

УДК 550.[34:384]::551.21

## СЕЙСМОЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНАХ КАМЧАТКИ

Ю. А. Кугаенко<sup>1</sup>, В. А. Салтыков<sup>1,2</sup>, В. И. Синицын<sup>1</sup>, В. Н. Чебров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН

<sup>2</sup>Камчатский государственный педагогический университет  
г. Петропавловск-Камчатский

**Аннотация.** Методы, основанные на использовании естественной и наведенной сейсмической эмиссии для изучения земной коры, объединены общим названием «эмиссионная томография». Эмиссионная томография позволяет картировать источники микросейсмического излучения, находящиеся во внутренних точках среды. Природные условия Камчатки позволяют провести наблюдения сейсмической эмиссии в различных активных областях, связанных с проявлениями вулканизма этого региона. Изученность ряда природных объектов Камчатки достаточно высока и предполагает возможность сопоставления имеющихся данных с результатами проведения работ по эмиссионной томографии. Речь идет в первую очередь о вулканических постройках и гидротермальных системах. Для реконструкции поля шумового излучения среды в данной работе используется оценка меры подобия сейсмических сигналов S (Semblance): отношение энергии суммарного по всем датчикам группы сигнала к сумме энергий каждого датчика в отдельности, вычисляемое для каждой опрашиваемой точки под антенной. В данной статье приведены некоторые результаты исследований 1990–1999 гг., проведенных с помощью методов и подходов сейсмоэмиссионной томографии в молодой вулканической области (район извержения вулкана Толбачик 1975–1976 гг.) и на двух различных гидротермальных системах: Мутновском месторождении парогидротерм и низкотемпературном Начикинском месторождении термальных вод.

## SEISMIC EMISSION TOMOGRAPHY IN VOLCANIC AREAS OF KAMCHATKA

Yu. Kugaenko<sup>1</sup>, V. Saltykov<sup>1,2</sup>, V. Sinitsyn<sup>1</sup>, V. Chebrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kamchatkan Seismological Department, Geophysical Service, RAS

<sup>2</sup> Kamchatkan State Pedagogical University, Petropavlovsk-Kamchatsky

**Abstract.** Methods based on application of natural and induced seismicity for crust investigation are united under the name “emission tomography”. By this method we can locate microseismic radiation sources in inner points of medium. The natural conditions of Kamchatka allow carrying out the investigation of seismic emission in the areas connected with volcanism of this region. Some Kamchatkan volcanic areas and hydrothermal fields are studied very well. So there is good opportunity to compare this data with the results of our investigation by noise seismotomography use. This research continues the investigation series, in which emission seismotomography was applied as a method of the image reception for the environment objects radiating most intensively. For determination of seismic radiation sources the parameter Semblance was employed. This parameter characterizes the parity between useful signal and hindrance. Semblance estimation is found as a ratio between the energy of a signal summed over all sensors and the sum of signal energies at each sensor

separately, and is calculated for each point of medium under the seismic array. On Kamchatka the registration by seismic arrays was carried out in 1990-99 on the specially organized ranges in young volcanic area (area of Tolbachik volcano eruption 1975-1976 гг.) and on two various hydrothermal fields: Mutnovsky field of steam-hydrotherms and Nachikinsky hydrothermal field.

## **Введение**

При исследовании особенностей внутреннего строения литосферы современная сейсмология в основном ориентирована на применение сейсмических волн от землетрясений либо искусственных источников сигнала. Однако в последнее время внимание стало уделяться и нетрадиционным методам исследования, основанным на новом представлении о среде и ее физических свойствах: обретает признание такое свойство среды, как активность, которая проявляется, в частности, в излучении сейсмического шума. Концепция активности геофизической среды в корне меняет представления о свойствах горных пород. Обнаружение сейсмической эмиссии (эндогенного сейсмического шума) сделало возможным использование подходов, рассматривающих микросейсмические шумы как самостоятельное информационное поле, содержащее данные о строении среды и протекающих в ней процессах. В сейсмоэмиссионном процессе различимы сигналы, соответствующие отдельным актам – микроземлетрясениям. Часто следуя одно за другим, эти отдельные спонтанно возникающие события сливаются в непрерывный процесс, интенсивность которого зависит от общего напряженного состояния среды, пространственных и временных градиентов напряжений и раздробленностью структуры. Каждое такое микрособытие ведет к локальному сбросу напряжений, а весь процесс в целом иллюстрирует тонкую структуру релаксации горных пород и сейсмического течения горных масс на уровне отдельных актов крипа. Сейсмическая эмиссия – новый класс информативных сейсмических явлений.

Методы, основанные на использовании естественной и наведенной сейсмической эмиссии для изучения земной коры, объединены общим названием «эмиссионная томография». Эмиссионная томография позволяет картировать источники микросейсмического излучения, находящиеся во внутренних точках среды. Применяются методы, аналогичные пеленгации и локации источников шума в радиофизике и гидроакустике: группой расположенных на поверхности сейсмодатчиков регистрируется волновое поле микросейсмического излучения. Сейсмическая антenna фокусируется последовательно в заданных точках исследуемого объема, вычисляется энергетическая оценка излучения из выбранной точки, затем строится пространственное распределение этого параметра.

Использование непрерывного эндогенного излучения и эмиссионной томографии для исследования структуры и динамики среды имеет ряд преимуществ по сравнению с трансмиссионной (т.е. на проникающих лучах) томографией, основанной на использовании времен пробега проходящих через исследуемый объем сейсмических волн от искусственных источников и землетрясений. Метод прост и недорогостоящий, не требует длительной регистрации и применения дополнительного источника зондирующего сигнала, в исследованиях используется постоянно существующее поле микросейсмических колебаний. Применение этого метода возможно повсеместно, а не только в сейсмоактивных районах. В условиях отсутствия локальной сейсмичности эмиссия представляет собой уникальный источник информации о внутреннем строении среды и ее динамике. Являясь одним из низших энергетических уровней единого сейсмического процесса, эндогенный микросейсмический шум дает возможность картирования поля разрушения среды, что до сих пор можно было сделать только по землетрясениям в сейсмически активных регионах.

Первые успехи эмиссионной томографии отражены в ряде пионерских работ российских исследователей. Это построение сейсмоэмиссионного изображения ли-

сфера под группой NORSAR [16], результаты работ в рамках Советско-Исландской геолого-геофизической экспедиции в 1988–1989 гг. на севере Исландии под руководством Л.Н. Рыкунова [19,20], исследования российскими и японскими учеными шумового сейсмического поля в районе вулканического фронта на о. Хонсю [18,24], работы по шумовому мониторингу, в которых впервые было зафиксировано возрастание сейсмоэмиссионной активности в очаговых зонах в период подготовки землетрясений [3,4].

В настоящее время сейсмоэмиссионная томография находится в стадии становления. Поэтому необходимо проведение наблюдений и исследований эндогенного микросейсмического излучения на конкретных геологических объектах различной природы, о которых имеется независимая информация, где уже выполнены работы другими методами. Природные условия Камчатки позволяют провести наблюдения сейсмической эмиссии в различных активных областях, связанных с проявлениями вулканизма этого региона. Изученность ряда природных объектов Камчатки достаточно высока и предполагает возможность сопоставления имеющихся данных с результатами проведения работ по эмиссионной томографии. Речь идет в первую очередь о вулканических постройках и гидротермальных системах.

В данной статье приведены некоторые результаты исследований, проведенных с помощью методов и подходов сейсмоэмиссионной томографии в молодой вулканической области (район извержения вулкана Толбачик 1975–1976 гг.) и на двух различных гидротермальных системах: Мутновском месторождении парогидротерм и низкотемпературном Начикинском месторождении термальных вод [10–12].

### Методика

Построение изображений глубинных шумовых источников сводится к анализу пространственного распределения их интенсивности, что осуществляется при помощи фокусировки полного волнового поля, зарегистрированного группой сейсмодатчиков, во внутренние точки среды при сканировании в заданных сечениях. Для таких целей используются процедуры синфазного суммирования с построением энергетических оценок отношения интенсивности регулярной и нерегулярной компонент волнового поля. Суть метода сводится к оценке энергии слабого когерентного излучения различных точек среды. Этот подход известен и применяется при анализе многоканальных записей волновых полей различной природы как в сейсмологии, так и в других областях, связанных с обработкой многоканальной информации.

В общем случае регистрируемое на поверхности волновое поле носит характер случайного процесса, генерируемого множественными источниками в среде. При этом шумовое поле, регистрируемое различными датчиками антенны, некоррелировано. Дело обстоит иначе, если в среде присутствуют ярко выраженные отдельные источники. При появлении в многоканальной записи пространственно-когерентного сигнала с помощью сферизированной сейсмической антенны источник может быть локализован и может быть оценена его интенсивность.

Данные анализируются путем выделения сигналов, приходящих из определенных точек исследуемого объема среды. Вводится временной сдвиг, соответствующий времени прохождения сигнала из опрашиваемой точки до регистрирующего датчика (скоростной разрез или годограф для данного района предполагается известным). Затем участки сигнала суммируются и полученная агрегированная сейсмограмма используется для вычисления энергетической оценки, количественно характеризующей интенсивность излучения среды из точки настройки.

Алгоритм основан на аддитивной модели шумового сигнала и шума. Пусть в точке пространства с координатами ( $X_i, Y_j, Z_k$ ) генерируется сигнал  $g_{ijk}(t)$ , который регистрируется всеми станциями приемной группы. При этом  $m$ -й сейсмометр регистрирует сигнал

$$F_m(t) = A_{ijkn} g_{ijk}(t - \tau_{ijkm}) + e_m(t),$$

где  $A_{ijkm}$  учитывает геометрическое расхождение объемных сейсмических волн и угол выхода луча в точке регистрации,  $\tau_{ijkm}$  – время пробега сейсмических волн от данной точки пространства до датчика,  $e_m(t)$  – суммарный сейсмический сигнал, имеющий постороннее по отношению к данной точке происхождение и являющийся в данном случае помехой. Задача сводится к сравнительной энергии сигналов  $g_{ijk}(t)$ , излучаемых различными точками  $(i,j,k)$  исследуемого объема с использованием набора сейсмограмм  $F_m(t)$ .

Для реконструкции поля шумового излучения среды в данной работе используется оценка меры подобия сейсмических сигналов  $S$  (Semblance) [23]: отношение энергии суммарного по всем датчикам группы сигнала к сумме энергий каждого датчика в отдельности, вычисляемое для каждой опрашиваемой точки под антенной.

$$S_{ijk} = \frac{\sum_{n=1}^N a_{ijk}(t_n)}{M \times \sum_{n=1}^N b_{ijk}(t_n)}; a_{ijk}(t_n) = \left( \sum_{m=1}^M \beta_{ijkm} X_m(t_n - \tau_{ijkm}) \right)^2; b_{ijk}(t_n) = \sum_{m=1}^M \left( \beta_{ijkm} X_m(t_n - \tau_{ijkm}) \right)^2$$

$M$  – число сейсмометрических каналов,  $N$  – длина сигнала в отсчетах,

$n$  – номер текущего отсчета;  $X_m(t_n)$  – амплитуда сигнала на канале  $m$ ,

$\beta_{ijkm}$  – весовой коэффициент, учитывающий геометрическое расхождение волнового фронта и угол выхода сейсмического луча на поверхность в точке регистрации,

$\tau_{ijkm}$  – временной сдвиг сигнала для синхронизации.

