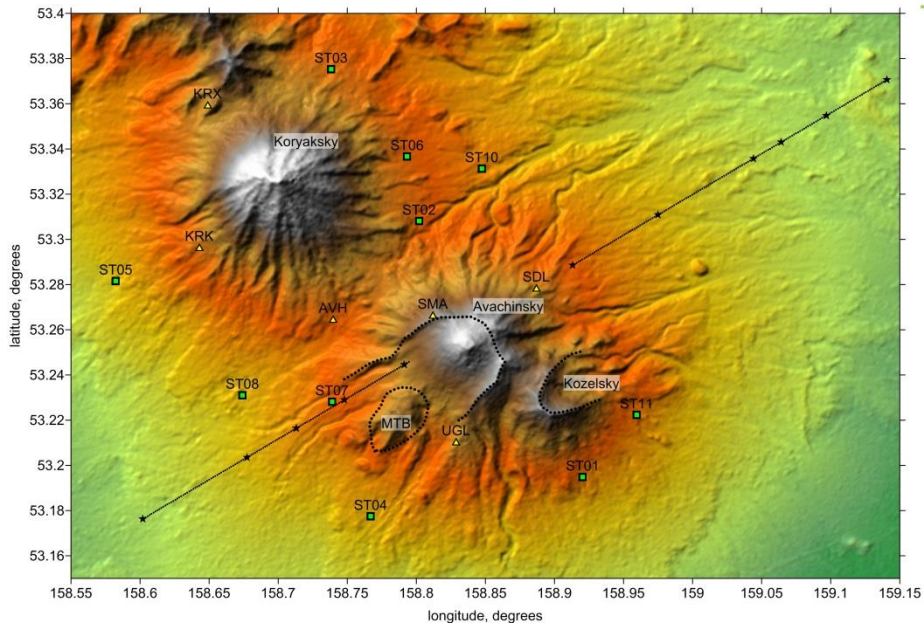
Cross-correlation results for all stations, period: 6 s



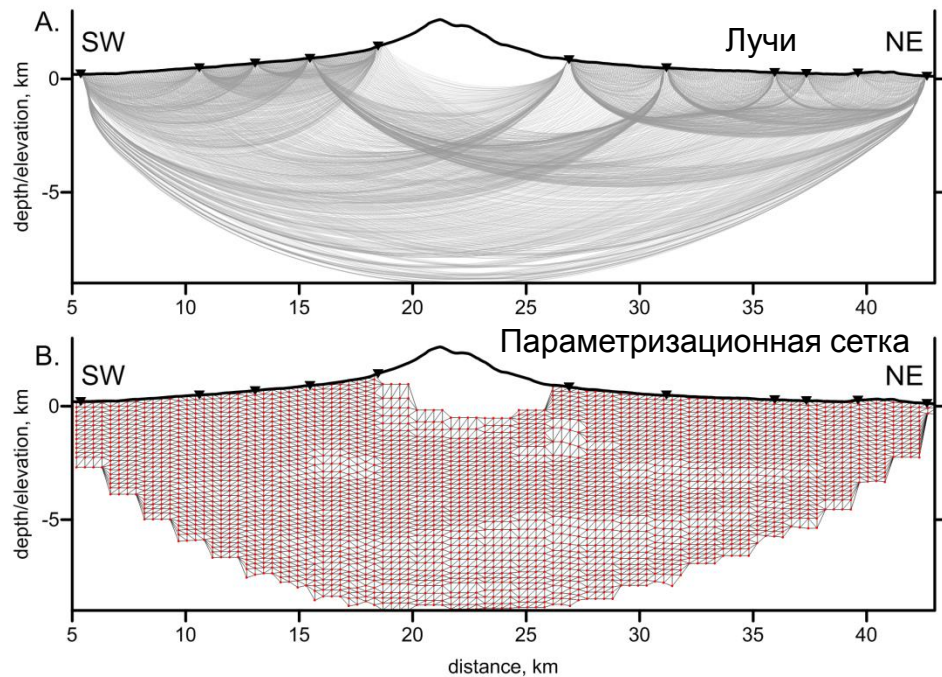
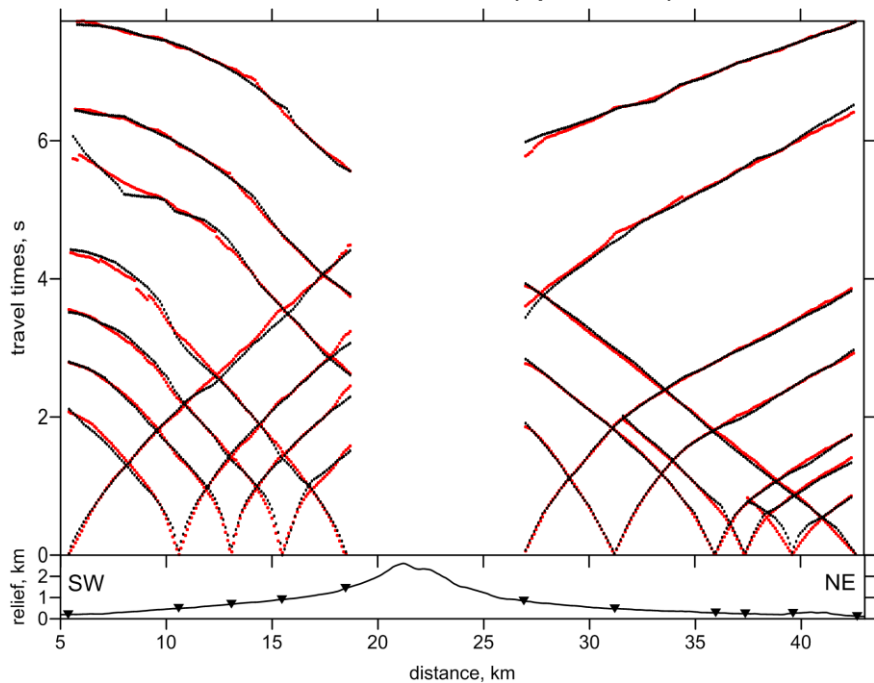
Результат томографической инферсии методом шумовой томографии



Аномалии скорости S-волн на горизонтальных и вертикальном сечении



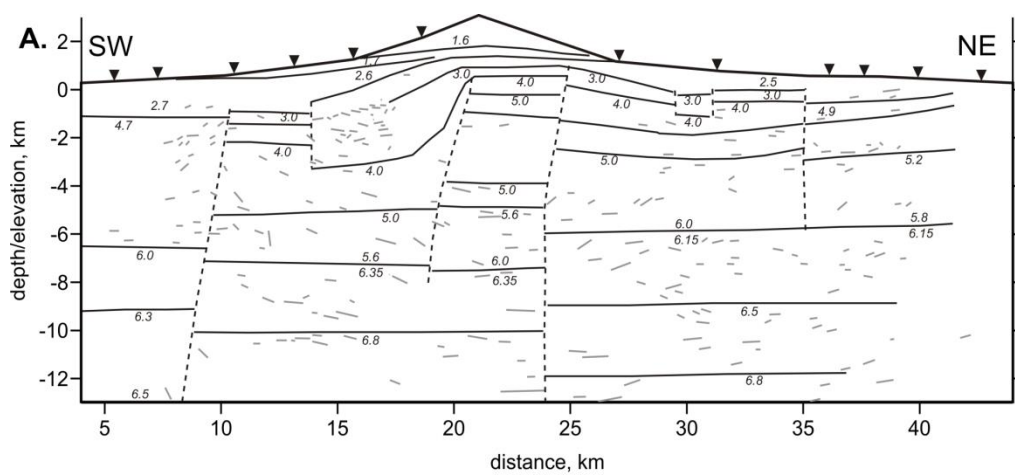
Времена: наблюдаемые (черные)
и модельные (красные)



**Метод 3: Инверсия сейсмических
данных с активными источниками**

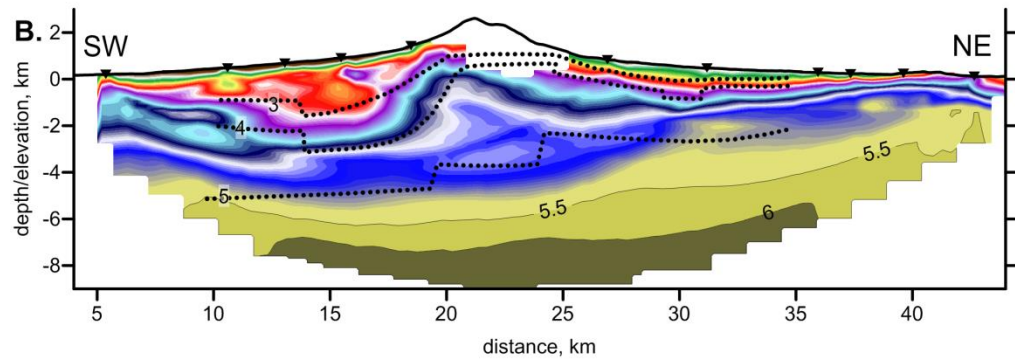
Алгоритм PROFIT (Koulakov et al., 2010)

Пример обработки архивных данных
по профилю ГСЗ через Авачинский
вулкан (80-е годы)

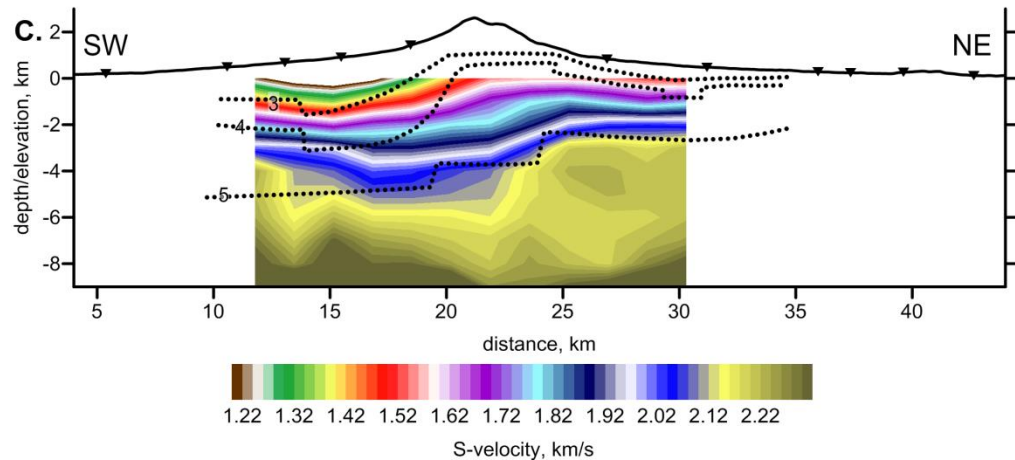


Сравнение сейсмических моделей под Авачинским вулканом, полученные по различным данным и различными методами:

А. Балеста и др. (1988) прямое моделирование данных ГСЗ

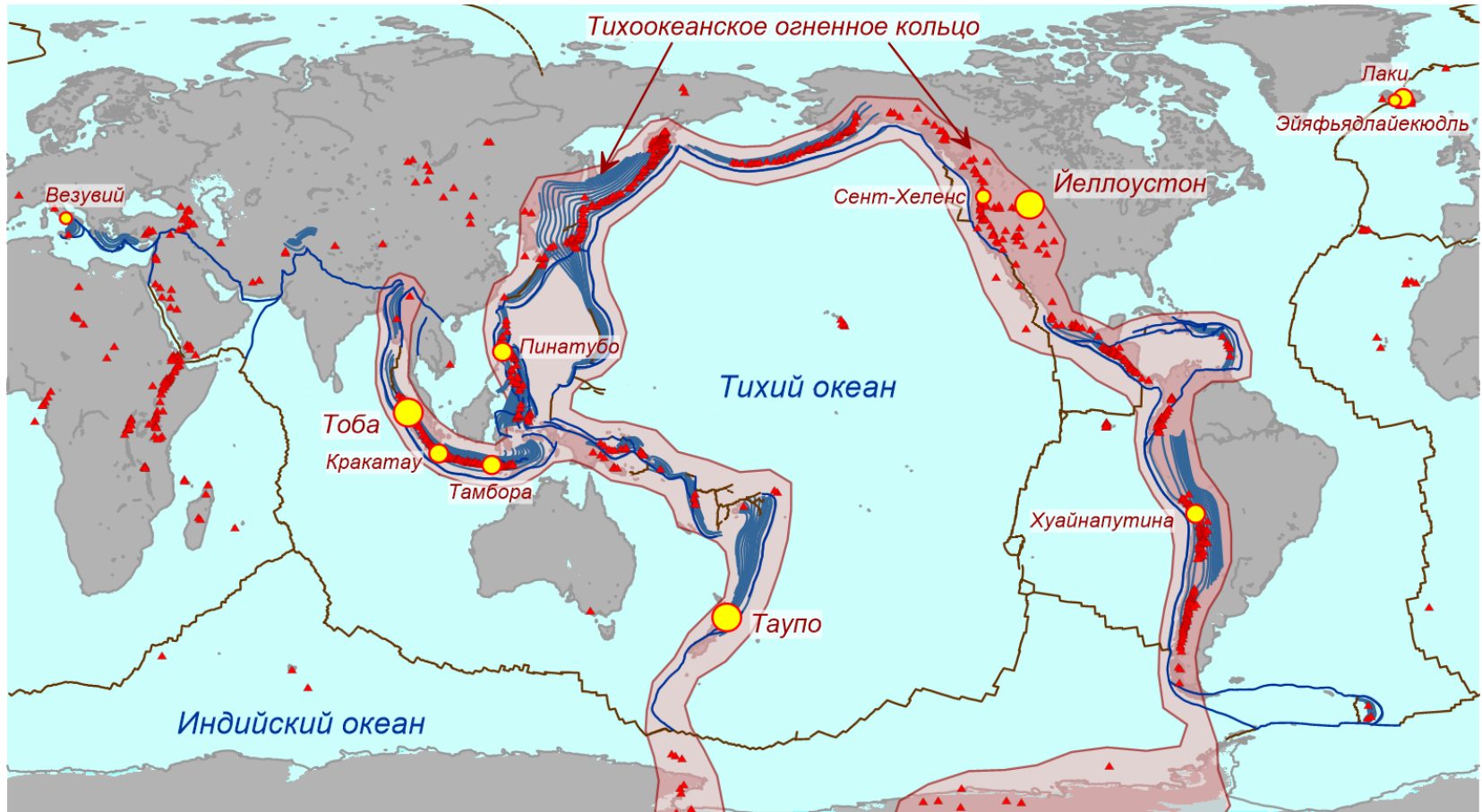


В. Томографическая инверсия активных профильных данных



С. Сечение с абсолютными S скоростями по результатам шумовой томографии

Некоторые известные извержения вулканов



Знаменитые вулканы:

(указана дата и объем в куб. км выброшенного вещества):



Супервулканы

более 1000 куб. км
в твердом эквиваленте



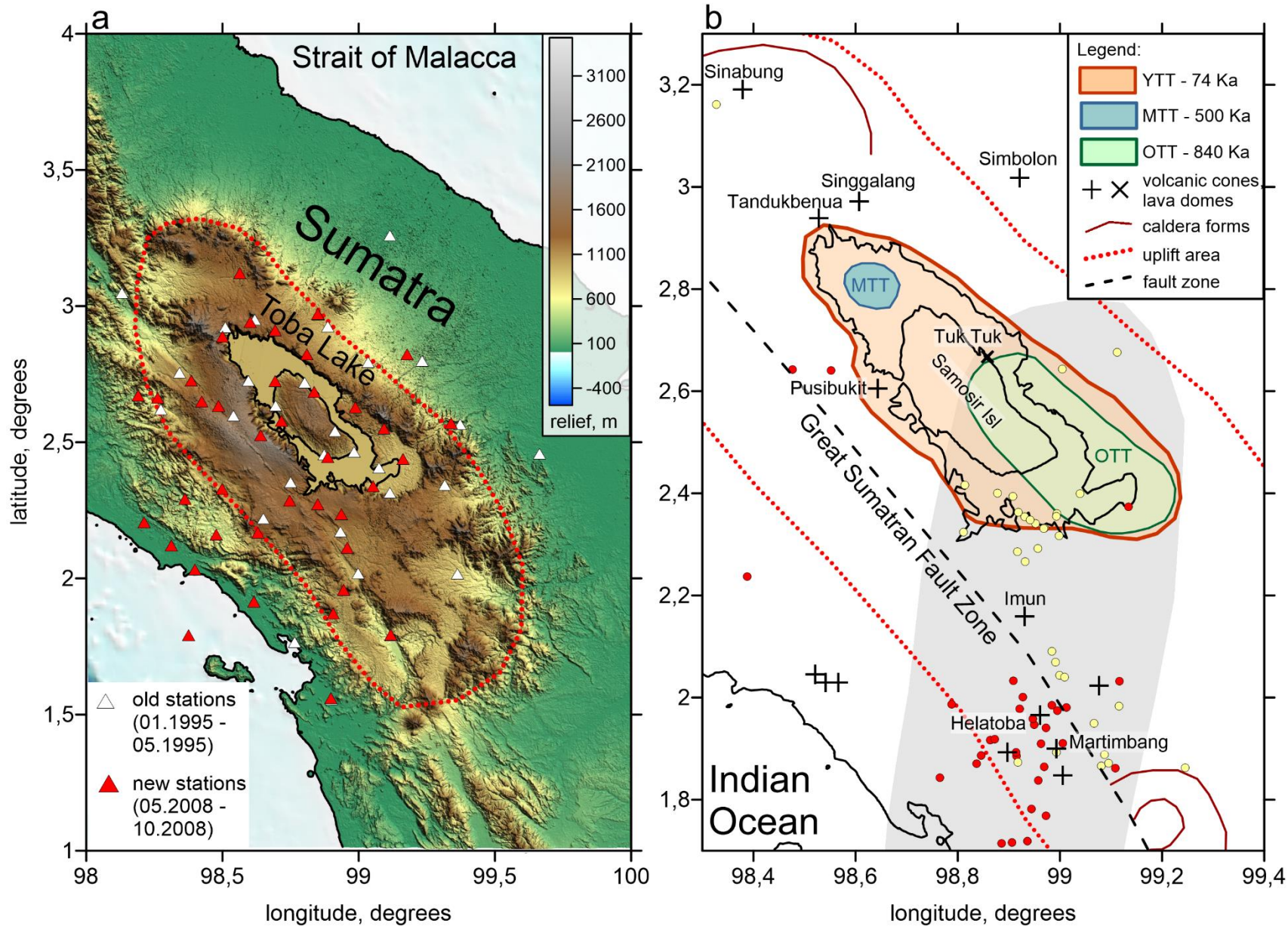
Причины суперизвержений в районе кальдеры Тоба на Суматре