Этот параметр относится к оценкам типа отношения сигнал/шум и применяется для выделения слабого полезного сигнала на фоне помех высокого уровня и определения положения источника излучения.

Методические аспекты возможного использования шумовых сейсмических полей для экспериментального исследования структурных особенностей среды рассмотрены в работах А.В. Николаева, П.А. Троицкого, И.Я. Чеботаревой [13,14,17,24].

В случае отсутствия источника когерентного сигнала, если волновое поле, регистрируемое на поверхности, носит случайный характер и некоррелировано между каналами, значения сигнала распределены нормально с нулевым средним и одинаковой дисперсией. В этом случае среднее значение оценки меры подобия и ее дисперсия определяются как

$$\langle S \rangle = 1/M \quad \sigma^2 = \frac{2(1 - 1/M)}{NM^2}$$

Причем  $S=1/M$  соответствует отсутствию корреляции между каналами, а значение 1 – идеальному случаю, когда сигналы на всех каналах идентичны и сигнал из точки настройки принимается без помех, исходящих из других точек пространства. Если в точке настройки параметр превышает значение для чисто шумового поля ( $1/M$ ), это свидетельствует о наличии в данной точке источника излучения. В качестве порога детектирования можно выбрать 95% доверительный интервал значений оценки для пространственно некоррелированного волнового поля, равный  $\delta = 2\sigma \approx 2/M \times (2/N)^{1/2}$ . Если значение  $S$ , вычисленное для данной точки, превышает чисто шумовое значение, равное  $1/M$ , более, чем на доверительный интервал  $\delta$ , то вероятность того, что в записях присутствует когерентный сигнал, составляет 95%. При построении распределения интенсивности излучения значения ниже  $(1/M + \delta)$  исключались из рассмотрения и на получаемых изображениях не присутствуют.

Сканирование среды проводится в узлах равномерной сетки, покрывающей исследуемый объем среды, либо в выбранных горизонтальных или вертикальных сечениях. В процессе сканирования каждому узлу сетки присваивается значение, соответствующее вычисленной величине энергетической оценки отношения сигнал/шум. Если координаты точки настройки совпадают или наиболее близки к истинному

положению источника слабого когерентного сигнала, то величина оценки отношения сигнал/помеха, вычисленная для данного узла по многоканальной сейсмограмме, будет превышать значения оценок отношения сигнала/помеха для соседних узлов. Совокупность вычисленных энергетических оценок образует карту, которая отображает картину пространственного распределения сейсмических излучателей в исследуемом объеме среды.

При изучении сейсмического волнового поля в силу дискретной природы регистрации пространственного распределения колебаний поле может быть нам известно только в узлах выборочной решетки датчиков, размещенных в плоскости  $z=0$ . В масштабе длин волн размер плотных наблюдательных сетей в сейсмологии – несоизмеримо малая величина по сравнению с оптическими апертурами. Разрешающая способность, принятая в оптических приложениях, определяется из соотношений:

$$\delta x = \lambda z_0 / D, \quad \delta h = 8\lambda(z_0/D)^2 \quad (*)$$

где  $\delta x$  – разрешающая способность по горизонтали,  $\delta h$  – разрешающая способность по глубине,  $D$  – линейный размер апертуры,  $z_0$  – глубина расположения источника сигнала,  $\lambda$  – длина волны. Разрешающая способность рассчитывается как полуширина главного лепестка диаграммы направленности приемной антенны. Согласно критерию Релея эта величина определяет минимальное расстояние между двумя точками, которые еще могут быть различены.

Соотношения (\*) используются в случае, когда  $z_0 > 2D$ , который имеет место в оптике. В сейсмике, учитывая большие длины волн и малые линейные размеры сейсмической антенны, формировать изображение источников излучения целесообразно в области  $z_0 \leq 2D$ , когда исследуемый объект удален на расстояние, сравнимое по величине с линейным размером апертуры. В последнем случае формулы (\*) неверны. Здесь нужно пользоваться зависимостью, полученной при аппроксимации результатов численных расчетов распределения интенсивности в изображении сферического точечного излучателя нулевого порядка, помещенного в центре апертуры [5]. За меру разрешающей способности принимается расстояние между центральным максимумом и первым нулем кривой распределения интенсивности в изображении источника. Таким образом, для области  $z_0 \leq 2D$  следует пользоваться зависимостями:

$$\delta x = 0.4\lambda(z_0/D)^2 + 0.5l, \quad \delta h = 2.5\lambda(z_0/D)^2 + \lambda$$

В этом случае оптимальный шаг установки приборов при регистрации  $\Delta x$  оценивается исходя из положения  $\delta x = 2\Delta x$ , что соответствует требованию, чтобы на область центрального лепестка приходилась как минимум одна выборка, и в зависимости от  $\lambda$ ,  $z_0$  и  $N$  (числа датчиков на одном профиле):

$$Dx = 0.1\lambda \left[ 1 + \sqrt{1 + 30 \frac{Z_0}{\lambda(N-1)}} \right]$$

В работах [17, 20] показано, что алгоритмы когерентного приема устойчивы к систематической ошибке в скорости. Стабильные картины распределения параметра  $S$  сохраняются при использовании широкого диапазона априорных скоростных моделей (вплоть до однородных с подходящей эффективной скоростью). Неточность в задании скоростного разреза слабо влияет на степень фокусировки изображения, хотя при этом изображение смещается по глубине относительно истинного положения источника. Количественный анализ трехмерных изображений позволяет в принципе корректировать скоростную модель, используя в качестве критерия максимум фокусировки изображения и сопоставляя истинное и расчетное положение излучателя. Однако при наличии случайных флуктуаций времени прихода сигнала, вызванных локальными латеральными неоднородностями, качество изображения ухудшается.

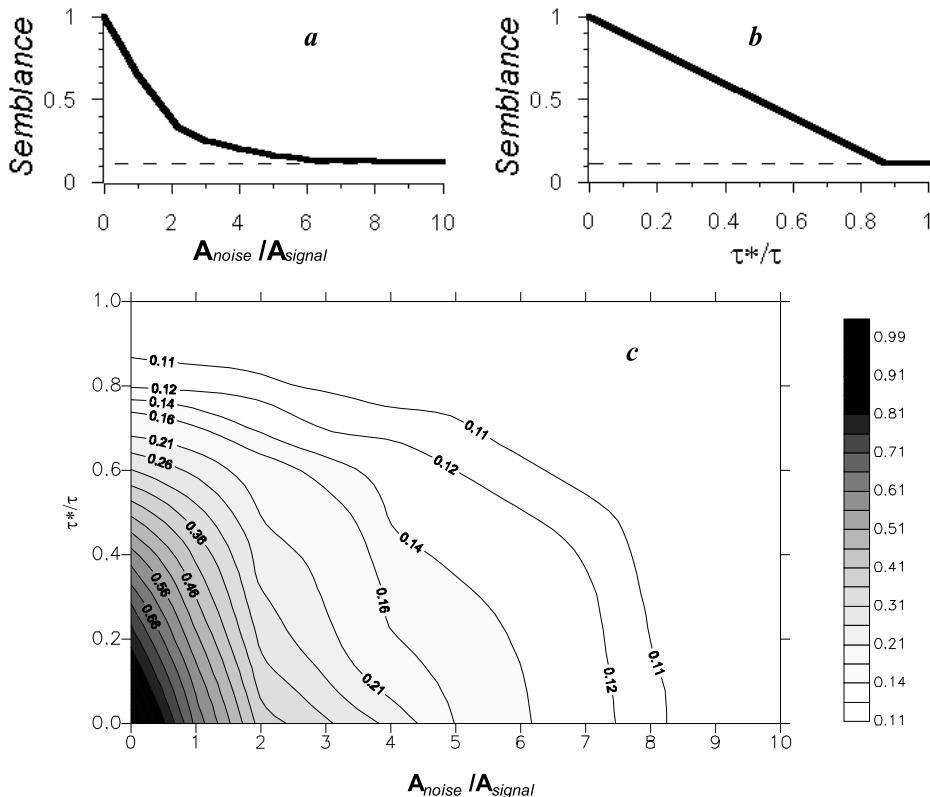
При увеличении расстояния от приемной группы до источника годограф сферической волны вы полаживается, асимптотически переходя в годограф плоской волны. При достаточно большом удалении пропадает возможность точной локализации источника, можно лишь фиксировать направление прихода сигнала. По этой же причине метод эффективно работает в ограниченном диапазоне глубин. Рабочий диапазон глубин ограничен не только снизу, но и сверху. Это связано с тем, что для источников, расположенных вблизи плоскости группы, сигнал быстро спадает по интенсивности по мере удаления приемного датчика от источника. Таким образом, уменьшается эффективный размер группы, появляются блики фона и интенсивные ложные фокусировки. Положение верхней границы зависит от типа приемника: однокомпонентного или трехкомпонентного, от поляризации сигнала. Например, для однокомпонентного вертикального приема для продольной волны верхняя граница проходит на глубине  $L/4$  под центром группы и  $L/2$  на ее краю [17].

Необходимо по возможности увеличить число датчиков. Например, в [19] рекомендуется довести число каналов, по крайней мере, до 100 с возможностью использования трехкомпонентных станций.

Для ослабления влияния случайных помех целесообразно осреднение нескольких изображений, полученных в результате независимых расчетов по различным участкам зарегистрированных сигналов. При этом систематически шумящие объекты будут проявляться более ярко, а случайные аномалии компенсируют друг друга.

Значение оценки  $S$  зависит как от отношения сигнал/шум (аддитивная помеха) и от флуктуаций времени прихода сигнала, обусловленных наличием латеральных неоднородностей (параметрическая помеха). Мелкомасштабные неоднородности среды приводят к флуктуациям фазы и амплитуды на каналах. Влияние параметрической помехи зависит также от спектра сигнала, статистического распределения флуктуаций времени прихода, геометрии расстановки группы. Работоспособность и помехоустойчивость метода оценивалась по результатам численного моделирования. Конфигурация гипотетической группы соответствовала реальной расстановке сейсмической антенны в районе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (эквидистантная площадная расстановка из 9 однокомпонентных датчиков;  $\Delta x=500$  м, что соответствовало  $1-1.2\lambda$ ). Использовалась слоистая горизонтально однородная модель среды [6]. Были синтезированы 9-канальные сейсмограммы для точечных источников гармонического сигнала, расположенных в разных местах сканируемого объема. Для демонстрации помехозащищенности метода на полезный сигнал аддитивно накладывалась поверхность помеха различной интенсивности. Помеха моделировалась последовательностью случайных чисел, имеющих нормальное распределение и нулевое среднее значение. Параметрическая помеха задается как случайная и нормально распределенная, она добавляется к временам прихода сигнала к датчикам, внося случайные сдвиги в фазу сигнала. Флуктуации времени прихода нормированы на время когерентности заданного гармонического сигнала, равное половине его периода. Увеличение флуктуаций сказывается на значениях фазы исследуемого сигнала, фокусировка затрудняется. Численные расчеты одновременного влияния аддитивной и параметрической помех различного уровня на значение параметра  $S$  в точке, в которую помещен гипотетический излучатель, проиллюстрировано на рис. 1. Моделирование показывает, что при настройке антенны на точку излучения возможно получение значимого результата в достаточно широких диапазонах значений помех, что соответствует реальным условиям регистрации. Таким образом, используемый алгоритм достаточно помехоустойчив: наличие интенсивных помех, как аддитивных, так и параметрических, ухудшает качество изображения, но не устраняет принципиальной возможности его формирования, влияние помех компенсируется увеличением времени накапливания данных.

Однокомпонентная регистрация не позволяла использовать поляризацию волн при настройке антенны. Расчеты были проведены отдельно для двух простейших вари-



**Рис. 1.** Результаты численного моделирования. Одновременное воздействие аддитивной и параметрической помех на значение оценки Semblance в точке, в которую помещен гипотетический излучатель. Моделируемые флуктуации времен прихода сигнала к станциям  $\tau^*$  нормированы на время его когерентности  $\tau$ .

**Fig. 1.** Results of computational modeling. Simultaneous influence of additive and parametric hindrance on Semblance in point of the oscillator location. Modeling fluctuations of signal coming time  $\tau^*$  are normalized on its coherence time  $\tau$ .

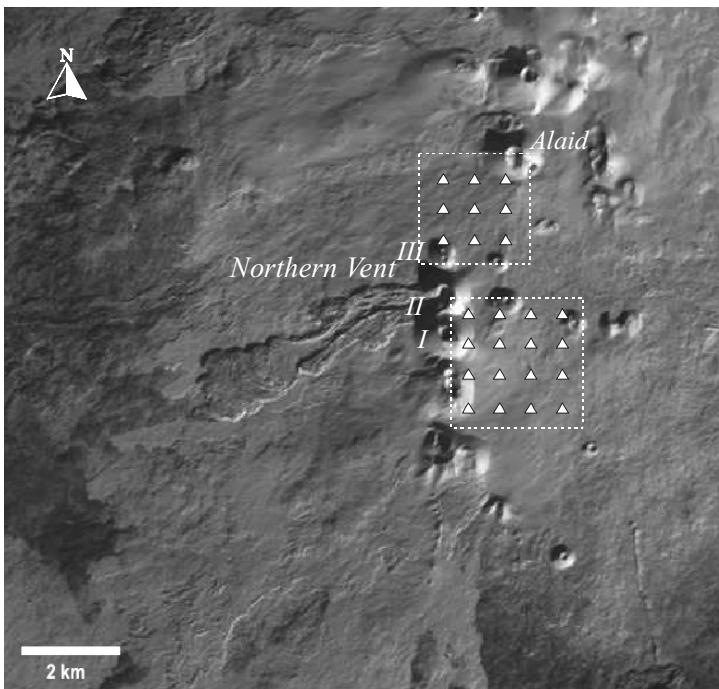
антов: антenna настраивалась на прием продольных либо поперечных волн. При этом изменялся временной сдвиг, соответствующий времени пробега волны из точки настройки до датчика антенны, в соответствии со скоростным разрезом.

Низкочастотные штормовые микросейсмы, уровень которых в районах, близких к крупным морским акваториям, традиционно велик, а также высокочастотные шумы, обусловленные метеофакторами, удалялись с помощью полосовой фильтрации сигналов.

#### Хронология проведения исследований: 1990-1999 гг.

Данная работа продолжает ряд исследований, в которых применяется эмиссионная томография как метод получения изображения наиболее интенсивно излучающих микросейсмический шум объектов среды. Работы были начаты в начале 90-годов под влиянием исследований, проведенных в 1988-1989 гг. в рамках Советско-Исландской геолого-геофизической экспедиции.

В 1990 году в лаборатории автономных сейсмических станций для сейсмоэмиссионных исследований был разработан и создан комплекс регистрации микросейсмического излучения, в состав которого входили 9 вертикальных однокомпонентных геофонов на основе вертикальных сейсмоприемников СМ-3КВ, имеющих в своем составе электронный усилитель. Это позволило увеличить чувствительность сейсмоприемников до  $10^5$  В/м/с. В состав комплекса также входил низкоскоростной 9-канальный магни-



**Рис. 2.** Схема расстановки сейсмических антенн в районе Северного прорыва БТТИ.

Сейсмодатчики отмечены треугольниками; квадраты - области сканирования.

**Fig. 2.** Map of investigated area (Northern vent of GFTE).

Triangles - seismometers; the squares-scanned areas.

тограф Н-086, обеспечивающий синхронность многоканальной ЧМ-записи. Связь сейсмоприемников и регистратора обеспечивалась длинными проводными линиями связи.

Первые полевые работы с использованием этой сейсмической антенны были проведены летом 1991 года в районе Северного прорыва (СП) Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ). Этот район стал нашей первой экспериментальной площадкой. Он был выбран не случайно.

Летом 1975 года здесь последовательно на одной линии образовались три молодых вулканических конуса высотой от 150 до 300 м. (Рис.2) Образование каждого из конусов СП предварялось интенсивной сейсмической подготовкой [6, 9]. Преобладающие глубины предшествовавших появлению конусов землетрясений имели тенденцию к уменьшению со временем, изменяясь от 20 до 0 км. Разброс эпицентров не укладывается в узкую полосу вдоль раскрывшихся позднее трещин СП в пределах ошибок определения. Это свидетельствует о том, что изменение поля напряжений и разрушение горного массива, сопровождаемое землетрясениями, происходило в значительном объеме, а не только под питающей извержение трещиной. В период извержения на этой линии наблюдались значительные вертикальные смещения: до 2.5 м. Таким образом, в районе СП происходило интенсивное образование даек – внедрение магмы по трещинам в наиболее ослабленных зонах. Для СП БТТИ средняя толщина дайки при внедрении оценена в 1 м [6].

В ходе извержения происходила перестройка его выводных каналов. Начальные трещины в течение нескольких часов или дней заменялись жерлами, над которыми росли шлаковые конусы. По существующим представлениям такая замена столь же быстро должна происходить на глубинах до нескольких километров. Судя по размерам основания компактных струй извержения, жерла конусов СП имели форму уходящего вглубь круглого конуса с диаметром основания около 50 м и вертикальным размером около 2 км (именно на такой глубине начинается «всплытие» магм при базальтовых извержениях [6]). Прекращение деятельности конусов закономерно связано с перестройкой их питающих каналов. В открытом округлом жерле магма может подняться на ограниченную высоту. Когда жерло достигает некоторой критической глубины, оно закупоривается. Столб лавы высотой около 1 км превращается в тяжелую пробку, останавливающую извержение своим давлением. Затем магма должна образовывать новые выводные трещины. Это и наблюдалось в ходе Толбачинского извержения, когда

после остановки каждого из конусов происходило развитие новой трещины, после чего начинал расти следующий конус. Сложная система даек и закупоривающие жерло столбы магмы и обломков вмещающих пород представляют собой неоднородность, которая может являться источником сейсмической эмиссии.

Избыточные напряжения в прилежащих к СП областях земной коры сохраняется. Об этом свидетельствуют регистрируемые региональной сетью Камчатки поверхностные землетрясения из этого района. Во время проводимых здесь работ по регистрации поля микросейсм удавалось записать и слабые местные землетрясения ( $K_s=4.0-4.4$  и ниже) с  $T_{s-p}=1-4$  с.

Таким образом, в области СП сохраняется сейсмическая, геотектоническая и геохимическая активность. Все это наряду с высокой неоднородностью и раздробленностью среды предполагает наличие здесь высокой эмиссионной активности. Немаловажным является и то, что значительная удаленность района извержения от населенных пунктов гарантирует регистрацию естественного сигнала, не загрязненного антропогенными помехами. Исследуемый объект доступен: туда может проехать транспорт с достаточно высокой проходимостью. К конусам Северного прорыва примыкают относительно ровные участки местности, где можно разместить сейсмическую antennу и соединить ее датчики проводами с единым накопителем информации.

В 1991 году был подготовлен первый полигон для работы 9-канальной сейсмической группы между III конусом СП и голоценовым конусом Алаид (рис. 2). Положение точек регистрации определялось теодолитом. Расстановка равномерная: это квадрат со стороной 1 км, расстояние между датчиками - 500 м. Датчики устанавливались на шлакоблоках, заглубленных в грунт с целью устранения ветровой помехи. Была проведена пробная регистрация. Данные воспроизводились в лабораторных условиях. Отрабатывались методические аспекты ведения расчетов с использованием полученных записей.

Параметры регистрации:

- чувствительность канала 5 нм/с
- динамический диапазон 72 дБ
- частотный диапазон 0.5-20 Гц
- дискретизация 1/64

Повторные registrations были проведены на этом полигоне в 1992 и 1994 гг. Использовался тот же комплекс аппаратуры.

В 1994-1995 гг. в лаборатории велась работа по внедрению использования цифровой записи данных в полевых условиях. С этой целью аналоговый регистратор был заменен цифровым регистратором «Крот» производства НПО «Берег». Регистратор «Крот» представлял собой компьютеризированный комплекс на основе микропроцессора 1806ВМ2. В составе регистратора имелся 10-разрядный 16-канальный аналогово-цифровой преобразователь. Данные записывались на дискету 1.5 Мб. Пробная регистрация с использованием этого цифрового накопителя была проведена в 1995 году. Однако малая разрядность АЦП не позволила обеспечить приемлемый динамический диапазон регистрации. Кроме того, малый объем постоянной памяти (гибкая дискета) позволял проводить регистрацию только весьма короткими фрагментами. В связи с вышеизложенными факторами материалы наблюдений не удалось довести до получения результатов.

В 1995 году был размечен и подготовлен к проведению работ второй полигон для 16-канальной антенны (рис.2) к востоку от цепочки молодых конусов. Расстановка равномерная по квадрату, расстояние между датчиками 500 м. Полигон также был размечен с помощью теодолита. Датчики устанавливались как и на первом полигоне.