Koulakov et al., 2016, Nature Comm.
Jaxybulatov et al., 2014, Science

Крупнейшее извержение на Земле за последние несколько млн лет

Суперизвержение произошло 73,500 лет назад; выброшено более 2800 км³

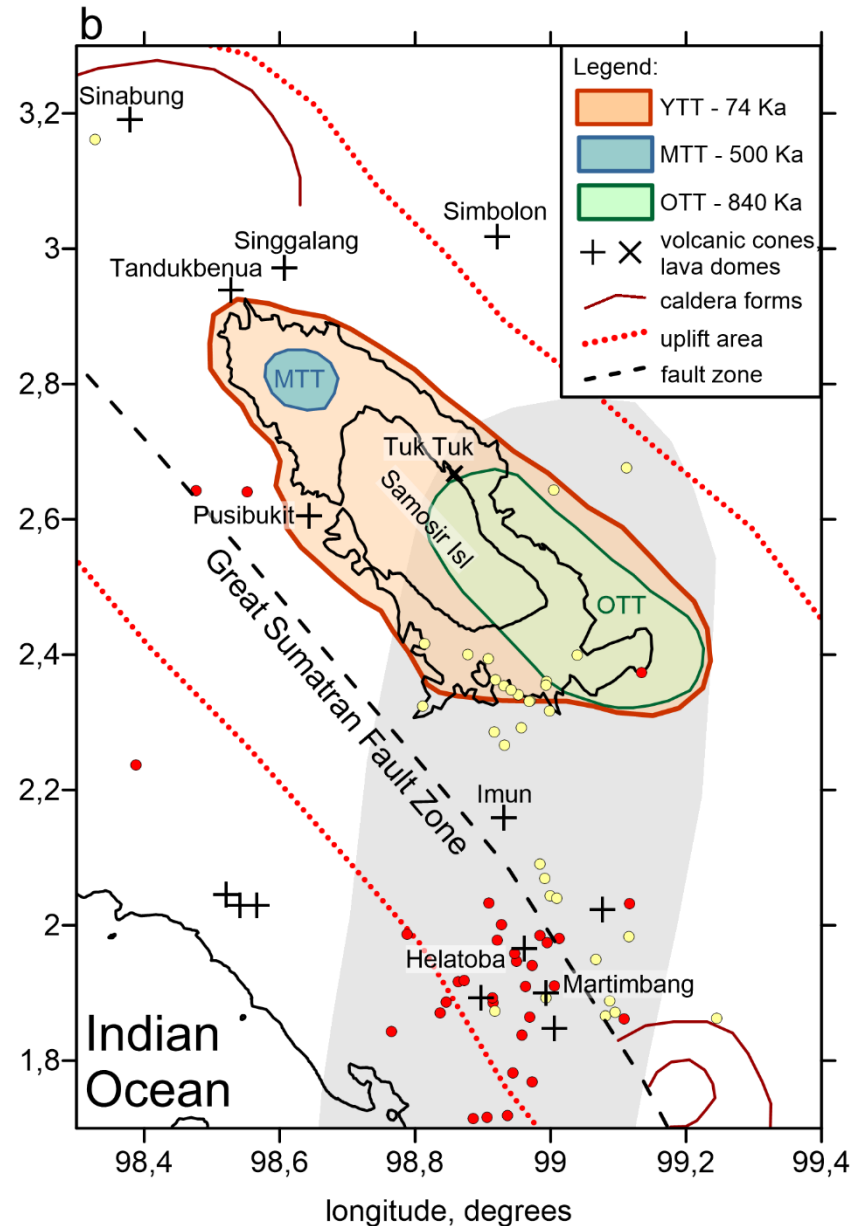


Крупнейшее извержение на Земле за последние несколько млн лет

Суперизвержение произошло 73,500 лет назад; выброшено более 2800 км³

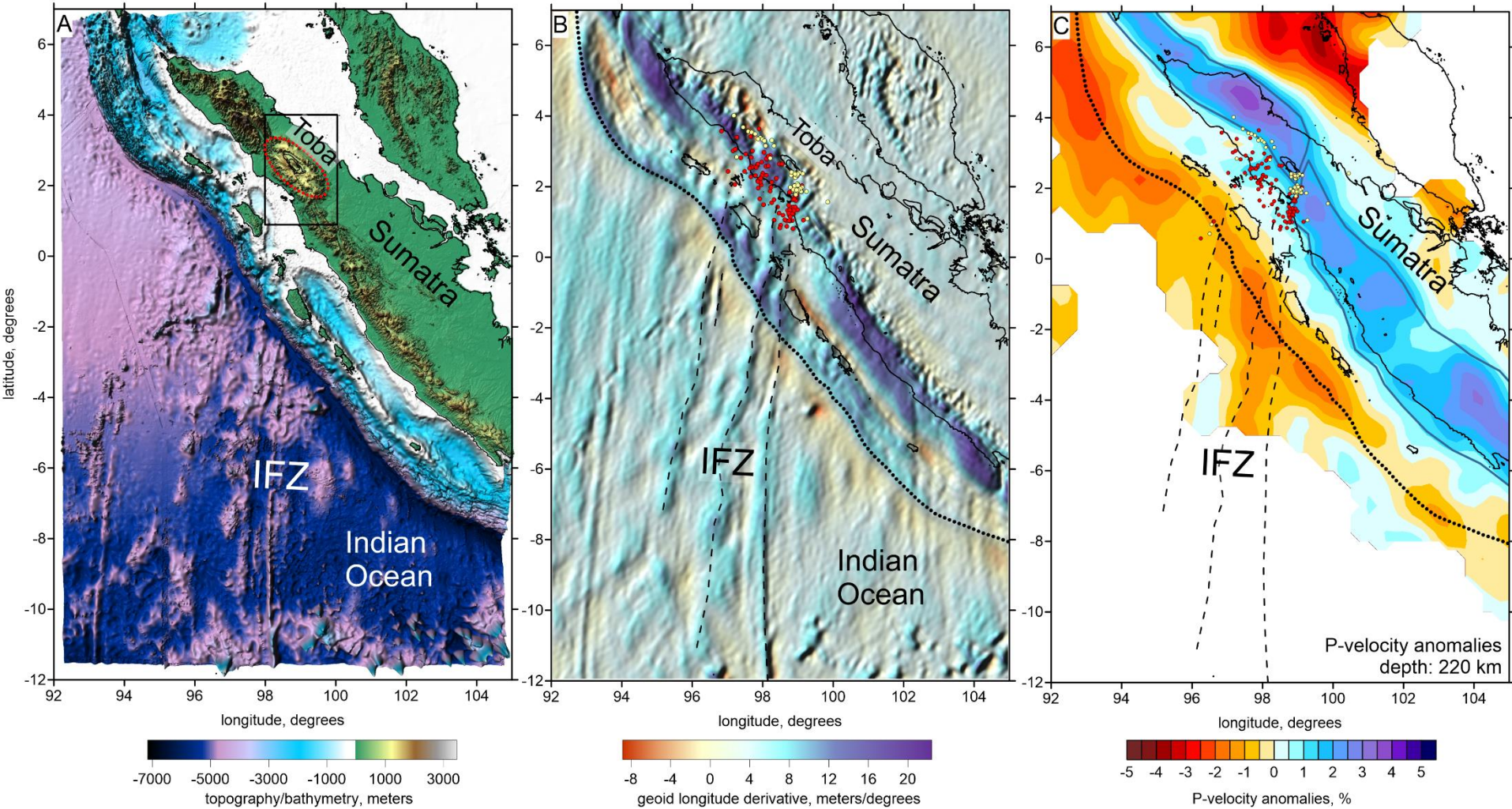
Ключевые вопросы:

1. Почему крупные извержения происходят в одном месте?
2. Почему сильные извержения перемежаются периодами относительного спокойствия.
3. Активен ли сейчас магматический источник, и возможно ли новое суперизвержение в ближайшее время?



Investigator Fracture Zone(IFZ)

- основная причина повторяющегося супервулканизма в кальдере Тоба



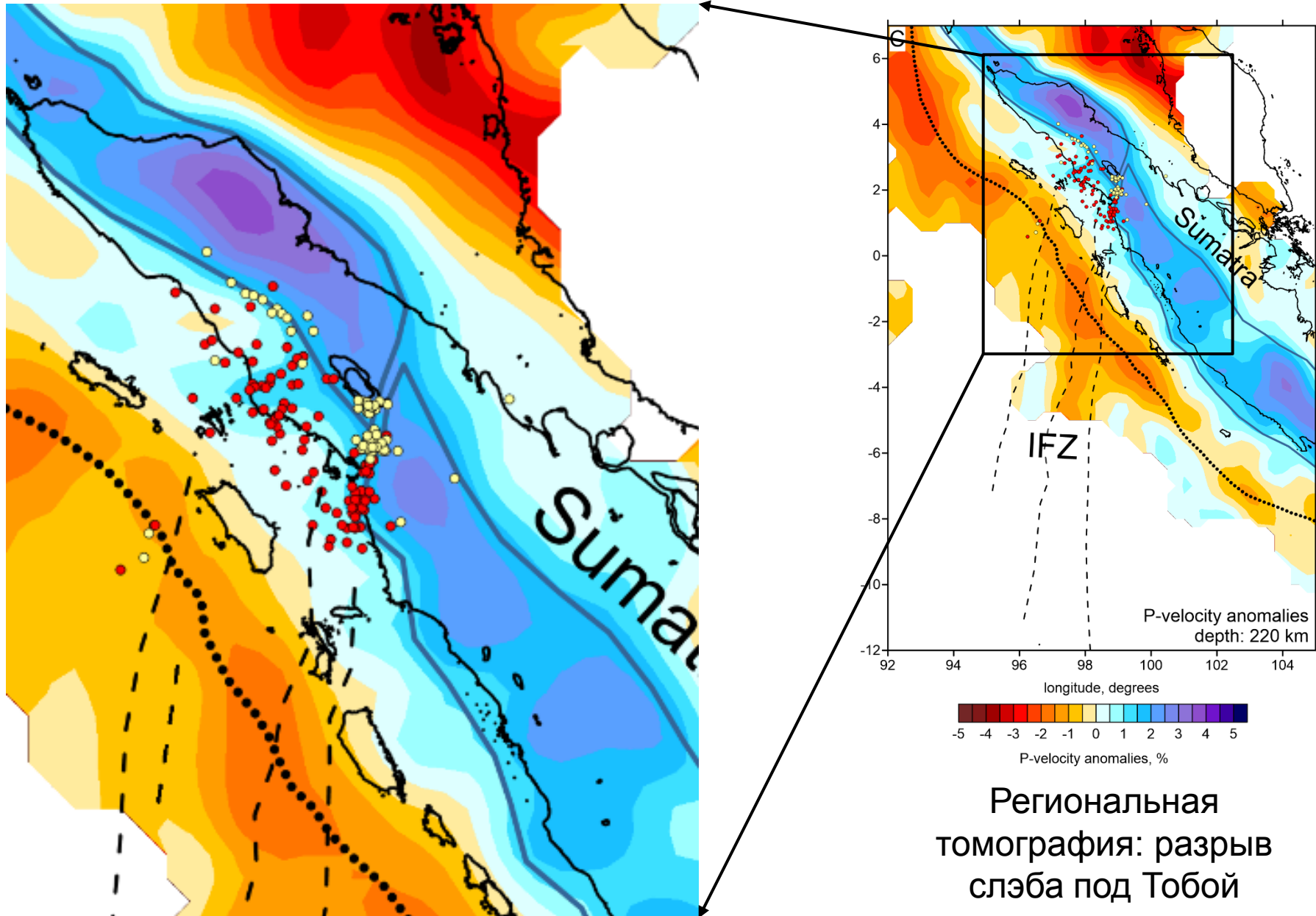
Рельеф: IFZ, направлен
прямо под Тобу

производная геоида:
погружение IFZ под Тобу

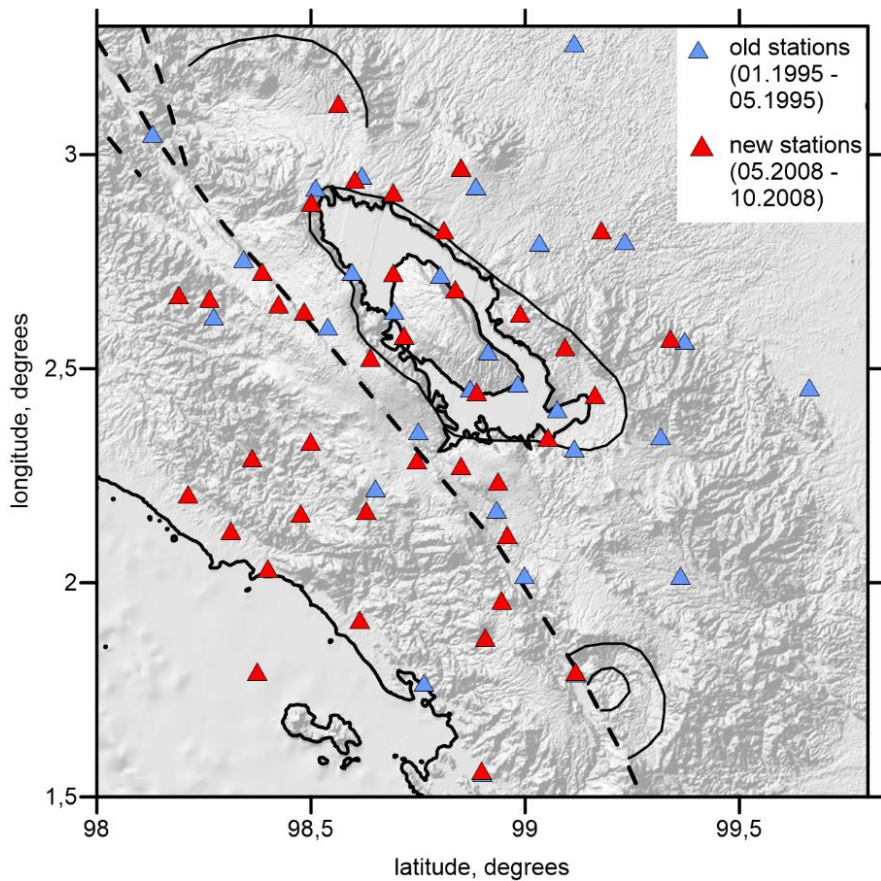
Региональная
томография: разрыв
слэба под Тобой

Investigator Fracture Zone(IFZ)

- основная причина повторяющегося супервулканизма в кальдере Тоба



Данные для сейсмических данных



PASSCAL Data (01.1995 – 05.1995):

Number of stations: 31

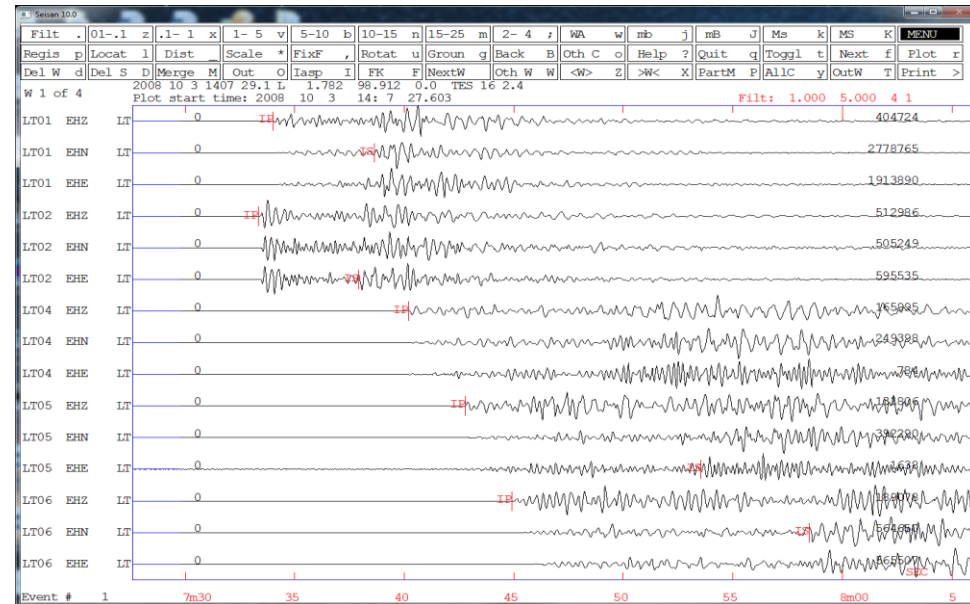
Number of arrivals: 7058

P-data: 4122

S-data: 2936

Used number of events: 505

Example of operating window in SEISAN software*



* Havskov and Ottemoller, SeisAn Earthquake analysis software, Seis. Res. Lett., 70, 1999

GFZ Data (05.2008 – 10.2008):