В сентябре 1996 году был наш последний выезд в район БТТИ. Запись удалось провести на обоих полигонах. В качестве регистраторов использовались цифровые накопители японского производства DataMark LS8000SH, имеющих 16-разрядное аналогово-цифровое преобразование. На каждый такой регистратор велась запись 4-х

каналов. Синхронизация данных обеспечивалась наличием внутренних таймеров накопителя, имеющих коррекцию хода от сигналов GPS. Были отработаны методические аспекты ведения многоканальной цифровой регистрации в полевых условиях. Запись велась с частотой дискретизации 100 Гц.

В 1998 году работы по регистрации микросейсмического излучения были проведены в районе Мутновского месторождения парогидротерм. Месторождение расположено у подножья Мутновского вулкана на высоте 800-900 м на участке пересечения крупного тектонического шва северо-восточного простирация и широкого грабена, образованного системой субмеридиональных сбросов. Здесь же проходят разломы северо-западного простирания и неявно выраженная на местности система широтных нарушений. Этот уникальный по сложности дробления блоковый узел создает условия, благоприятные для локализации парогидротерм [7]. Главной отличительной особенностью парогидротерм является двухфазное (пар и вода) состояние теплоносителя в очаге разгрузки. Перегретые воды вскипают на глубине. На уровне вскипания происходит пароотделение, дегазация, резкое падение температуры. Деятельность парогидротерм сопровождается сложными физико-химическими процессами. Ниже зоны вскипания происходит ощелачивание гидротерм, а выше образуется «паровая шапка», в которой идут процессы формирования кислых агрессивных вод. Характер циркуляции Мутновского месторождения парогидротерм трещинно-жильный на всю исследованную глубину месторождения, при этом наиболее обводненные участки связаны с зонами повышенной тектонической трещиноватости.

Расстановка сейсмической антенны была ориентирована непосредственно на исследование шумового сигнала из областей среды, примыкающих к Северо-Восточной продуктивной зоне с юго-запада (рис. 8). Эта продуктивная зона контролируется 4 скважинами и Верхне-Мутновскими естественными термопроявлениями [21]. Она имеет СВ простижение и ЮВ падение на 60°. Моделирование температурного поля на основе измерений температуры в призабойных частях скважин указывает на возрастание температуры с 240-260°C на глубине 600 м до 300°C на глубине около 1500 м. Мощность продуктивной зоны 0.6-1.0 м. Здесь была развернута 16-канальная антenna, состоящая из вертикальных сейсмометров. Использовались цифровые накопители типа "Datamark" LS800. Запись велась с частотой дискретизации 100 Гц. Расстановка не была эквидистантной из-за особенностей рельефа, но расстояние между датчиками выдерживалось в пределах 300-350 м. Антenna представляет собой неправильный четырехугольник, она разбита на относительно плоском участке высокогорной каменистой тундры, максимальная разница высот между датчиками – 120 м. Координаты точек регистрации определены с помощью спутниковых приемников GPS.

В 1999 году исследования с помощью сейсмической антенны были проведены в районе Начикинского месторождения термальных вод. Антenna имела кольцевую конфигурацию. Работы были ориентированы на исследования записей местной сейсмичности и микросейсмичности для проектирования здесь в перспективе мало-базовой сейсмической группы. Полученный материал был использован также для выделения наиболее шумящих объемов среды методом эмиссионной томографии. Исследуемый район принадлежит к долгоживущей глубинной разломной зоне северо-западного простирания, пересекающей южную часть п-ва Камчатка. На ранних этапах с ней связано внедрение цепочки крупных интрузивных тел и интенсивная палеогеново-неогеновая гидротермальная деятельность. С разрывными нарушениями генетически связано образование разновозрастных интрузий и лавовых излияний. Одно из крупнейших интрузивных тел - г. Начикинское Зеркальце - расположено в непосредственной близости от участка регистрации и попадает в область сканирования. Это интрузия миоценового возраста, интрузивные породы представлены гранодиоритами и кварцевыми диоритами и имеют сильно трещиноватую структуру. Начикинское месторождение термальных вод расположено в долине реки Плотникова в непосредственной близости от склона интрузии г. Зеркальце Начикинское. Месторождение

относится к низкотемпературным ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ ). Отличительная черта гидротермальных систем этого типа – медленное нарастание температуры с глубиной и низкие температуры в недрах (значительно ниже температуры кипения при нормальном гидростатическом давлении). Водовмещающими являются непроницаемые породы, которые пересечены относительно изолированными трещинами и зонами дробления, по ним и происходит циркуляция теплоносителя. Основная часть разгрузки осуществляется за счет выходов термальных вод. Термальная площадка Начикинского месторождения занимает участок размером  $200 \times 75$  м. Бурение здесь проводилось до глубины 320 м, откуда поступает вода с температурой около  $81^{\circ}\text{C}$ . Расчетная температура на глубине 1500 м достигает  $96^{\circ}\text{C}$ . Гидротермальную деятельность, по-видимому, вызывают тепловые аномалии, приуроченные к активизированным разломным зонам, что является следствием самостоятельного глубинного процесса. Конфигурация сейсмической группы представлена на рис.11-а: станция 1, расположенная в центре группы; 1-3 – станции малого кольца с радиусом 0.5 км; 4-9 – станции большого кольца с радиусом 2 км. Одновременно работала станция 10 в штольне, расположенной на интрузивных породах г. Зеркальце Начикинское. Расстояние от установленной в штольне станции до центра сейсмической группы около 4 км. Для пространственной привязки точек наблюдения использовались приборы GPS. Все сейсмометры были размещены в шурфах на глубинах от 1.1 м до 1.6 м на плотных породах ледниковых и речных отложений.

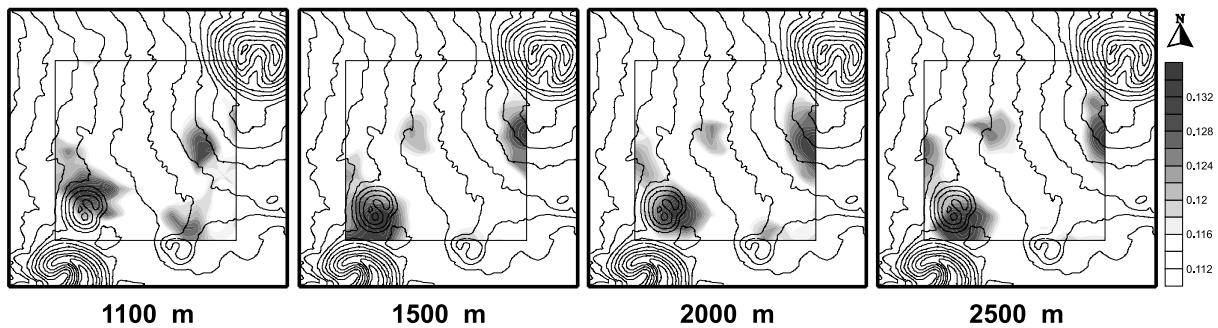
### Результаты работ и их обсуждение

#### *Район Северного прорыва БТТИ.*

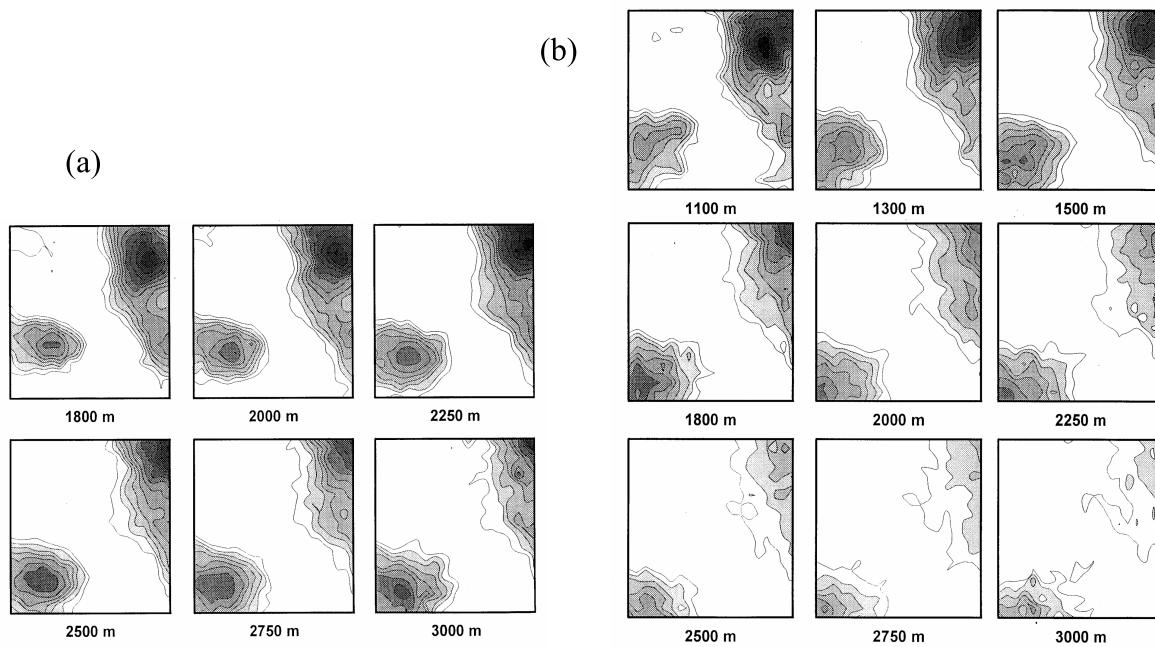
Ниже представлены результаты, полученные по материалам разных лет. Схема расположения сейсмических антенн показана на рис.2. На приводимых рисунках S-карты сканируемого объема наложены на топографическую схему прилежащей территории для возможности сопоставления результатов расчетов с положением вулканических конусов. На изображениях показаны значения параметра, превышающие порог детектирования, что соответствует для 9-канальной антенны  $S > 0.12$  и  $S > 0.063$  для 16-канальной антенны.

По материалам 1992 года удалось показать, что под III конусом Северного прорыва существуют области, обладающие микросейсмической активностью (рис. 3). Для частотного диапазона 6-12 Гц эти области проявляются на глубинах 50-225 м для продольных и поперечных волн. Для частотного диапазона 3-6 Гц для продольных волн источники сигнала выявлены на глубинах 50-320 м и 1100-2500 м, для поперечных волн – на глубинах 2000-3000 м. Расчеты проводились для участков шума длиной до 200 сек.

Регистрация, проведенная в 1994 году, совпала с периодом активизации Ключевского вулкана, находящегося примерно в 45 км от Северного прорыва БТТИ. Наблю-



**Рис. 3.** Распределение интенсивности микросейсмического излучения (S-карты) Аномалия под III конусом БТТИ. 1992 год, частотный диапазон 3-6 Гц, Фокусировка по продольным волнам.



**Рис. 4.** Разрезы сканируемого объема, проходящий через III конус Северного прорыва в меридиональном направлении. Аномалия под III конусом. 1996 год, частотный диапазон 6-12 Гц.

Фокусировка: а -по продольным волнам, б – по поперечным волнам.

**Fig. 4.** The vertical cuts of scanning volume passing through III cone of Northern vent in longitude direction.

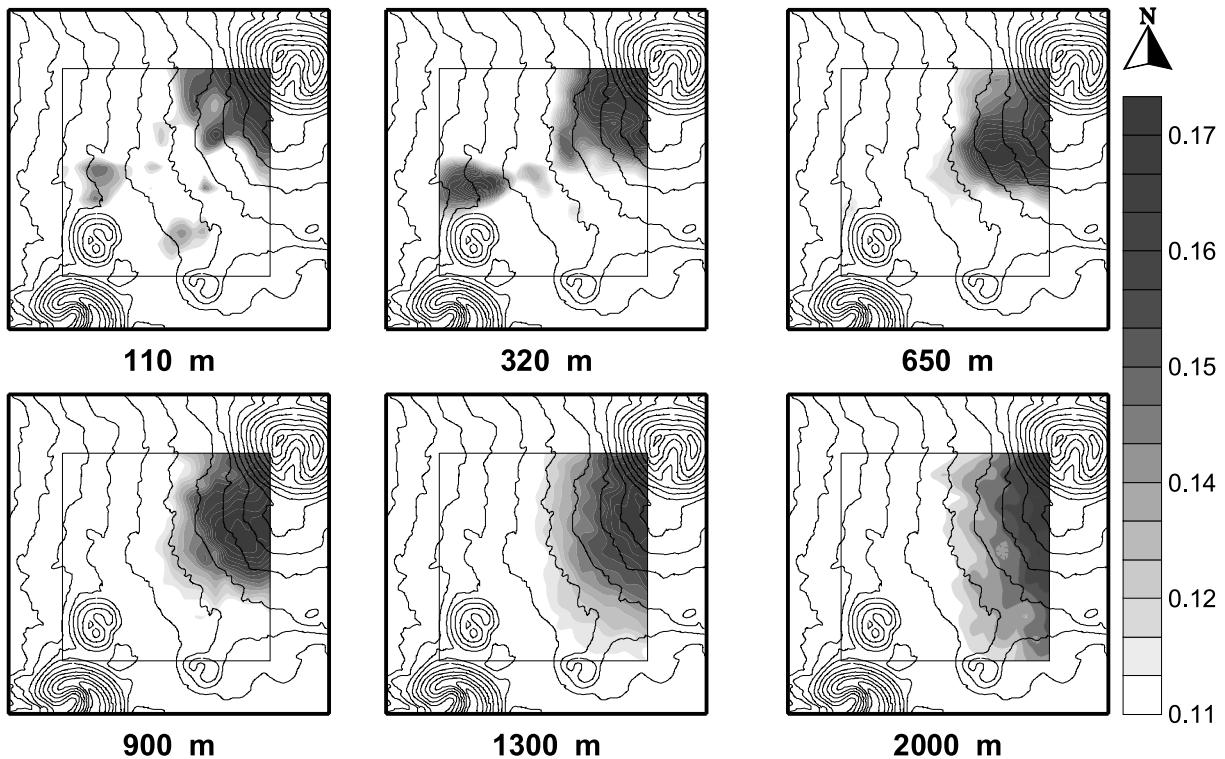
Focusing by the longitudinal (a) and transverse (b) waves separately.

далось интенсивное вулканическое дрожание, фиксируемое антенной. В этих условиях происходит активизация среды под воздействием проходящих волн вулканического дрожания. Ярко выявляются источники излучения, совпадающие в плане с III конусом и конусом Алайд (рис.4). Этот результат получен для продольных и поперечных волн с частотой 3-6 Гц в диапазоне глубин 1100-3000 м. Подтверждается возможность “накачки” среды внешним воздействием, которое приводит к переизлучению сейсмической энергии неоднородностями земной коры.

При обработке материалов, полученных в 1996 году на северном полигоне, где разбита 9-канальная антenna, выделены шумящие неоднородности под III конусом Северного Прорыва и конусом Алайд. Это согласуется с результатами, полученными на этом полигоне в 1992 и 1994 гг. Интересно, что источники, выявленные в 1996 г., разнесены по частотным диапазонам: в окне 3-6 Гц выделяется аномальная зона излучения, связанная с положением конуса Алайд (рис. 5), а в диапазоне 6-12 Гц - с III конусом (рис. 6).

Таким образом, при сравнении результатов нескольких последовательных регистраций на первом полигоне выделяются области аномального эмиссионного излучения, связанные с неоднородностями среды под шлаковыми конусами. И хотя источники излучения как бы мерцают, изменяя свое положение по глубине, сохраняется соответствие зон наибольшей интенсивности эмиссии именно областям среды под вулканическими постройками. Наличие процесса разрушения под III конусом Северного прорыва подтверждают зарегистрированные антенной микроземлетрясения, для которых удалось оценить положение эпицентров [10].

В 1996 году на втором полигоне в районе I конуса Северного прорыва проводилась регистрация 16-канальной антенной. Для волн частотного диапазона 3-6 Гц на глубинах 450-650 м выделяется шумящая область, совпадающая в плане с положением I конуса (рис. 7). При сканировании более глубоких горизонтов источники когерентного



**Рис. 5.** S-карты. Аномалия под конусом Алайд. 1996 год, частотный диапазон 6-12 Гц. Фокусировка -по продольным волнам (по поперечным волнам – аналогичный результат).

**Fig. 5.** S-maps. Anomaly under cone Alaid. 1996, 6-12 Hz. Focusing by the longitudinal waves. (by the transverse waves – the same image).

сигнала широкой полосой смещаются под цепочку шлаковых конусов, лежащих вдоль западной границы сканируемой области.

Наиболее информативными являются сигналы частотного диапазона 3-6 Гц, так как не учитываемые скоростные неоднородности наиболее ощутимо искажают результат для высокочастотной части спектра волнового поля.

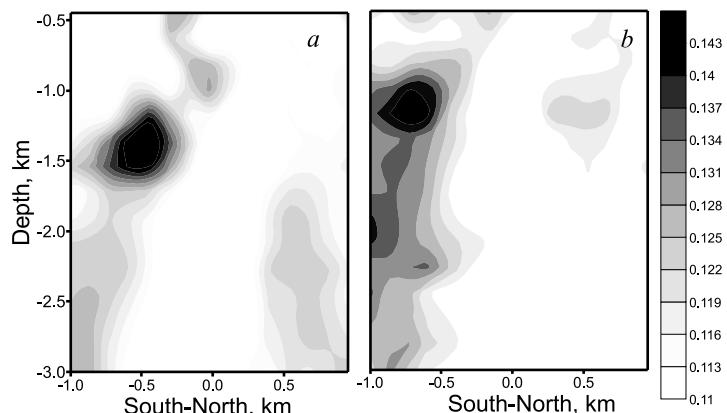
Наличие под конусами источников микросейсмического излучения нельзя объяснить лишь влиянием давления вулканических построек на среду. Предполагая, что разрушение материала определяется максимальными касательными напряжениями, можно оценить глубину, на которой наблюдается наиболее неблагоприятная ситуация в случае воздействия на полупространство равномерной нагрузки внутри круговой

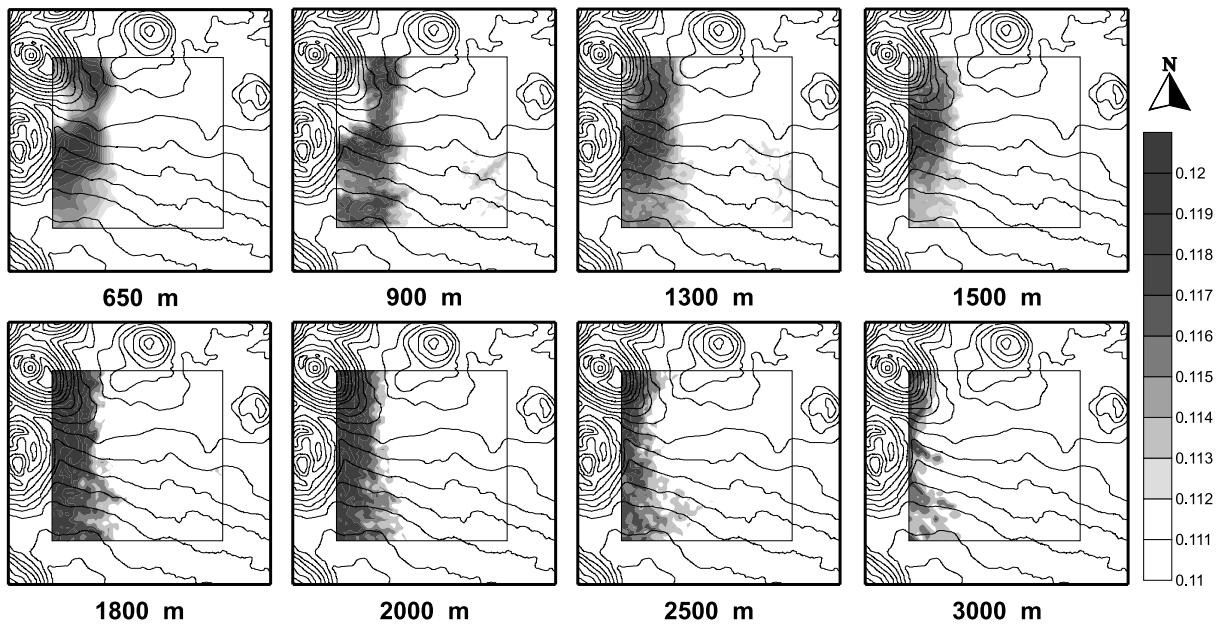
**Рис. 6.** S-карты, полученные в период интенсивного вулканического дрожания, предварявшего извержение Ключевского вулкана (октябрь 1994 года).

Частотный диапазон – 3-6 Гц. Аномалии в районе конуса Алайд и III конуса Северного прорыва БТТИ. Фокусировка: а – по продольным волнам, б – по поперечным волнам.

**Fig. 6.** S-maps. Simultaneous activation under III cone and Alaid cone by volcanic tremor of Kluchevskoy vol. 1994, 3-6 Hz.

Focusing by the longitudinal (a)and transverse (b) waves separately.





**Рис. 7.** Распределение параметра  $S$ , полученное на полигоне в районе I конуса БТТИ. 1996 год, частотный диапазон 3-6 Гц,  $S$  волны Фокусировка -по продольным волнам (по поперечным волнам – аналогичный результат).

**Fig. 7.** S-maps for array near I cone of Northern vent. (1996, 3-6 Hz, S-waves). Focusing by the longitudinal waves. (by the transverse waves – the same image).