Number of stations: 42

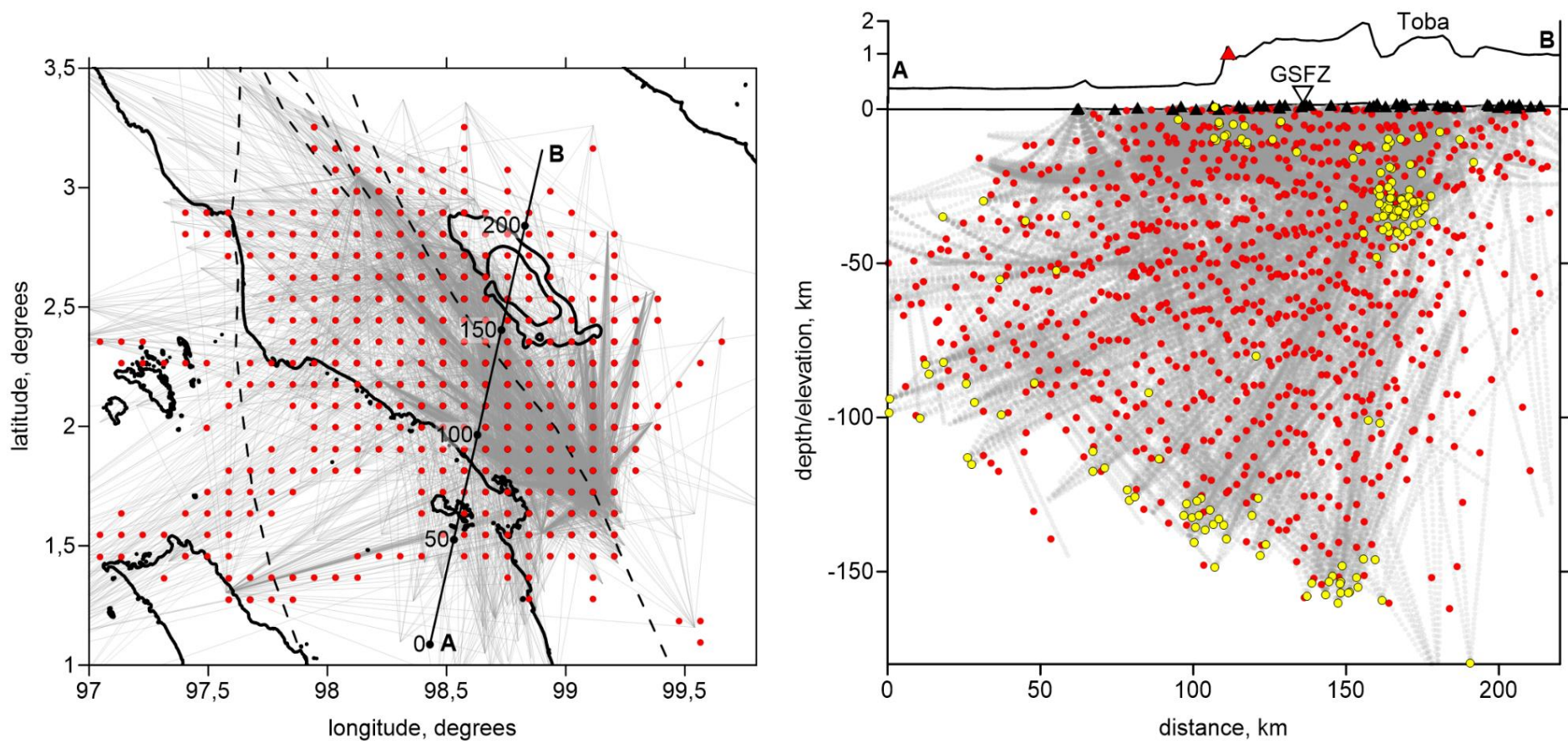
Number of arrivals: 4826

P-data: 2522

S-data: 2304

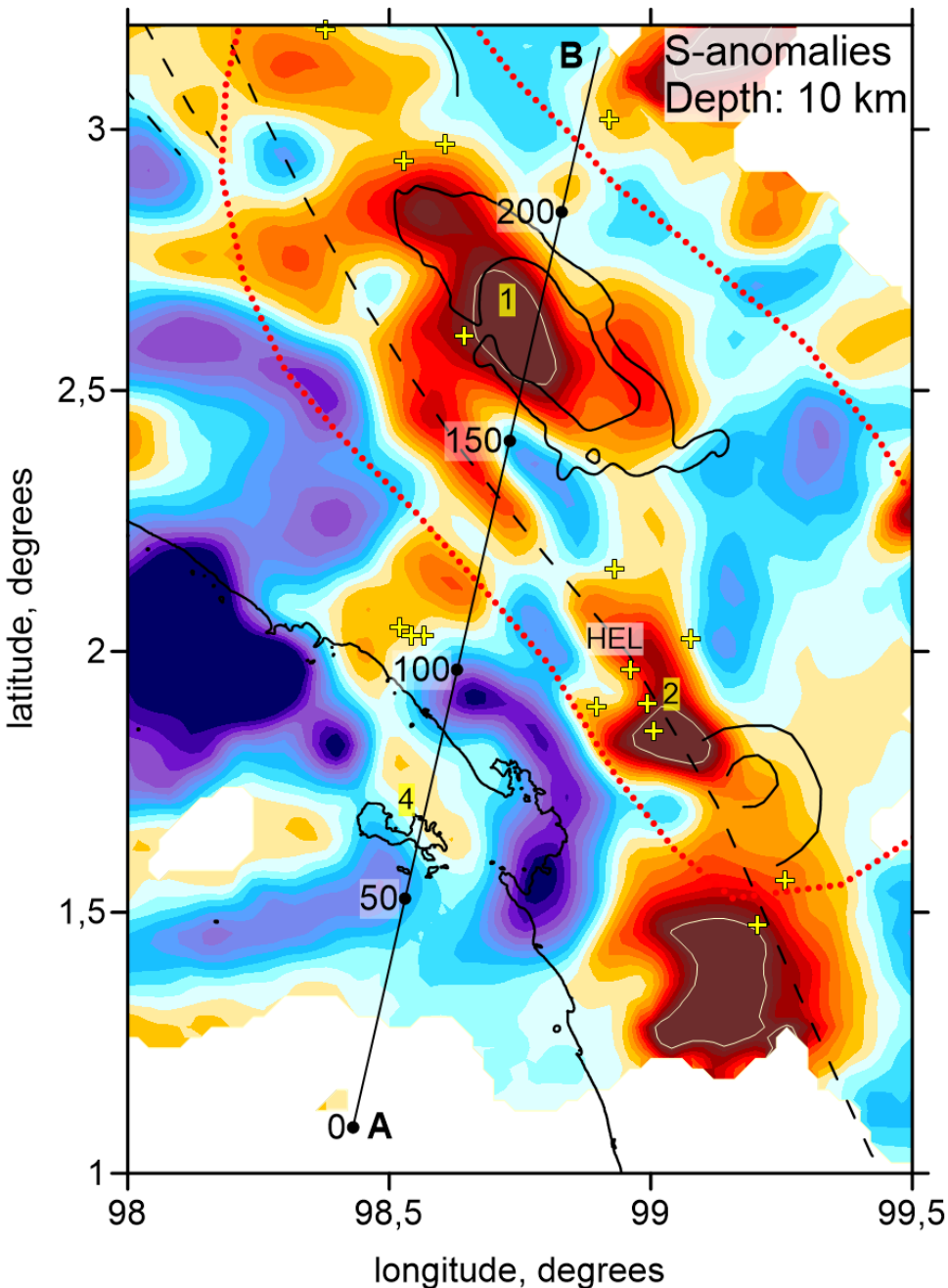
Used number of events: 149

Данные для сейсмических данных



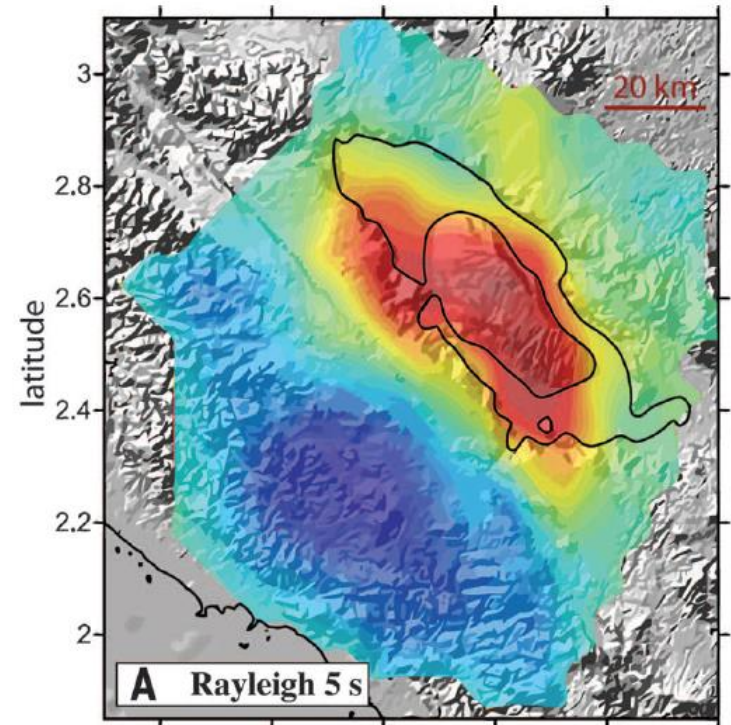
Распределение лучей и узлов параметризационной сетки на горизонтальном и вертикальном сечениях

Сейсмические аномалии на глубине 10 км



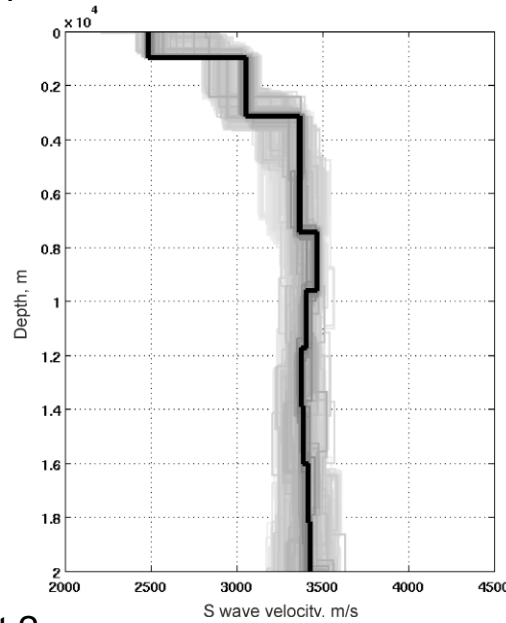
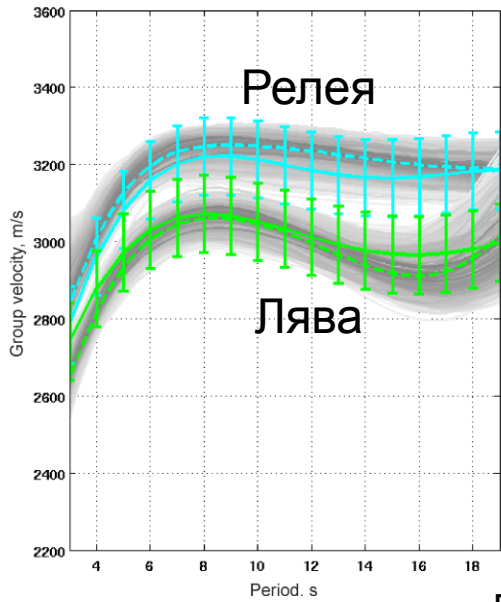
- Низкие скорости под кальдерой
- Низкие скорости под активными вулканами
- Низкие скорости вдоль Великоо Суматранского разлома

Результат шумовой томографии

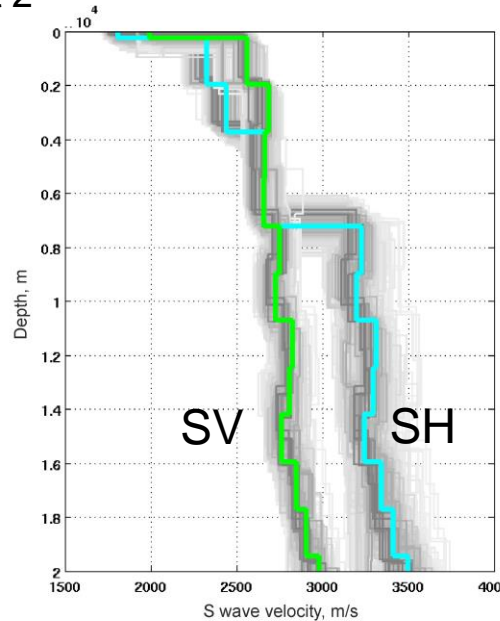
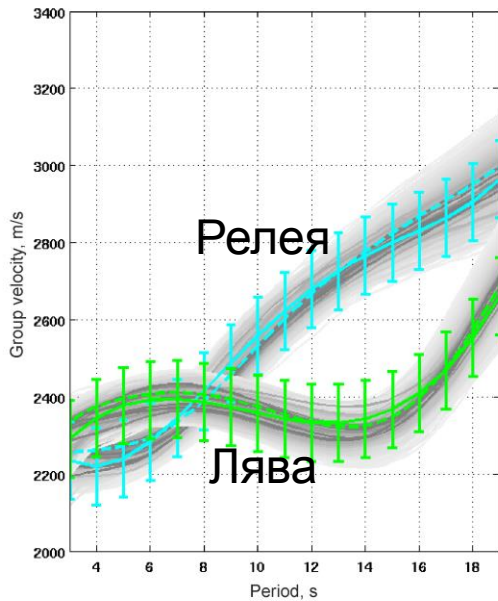