области данного радиуса [15]. Максимальные касательные напряжения для точек, расположенных на вертикальной оси, достигаются на глубине, равной около 2/3 радиуса нагруженного круга. Радиус молодых вулканов Северного прорыва БТТИ 300-600 м. Полученные результаты говорят о микроразрушении среды под конусами на гораздо больших глубинах, чем следовало бы ожидать в случае разрушения под действием веса этих объектов. Однако эту причину не следует исключать из рассмотрения: в случае молодого вулкана речь идет о значительной неоднородности среды под его постройкой. Система «конус – столб закупорившей жерло лавы» может рассматриваться как единое целое, усложняя механизм механического воздействия на среду, в особенности этот эффект может проявляться при прохождении интенсивных волн от внешнего источника.

Таким образом, в ходе работы установлено, что используемая методика энергетического сканирования позволяет выявить в среде активные излучающие структуры, соответствующие основным геологическим элементам исследуемого района. Выявленные источники микросейсмической эмиссии могут быть связаны с системой даек и магматическими пробками в жерлах под конусами, с подъемом газа по трещинам, с химическими процессами или температурными аномалиями. Возможно также постепенное разрушение жерла при проседании среды под влиянием веса вулкана. Эти явления вполне могут приводить к генерации слабого эмиссионного сигнала, так как связаны с изменением объема и трещиноватости. Результаты показывают перспективность применения шумовой сейсмотомографии в активных вулканических областях для исследования структурных неоднородностей и их динамики

#### *Мутновское месторождение парогидротерм.*

Схема расстановки антенн показана на рис. 8. На рис. 9-а, б представлены полученные в результате расчетов вертикальные разрезы в меридиональном направлении. Первый разрез строился для восточной границы области сканирования, следующие – с шагом 150 м в западном направлении (рис. 8). Более темный цвет соответствует большей интенсивности излучения. Эти изображения, сформированные на основе расчетов по полю микросейсм, соответствует областям, генерирующими сейсмический сигнал.

**Рис. 8.** Схема расстановки сейсмической антенны в районе Верхне-Мутновского участка Мутновского геотермального месторождения (изогипсы поверхности продуктивных зон приведены для  $H=1000$  м по [21]).

- 1 — Верхне-Мутновские термопроявления;
- 2 — датчики сейсмической антенны;
- 3 — изотермы,  $H=-1000$  м;
- 4 — область сканирования;
- 5 — линии вертикальных разрезов;
- 6 — скважины, контролирующие Северо-Восточную продуктивную зону.

**Fig. 8.** Seismic array pattern, Verkhne-Mutnovsky site of Mutnovsky hydrothermal field, temperature distribution for the elevation  $-1000$  m [21], production zone and wells location.

- 1 — Verkhne-Mutnovsky natural steam manifestations;
- 2 — sensors of seismic array;
- 3 — isothermal lines ( $H=-1000$  m);
- 4 — area of scanning;
- 5 — lines of vertical cuts;
- 6 — wells controlling North-East production zone.

Вертикальные разрезы обобщают результаты независимых расчетов для набора изолированных в пространстве плоскостей и иллюстрируют распределение интенсивности излучения по глубине для последовательных вертикальных срезов. При анализе разрезов видно, что источники излучения продольных и поперечных волн разнесены в пространстве. Наиболее активная область, являющаяся источником излучения продольных волн, расположена ближе к поверхности, чем аномалия, излучающая поперечные волны. Аномалия имеет сложную конфигурацию. При продвижении с востока на запад, к центральной части сканируемого объема, интенсивность излучения заметно ослабевает.

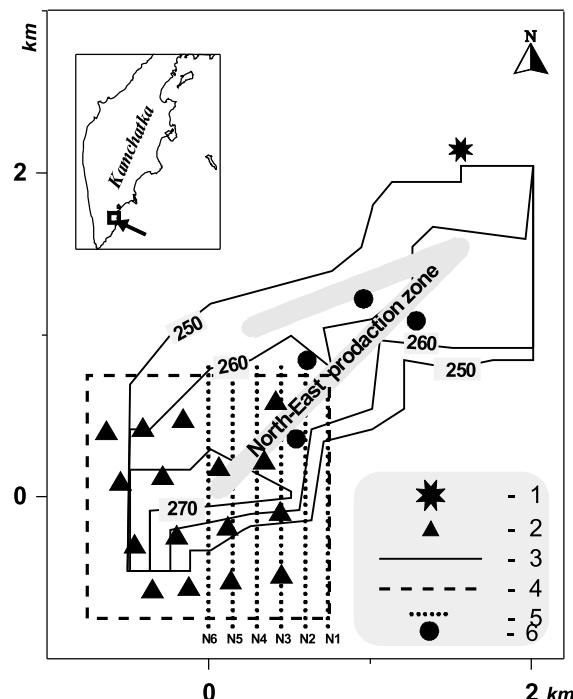
Выявленные зоны повышенных значений параметра  $S$  связаны с Северо-восточной продуктивной зоной Верхне-Мутновского участка геотермального месторождения. Расстановка антенн ориентирована таким образом, что продуктивная зона входит в сканируемый объем с востока, она имеет СВ простижение и ЮВ падение на  $60^\circ$  и должна прослеживаться примерно до середины исследуемой области. Однако выделяемые исследователями в пределах Мутновского месторождения продуктивные зоны, во-первых, условно изолированы, являясь частью более протяженных площадных термальных аномалий; во-вторых, их проявления связаны с наиболее сложными раздробленными зонами пересечения систем крупных разломов. Поэтому в общем случае следует ожидать, что выявляемые в результате исследований аномальные зоны

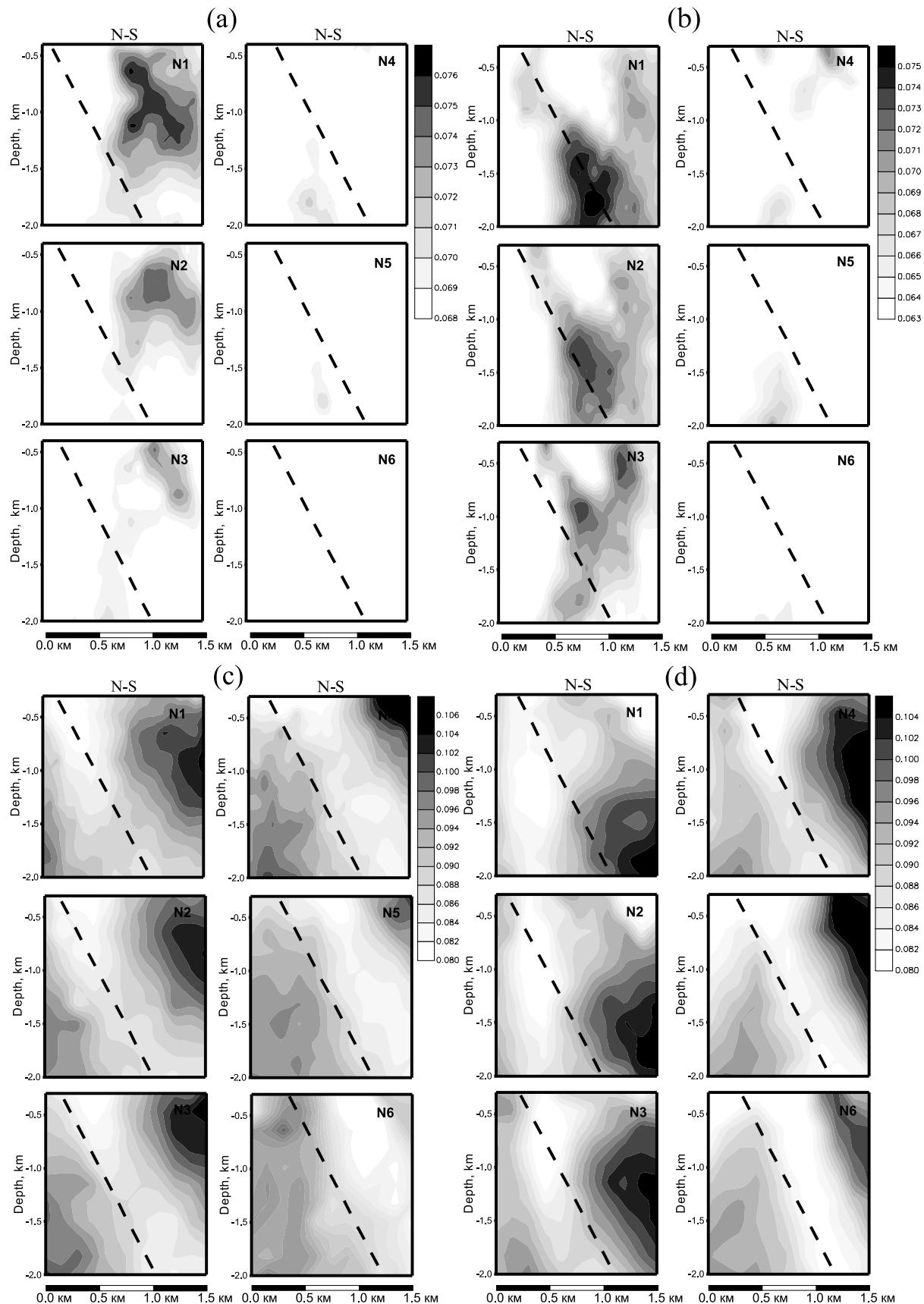
**Рис. 9.** Распределение интенсивности микросейсмического излучения в серии последовательных меридиональных вертикальных разрезов в районе Верхне-Мутновского участка Мутновского месторождения парогидротерм (линии разрезов см. на рис. 7).

Фокусировка: а) — по продольным волнам, в) — по поперечным волнам. Распределение интенсивности источников шумового излучения, инициированного сейсмическими волнами от удаленного землетрясения, приведен ряд последовательных меридиональных вертикальных разрезов сканируемой области. Фокусировка: с) — по продольным волнам, д) — по поперечным волнам. Пунктиром отмечено положение продуктивной зоны гидротермального месторождения по [21].

**Fig. 9.** The distribution of seismic emission intensity for the series of the vertical cuts. Focusing by the longitudinal (a) and transverse (b) waves separately. The dot line — North — East production zone of Mutnovsky steam-hydrothermal field [21]. A most active volume of radiation is related to the NE production zone. The distribution of seismic emission intensity for the series of the vertical cuts during passage of the waves from far earthquake.

Focusing by the longitudinal (c) and transverse (d) waves separately. In this case the medium volumes adjoining to the production zone are emitted stronger than the production zone itself.