Выявление анизотропии в коре с помощью шумовой томографии

Point 1

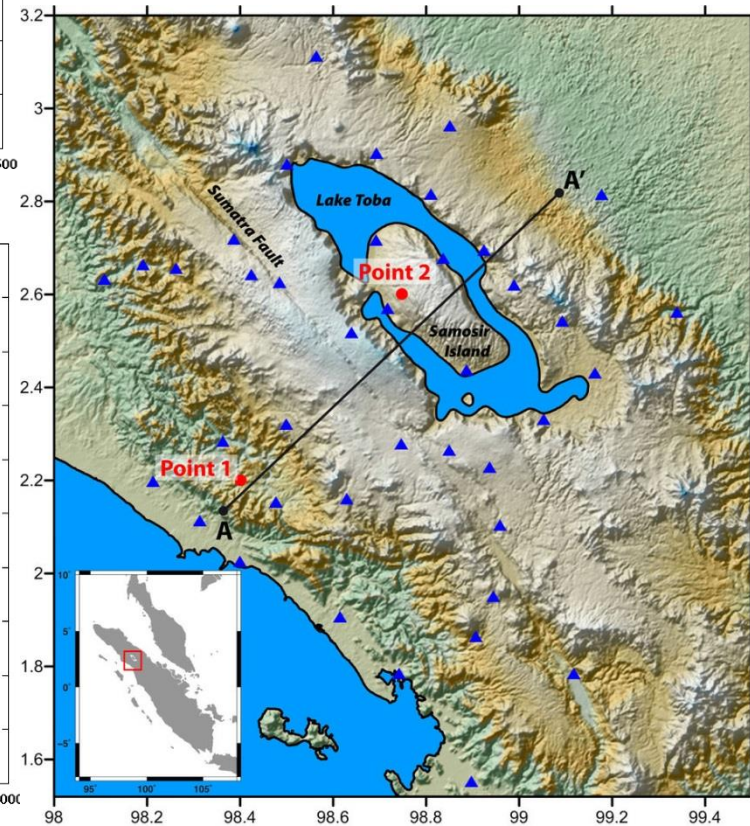


Point 2

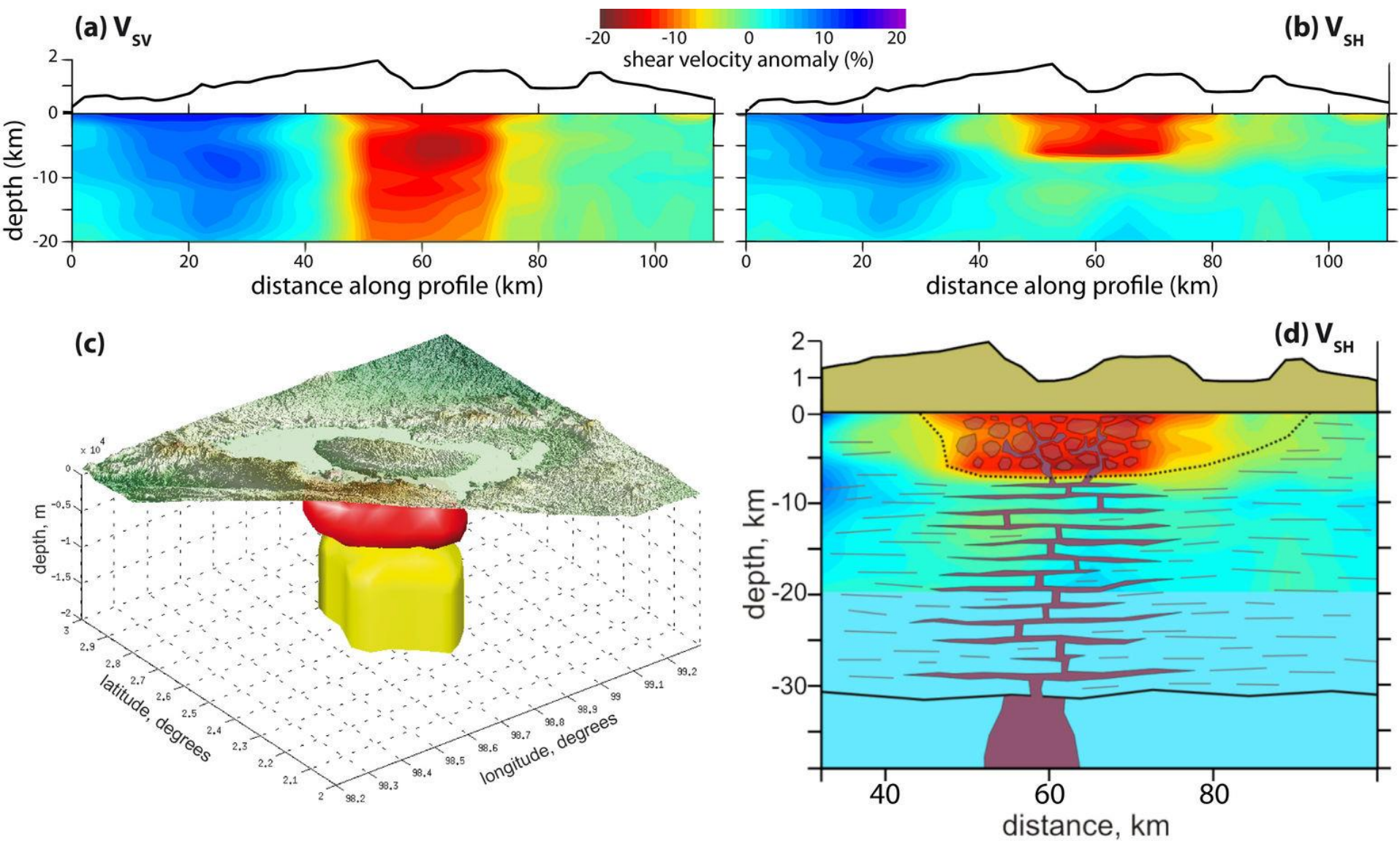


Разница скоростей поперечных волн с горизонтальной и вертикальной поляризацией Sv и Sh получается из инверсии данных по волнам Рэлея и Лява