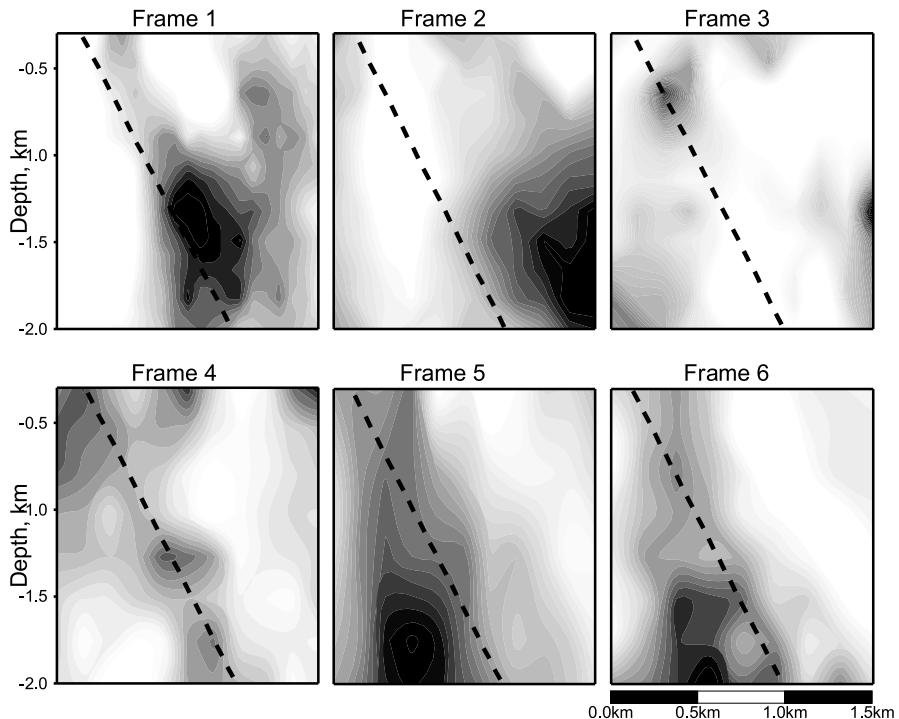
сейсмического излучения могут отражать не только процессы, связанные с продуктивными зонами высокотемпературных парогидротерм, но и быть результатом высвобождения энергии в сложной разломной зоне, что усложняет структуру аномалий и их интерпретацию.

Аномалия, рассчитанная по поперечным волнам, совпадает с плоскостью продуктивной зоны. Следует отметить, что наибольшие значения параметра наблюдаются с увеличением глубины, аналогичная тенденция выявлена для распределения температуры с глубиной по данным контролирующих эту продуктивную зону скважин. Наиболее яркие источники излучения, полученные по расчетам для продольных волн, располагаются несколько выше, непосредственно над продуктивной зоной (над областью с максимальными значениями относительной интенсивности излучения для поперечных волн и, соответственно, максимальных температур). Это не связано с разницей в скоростях для продольных и поперечных волн, в данном случае зона источников более низкоскоростных поперечных волн лежит на большей глубине, чем аномалия, выявленная по продольным волнам.

Природа разнесения в пространстве источников продольных и поперечных волн связана с тем, что двухфазное (вода-пар) состояние теплоносителя согласно математическому моделированию и по данным бурения наблюдается, начиная с глубины около 1000 м. Более глубокие скважины вскрывают резервуар с хлоридными водами высокой температуры. Процессы в зоне вскипания перегретых вод и движения двухфазного теплоносителя являются причиной возникновения источников продольных волн в регистрируемом волновом поле. Пульсации давления в теплоносителе и их взаимодействие с бортами продуктивной зоны приводят к появлению ярко выраженной зоны – источника преимущественно продольных волн в верхней части исследуемого объема, через который проходит продуктивная зона парогидротерм.

Распределение активных источников в пространстве согласуется с модельным полем температур вокруг продуктивной зоны. Интенсивность излучения увеличивается с глубиной, как и температура в призабойных частях контролирующих зону скважин.

Во время работы антенных примерно в 200 км от Мутновского геотермального месторождения произошло землетрясение, имевшее энергетический класс  $K=9.7$  ( $f_i=54.0^\circ\text{C.ш.}$ ,  $l_a=161.47^\circ\text{в.д.}$ ,  $h=11$  км). Это достаточно слабое событие, но порожденные им сейсмические волны могут оказывать инициирующее воздействие на среду в интересующем нас районе. Землетрясение записано сейсмической антенной. Для выявления в среде источников излучения, которые могли быть возбуждены проходящим волновым полем, запись этого землетрясения была включена в обработку. Для участка коды были произведены расчеты S и были построены изображения, аналогичные описанным выше (рис. 9-с,d). При прохождении через исследуемую среду волн от удаленного землетрясения распределения в пространстве источников, полученные для независимых расчетов по продольным и поперечным волнам, практически совпадают. На полученных изображениях даже фоновые значения параметра превышают порог детектирования. Это говорит о том, что вся область сканирования при прохождении внешних волн активизируется, появляются источники микросейсмического излучения. При этом на разрезах проявляется область аномально низкого излучения, совпадающая в пространстве с положением продуктивной зоны, она имеет северо-восточное простирание и падение на юго-восток. Наиболее интенсивно активизируются области, прилегающие к продуктивной зоне, они находятся в условиях высоких градиентов температур и активных химических процессов. Здесь накапливается значительное количество энергии, которая высвобождается в виде микросейсмического излучения среды при внешнем инициирующем воздействии. Сама же продуктивная зона, имеющая повышенную проницаемость и пронизанная системой макротрещин, излучает относительно слабее. По-видимому, она находится в условиях, не позволяющих накапливать напряжения, и поэтому излучение и высвобождение энергии за счет спонтанного микроразрушения проходит без внешнего воздействия.



**Рис. 10.** Изменение распределения источников излучения в пространстве, вызванное прохождением волн от землетрясения, удаленного от антennы примерно на 200 км. Приведены вертикальные разрезы для различных моментов времени, фокусировка по поперечным волнам. Пунктиром отмечено положение продуктивной зоны гидротермального месторождения.

Кадр 1 – Осредненное по нескольким кадрам записи распределение источников излучения, полученное до момента землетрясения. Кадр 2 – Распределение интенсивности источников шумового излучения, инициированного сейсмическими волнами от землетрясения. Кадры 3–6 – Восстановление распределения источников излучения, ассоциирующихся с Северо-Восточной продуктивной зоной парогидротерм, соответственно через 2 мин., 10 мин., 20 мин., 30 мин. после прохождения волн землетрясения.

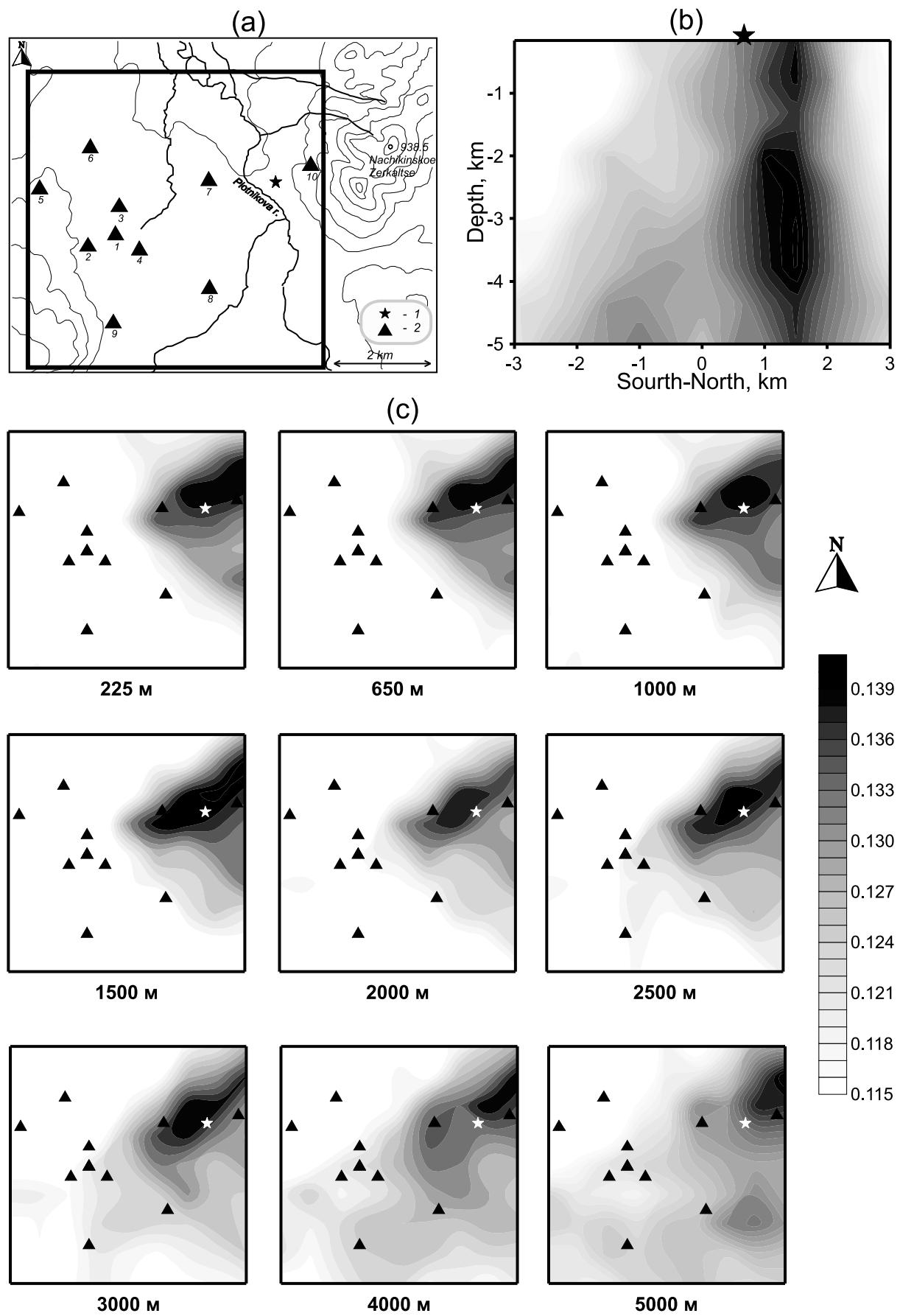
**Fig. 10.** Change of the emission sources distribution induced by the passage of far earthquake waves. The vertical cuts for the various moments of time are given. (Focusing by the transverse waves).

Frame 1 – The distribution of the radiation sources before the moment of earthquake. Frame 2 – The distribution the radiation sources initiated by seismic waves from earthquake. Frames 3-6 – Reconstruction of the sources distribution through 2 min., 10 min., 20 min., 30 min. after earthquake waves passage accordingly.

На рис.10 приведены результаты расчетов распределения параметра S в различные моменты времени: непосредственно перед землетрясением, по участку коды землетрясения и через некоторое время после землетрясения. Эти изображения иллюстрируют изменение картины распределения источников излучения при прохождении волн от землетрясения и постепенное ее восстановление в течение нескольких минут. Восстанавливаются основные элементы изображения, ассоциирующиеся с Северо-Восточной продуктивной зоной месторождения: интенсивность излучения этого объекта вновь максимальна. Этот пример показывает возможность мониторинга источников эндогенного излучения при изменении внешних условий.