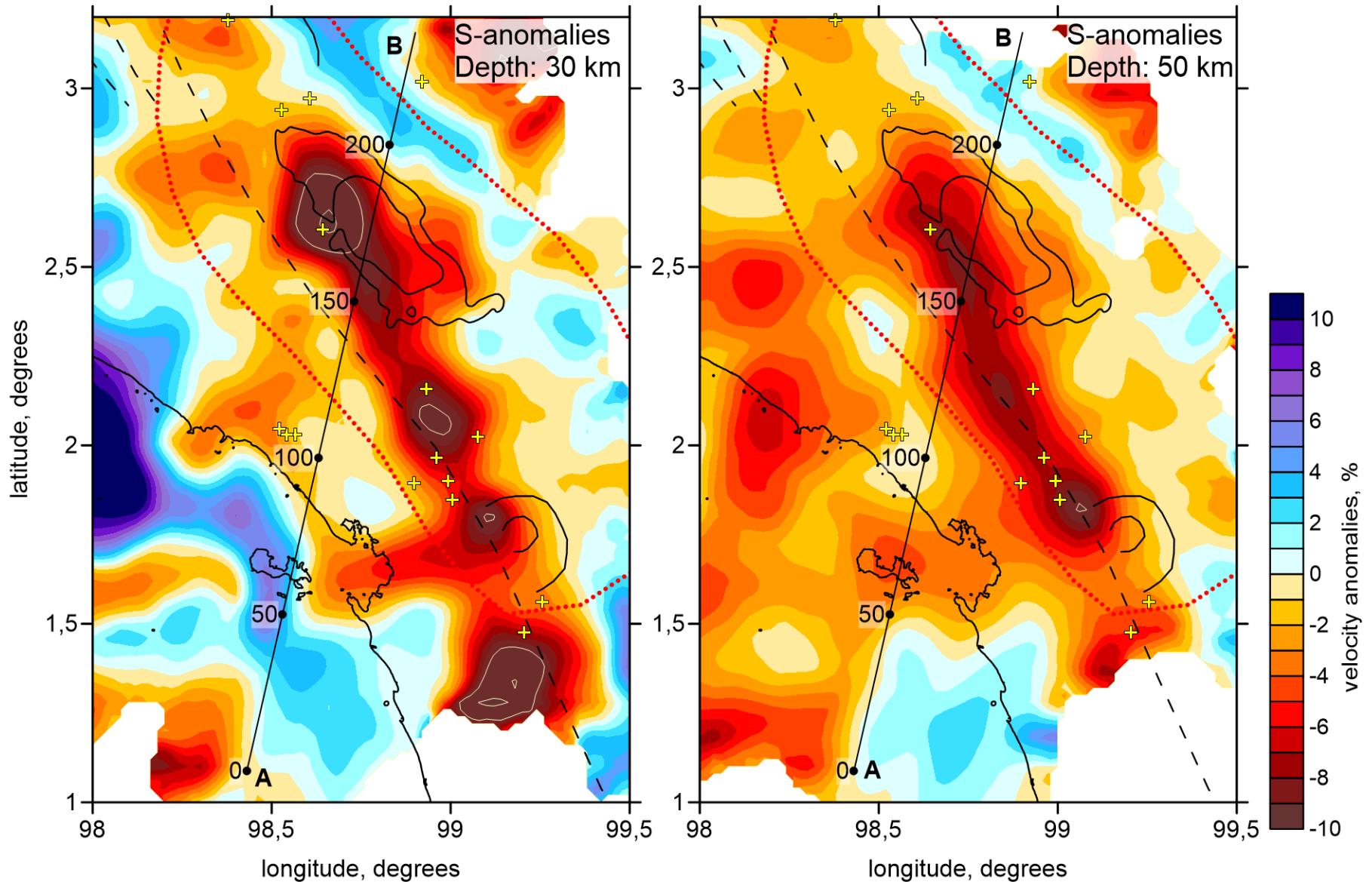
Jaxybulatov et al. 2014, Science



Горизонтальная анизотропия может отражать слоистость магматического очага

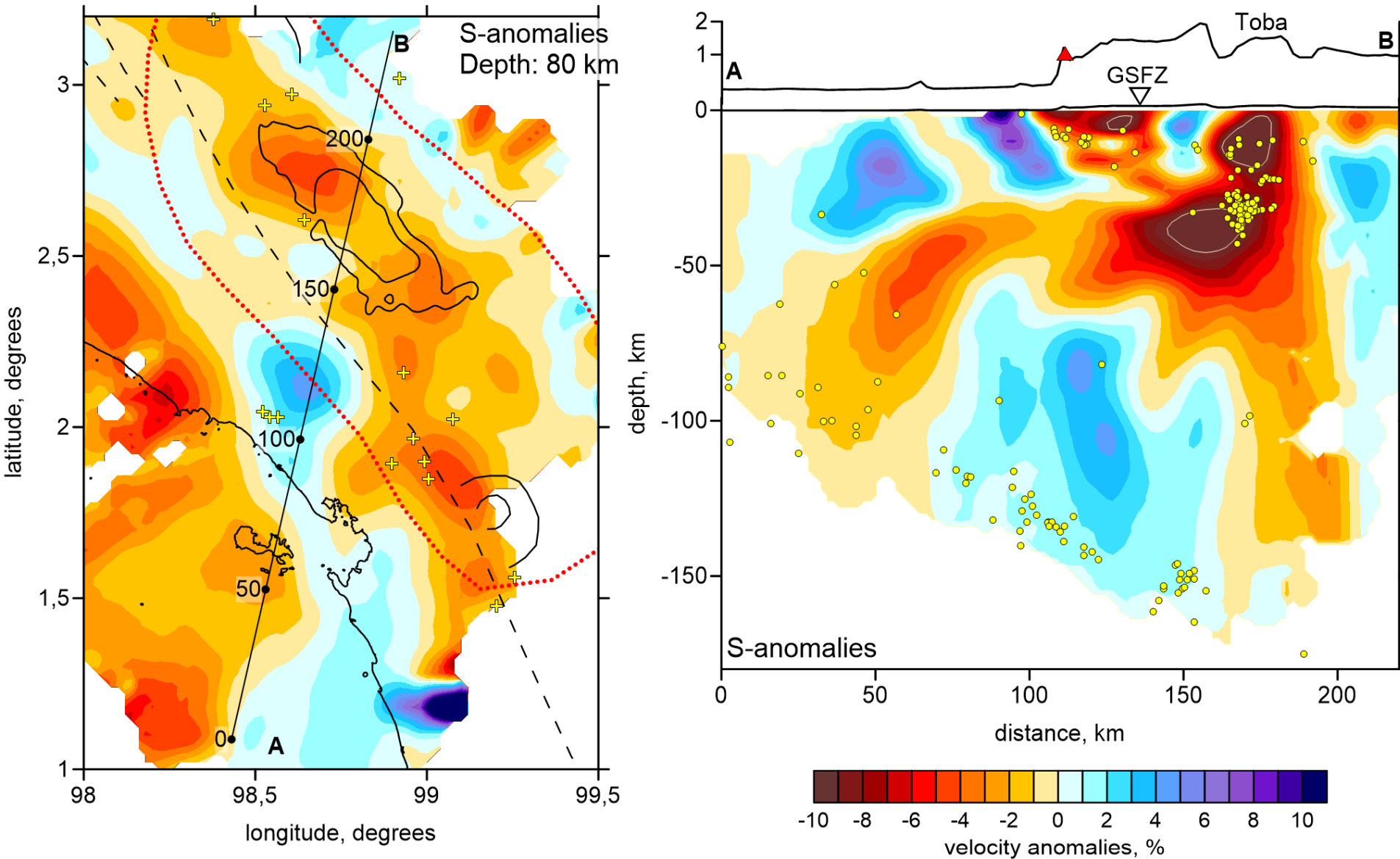


Аномалии на глубинах 30 и 50 км



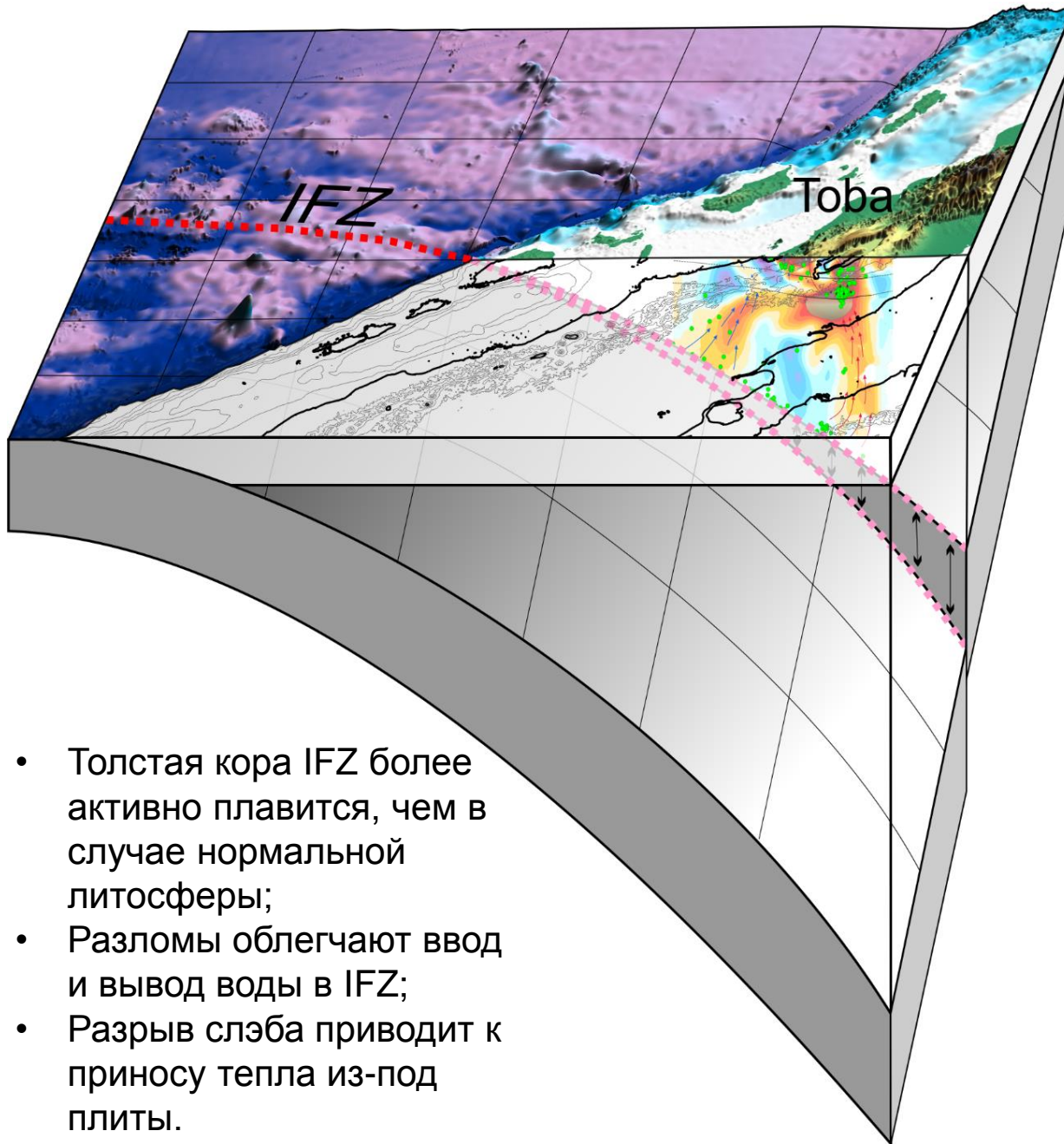
- Крупная аномалия на подошве коры с размером около 120x20 km может указывать на наличие огромного магматического очага (50 000 km³).

Скоростные аномалии в мантийном клине



- We observe two low-velocity anomalies starting at the slab area at depth of 80 km and 150 km.