#### *Начикинское месторождение термальных вод.*

На рис. 11-б,с представлены результаты расчетов: распределение S в горизонтальных сечениях для различных глубин и меридиональный вертикальный разрез сканируемой области, плоскость которого проходит через зону поверхностной разгрузки Начикинского гидротермального месторождения (рис. 11-а). На изображениях выделяется доминирующая по интенсивности излучения область, занимающая восточный сектор



**Рис. 11.** а - Схема расположения регистрирующих станций в районе Начикинского месторождения термальных вод. Участок сканирования отмечен квадратом.

Распределение интенсивности микросейсмического излучения, полученное для района Начикинского месторождения термальных вод: б) - в вертикальной меридиональной плоскости, проходящей через термальную площадку месторождения; в) - в горизонтальных сечениях сканируемой области. 1 - термальная площадка, 2 - однокомпонентные сейсмические станции.

**Fig. 11.** a – scheme of seismic array location in the area of Nachikinsky hydrothermal field. Scanned area is marked as square, b - vertical cut of scanning volume passing through natural thermal manifestations, c – S-maps. 1 - hydrothermal occurrence, 2 – seismic stations.

исследуемого пространства. Пространственно эта область тяготеет к внедряющейся в сканируемый объем с востока интрузии - г. Зеркальце Начикинское. Тенденция повышенного относительно фонового уровня сейсмического шума, излучаемого значительно трещиноватыми породами интрузии, с глубиной сохраняется. На первых трех изображениях прослеживается простижение аномалии, совпадающее с северо-западным направлением основной геолого-тектонической структуры района - разломом долины реки Плотникова. Наиболее интенсивная аномалия находится в северо-восточной части рассматриваемой области. Максимальный уровень ее излучения наблюдается на глубинах 2-4 км. При изменении глубины положение аномалии в пространстве остается стабильным. Ее можно соотнести с положением термальной площадки гидротермального месторождения. Выход термальных вод на поверхность соответствует наиболее трещиноватым, раздробленным зонам вмещающих пород, и наблюдалась в этом месте аномалия соответствует существующим представлениям о повышенном излучении среды именно в зонах нарушений.

При этом максимальная аномалия интенсивности микросейсмического излучения совпадает в плане с отрицательной магнитной аномалией, выделенной здесь по данным исследований естественного геомагнитного поля. Магнитная аномалия может быть связана как со скрытым интрузивным телом, возможность существования которых в этом районе подтверждается геологическими данными, так и с погребенным под рыхлыми осадочными отложениями полем гидротермально измененных пород, связанных с эволюцией месторождения. Если говорить о гидротермально измененных породах, то можно предположить, что область подвергшихся в прошлом изменению пород выявляет древнюю зону повышенной трещиноватости, служившую проводником вод термальной системы, эта зона примыкает к современной гидротермальной площадке. В обоих случаях как магнитная, так и эмиссионная аномалии являются отображением структурной неоднородности района.

Таким образом, полученная аномалия интерпретируется как наиболее раздробленная зона, идущая вдоль границы крупной диоритовой интрузии и служащая проводником термальным водам, что согласуется с существующими представлениями о структурных условиях локализации гидротермальных месторождений.

Следует остановиться на возможных перспективах использования шумовой сейсмотомографии в исследовании геотермальных систем. Проведенная весьма кратковременная регистрация поля микросейсм дала положительные результаты: зона, проводящая к поверхности теплоноситель, и прилежащие к ней области среды являются источниками эмиссионного излучения. Для продуктивной зоны парогидротерм (Мутновское месторождение) это удалось показать как на материале непосредственно поля микросейсм, так и на волновом поле кода-волн от удаленного землетрясения.

Еще более интересные результаты можно ожидать, если в районе месторождения будут организованы долговременные наблюдения сейсмической антенной. Благодаря своей высокой вибро- и тензочувствительности сейсмическая эмиссия чутко реагирует даже на слабое изменение внешних условий. Диагностика состояния окружающего продуктивную зону объема среды и мониторинг, основанный на слежении за эмис-

сионным откликом среды на внешние воздействия, - вот основное направление практического использования антенн в районах высокотемпературной гидротермальной активности. Особое значение эти процессы приобретают в условиях эксплуатации месторождения.

Отрадно, что в нефтегазовой индустрии сейсмоэмиссионной томографии, как одному из методов пассивного сейсмического мониторинга среды, уделяется все большее внимание [2, 22]. Метод применяется для диагностической визуализации гидроразрывов пластов при интенсификации добычи углеводородов и основывается на новейших достижениях в областях разработки средств многоканальной трехкомпонентной широкополосной цифровой регистрации и математического аппарата сейсмоэмиссионной томографии (используется адаптивная поляризационная фокусировка волнового поля с применением техники высокого разрешения [1]).

### **Выводы**

1. В течение 10 лет на Камчатке последовательно проводились специально спланированные исследования, направленные на использование методов и подходов эмиссионной томографии для исследования структурных и динамических неоднородностей среды. Такие работы, доведенные до получения результатов и интерпретации, были выполнены впервые.

2. Выделены аномальные области шумовой активности под молодыми конусами Северного прорыва БТТИ и голоценовым конусом Алаид. Результаты, полученные по материалам разных лет, согласуются между собой: области наибольшей интенсивности излучения сосредоточены под вулканическими постройками, однако их активность проявляется в разное время на разных глубинах. Этот факт говорит о том, что картируемые источники излучения соответствуют реальным объектам (неоднородностям среды) под молодыми вулканическими конусами. Эмиссия может быть связана как с разрушением неоднородностей, так и с геохимической активностью и температурными градиентами в среде под вулканами.

3. Выявленные центры излучения под шлаковыми конусами наиболее ярко проявляются при активизации среды вулканическим дрожанием Ключевского вулкана. Этот факт свидетельствует о возможности "накачки" среды внешним воздействием, которое приводит к переизлучению сейсмической энергии неоднородностями земной коры.

4. Методом эмиссионной томографии проведено картирование источников эндогенного микросейсмического излучения на двух гидротермальных объектах Камчатки: Мутновском месторождении парогидротерм и Начикинских термопроявлениях.

5. Геометрия выявленных аномалий согласуется с:

- данными о пространственном положении структур, проводящих термальные воды к поверхности,
- вертикальным распределением температуры,
- глубиной локализации двухфазного состояния теплоносителя (для парогидротерм).

6. Установлено, что при прохождении волн от удаленного землетрясения происходит перераспределение источников эмиссии в пространстве, что подтверждает высокую чувствительность этого явления к внешним воздействиям.

7. Полученные результаты свидетельствуют о практической реализуемости идей сейсмоэмиссионной томографии в районах вулканической и гидротермальной активности и указывают на перспективность использования этого метода для картирования структурных неоднородностей, исследования поля разрушения и его мониторинга.

*Список литературы*

1. Александров С.И. Поляризационный анализ сейсмических волн. М.: ОИФЗ РАН. 1999. 142 с.
2. Александров С.И., Гогоненков Г.Н., Мишин В.А., Тессман Д. Пассивный сейсмический мониторинг при разработке месторождений углеводородов: новый метод обработки данных. Материалы Международной геофизической конференции “Геофизика XXI века - прорыв в будущее” Москва, 1-4 сентября 2003 г. OS13.
3. Александров С.И., Мирзоев К.М. Мониторинг эндогенного микросейсмического излучения в районе Ромашкинского нефтяного месторождения // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 176-189.
4. Александров С.И., Рыкунов Л.Н. Шумовой мониторинг Южной Исландии. // Докл.РАН. 1992. Т. 326. № 5. С. 808-810.
5. Алексеев А.С., Жердяк Г.Ф., Меерсон А.Е., Хайдуков В.Г., Цибульчик Г.М. Сейсмическая голограмма и фотографирование – методы и результаты работ // Проблемы вибрационного просвечивания Земли. М., Наука, 1977. С. 32-52.
6. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 638 с.
7. Геотермические и geoхимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1986. 208 с.
8. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. 284 с.
9. Горельчик В.И., Зобин В.М., Чубарова О.С. Сейсмичность и динамические характеристики очагов землетрясений в районе Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975-1976 гг // Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 73-98.
10. Кугаенко Ю.А., В.А.Салтыков, В.И.Синицын, В.Н.Чебров Сейсмоэмиссионная томография - исследования Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения // сб. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский, КОМСП ГС РАН, 2000. С. 74-90.
11. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Синицын В.И., Чебров В.Н. Микросейсмическое излучение в районе Мутновского месторождения высокотемпературных парогидротерм (Южная Камчатка). Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. с. 46-59.
12. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Синицын В.И., Чебров В.Н. Локация источников сейсмического шума, связанного с проявлением гидротермальной активности, методом эмиссионной томографии. Физика Земли. 2004. № 2, с. 66-81.
13. Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Метод геофизической разведки. А. с. 1000962 (СССР) // БИ. 1983. № 8.
14. Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами // ДАН СССР. Т. 286. № 3. 1986 г. с. 586-591.
15. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
16. Троицкий П.А. Исследования шумового отклика литосферы на землетрясения. // Проблемы нелинейной сейсмики. М.: Наука, 1987, с. 190-203.
17. Чеботарева И.Я. Использование шумовых сейсмических полей для изучения строения Земли // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М.: 1992. 30 с.
18. Чеботарева И.Я., Николаев А.В., Сато Х. Векторная эмиссионная томография: исследование эмиссионной активности в районе вулканического фронта (Япония) // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. с. 161-175.
19. Шубик Б.М., Киселевич В.Л. Микросейсмическая активность в гидротермальной области и задачи сейсмического мониторинга // Разработка концепции мониторинга природно-технических систем. М.: Российская Академия Наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. 1993 г. 269 с.

20. Шубик Б.М., Киселевич И.Л., Николаев А.В., Рыкунов Л.Н. Микросейсмическая активность в гидротермальной области // Физические основы сейсмического метода. Нетрадиционная геофизика. М.: Наука, 1991. С. 143-158.
21. Kiryukhin A.V., Lesnykh M.D., Polyakov A.Y., Kalacheva E.G. Tough applications to analysis of pressure transient data of Verhne-Mutnovsky geothermal field, Kamchatka // Proceeding of TOUGH Workshop-98. LBNL-41995. 1998. p. 65-70.
22. Maxwell C., Urbancic I. The role of passive microseismic monitoring in the instrumented oil field // The Leading Edge, 2001, V. 20, N 6, p. 636-639.
23. Neidell, N.S. and Taner, F. Semblance and other coherency measures for multichannel data. Geophys. 1971, V. 36, No 3, pp. 482-497.
24. Tchobotareva I.I., Nikolaev A.V., Sato H. Seismic emission activity of Earth's crust in Northern Kanto, Japan // Phys. Earth Planet. Inter. 2000, V. 120. P. 167-182.