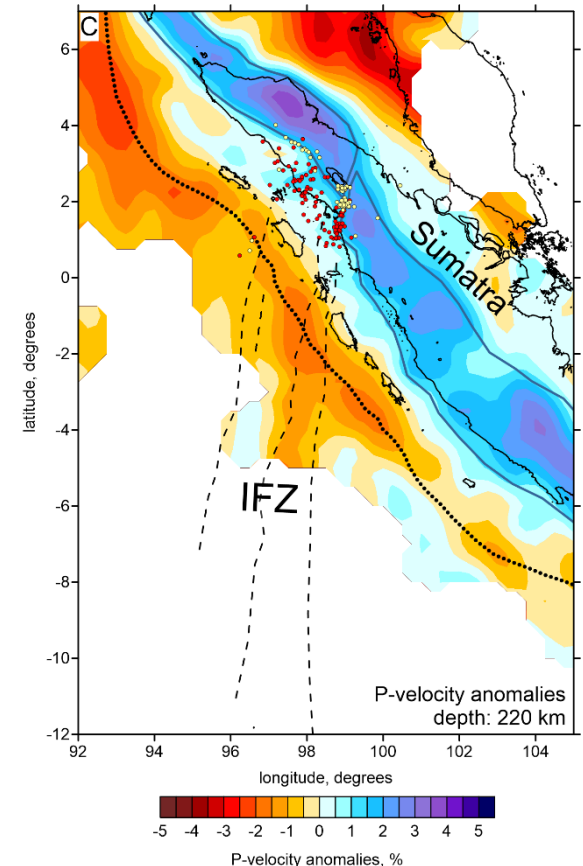
Глубинные источники суперизвержения:



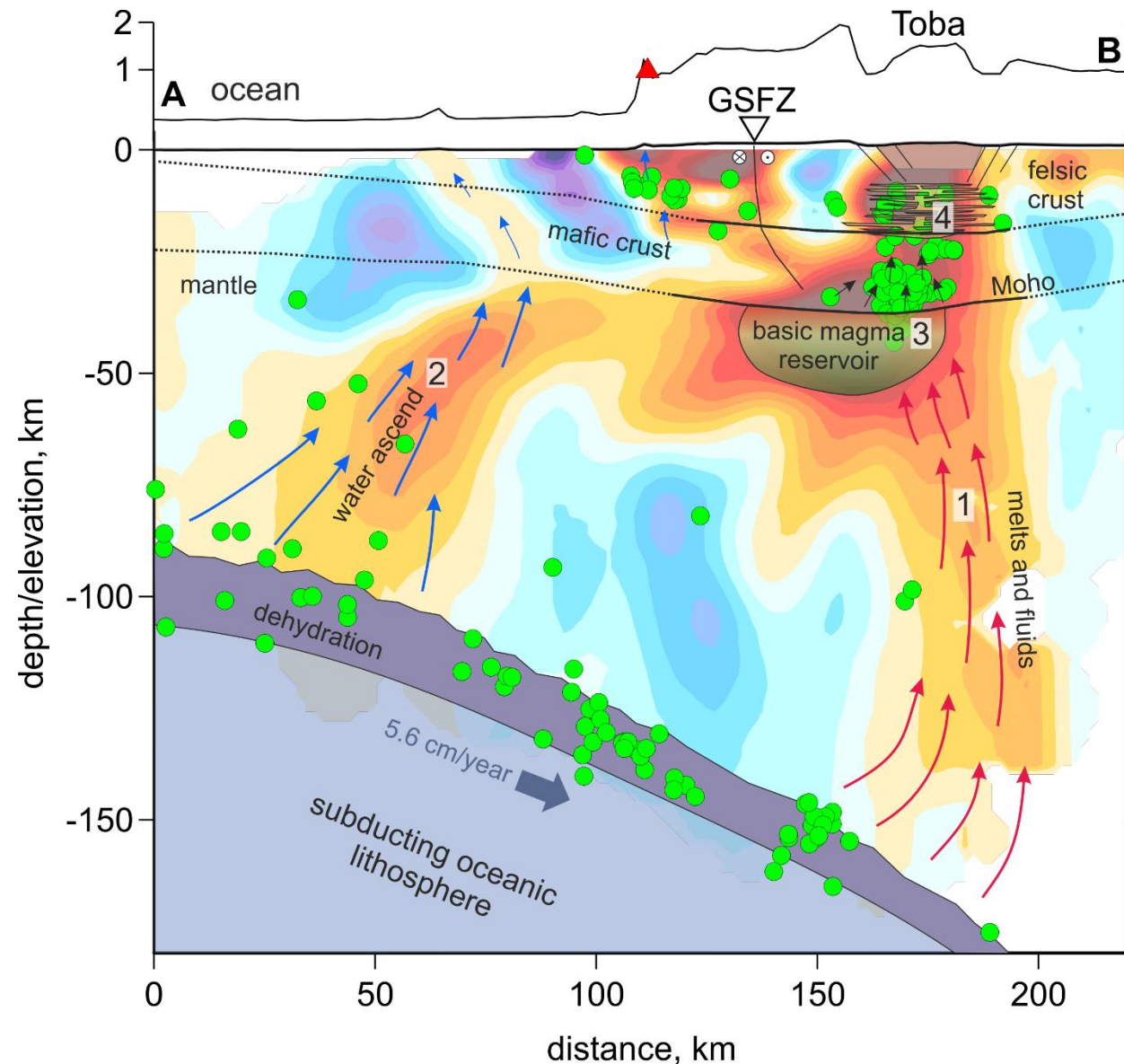
- Толстая кора IFZ более активно плавится, чем в случае нормальной литосферы;
- Разломы облегчают ввод и вывод воды в IFZ;
- Разрыв слэба приводит к приносу тепла из-под плиты.

В районе Тобы сходятся:

1. линия IFZ;
2. узкая полоса глубокой сейсмичности;
3. Возможный отрыв слэба.

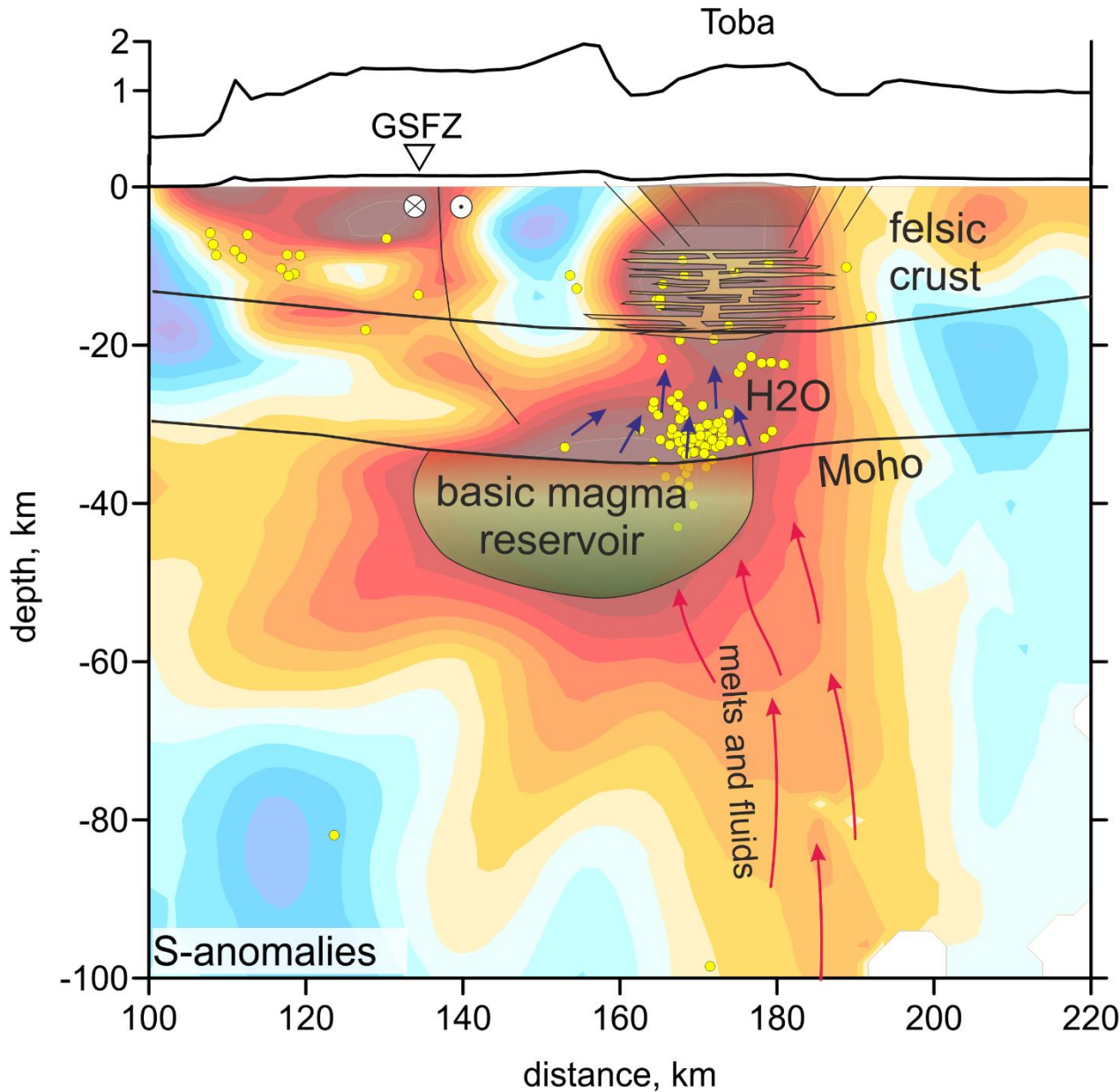


Многоуровневая магматическая система под супервулканом Тоба



1. Флюиды выходят из слэба на глубине 150 км.
2. В мантийном клине они реагируют с мантийными минералами и приводят к их плавлению.
3. На подошве коры образуется огромный резервуар базитовой магмы объемом около $50,000 \text{ km}^3$.
4. Базитовая магма не может подниматься через кору континентального типа.
5. Перегретые флюиды проникают в кору и разогревают ее.
6. Аномальное тепло плавит породы в верхней коре.
7. Насыщенный флюидом расплав – бомба замедленного действия

Многоуровневая магматическая система под супервулканом Тоба



1. Флюиды выходят из слэба на глубине 150 км.
2. В мантийном клине они реагируют с мантийными минералами и приводят к их плавлению.
3. На подошве коры образуется огромный резервуар базитовой магмы объемом около 50,000 km³.
4. Базитовая магма не может подниматься через кору континентального типа.
5. Перегретые флюиды проникают в кору и разогревают ее.
6. Аномальное тепло плавит породы в верхней коре.
7. Насыщенный флюидом расплав – бомба замедленного действия



Заключение:

Сейсмическая томография – мощный инструмент для изучения структуры магматических очагов под вулканами.

Рассмотрены три сейсмические методики, с помощью которых изучают вулканы

Результаты томографии позволяют воссоздать механизмы работы магматических систем

С помощью различных томографических исследований удалось воссоздать механизм функционирования супервулкана Тоба