

© Чеботарева И.Я.

АЛГОРИТМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ОСЛАБЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ СИГНАЛА

Аннотация. На результатах анализа записей Киргизской широкополосной сейсмической сети (KNET) показана эффективность использования в условиях сильной декорреляции сигнала алгоритма эмиссионной томографии на базе нелинейного формирователя луча. В верхней части земной коры картина распределения яркости в изображении отражает геометрию поверхностного горного рельефа. В переходной зоне кора – верхняя мантия выявлена система тонких вертикальных неоднородностей, интерпретируемых как высокопроницаемые каналы миграции флюида.

Ключевые слова: эмиссионная томография, пассивный мониторинг, сейсмический шум.

© I. Chebotareva

ALGORITHM OF SEISMIC EMISSION TOMOGRAPHY IN WEAK SIGNAL CORRELATION PRESENCE

Abstract. A performance of the algorithm of emission tomography based on nonlinear beamforming in a strong signal decorrelation presence is shown with use of the seismic data recorded by Kirghiz broadband net (KNET). Brightness distribution of an image of the upper part of the Earth's crust corresponds to the ridge relief. The system of narrow vertical inhomogeneities interpreted as very fluid-permeable channels was revealed in the crust-mantle gray area.

Key words: emission tomography, passive monitoring, seismic noise.

Метод эмиссионной сейсмической томографии [4, 586-591] был разработан для локализации источников слабых шумоподобных сигналов, являющихся компонентой сейсмического шума или коды землетрясений и взрывов. От традиционных методов локализации сейсмических источников он отличается тем, что не требует определения времени вступлений сейсмических фаз, поэтому может быть использован при работе с сигналами без четких вступлений, полностью маскируемых шумами, с интерферирующими сигналами от множественных источников. Метод позволяет выделять как зоны активной эмиссии, так и области рассеяния сейсмических сигналов. В результате компьютерной обработки получается трехмерное изображение источников излучения в виде «облака», заполняющего излучающую область среды. В основе алгоритма, описанного в работе [4], лежит процедура линейного формирователя луча (beamforming). Этот алгоритм широко используется в сейсмологии при исследованиях в областях геотермальной, вулканической и сейсмической активности, а также при пассивном мониторинге месторождений углеводородов.

Пространственный масштаб доступного для исследования объема среды зависит от линейного размера регистрирующей группы датчиков: при необходимости изучения больших глубин апертуру приемной группы необходимо пропорционально увеличивать. При увеличении пространственного разнесения регистрирующих приборов, особенно в районах с сильной латеральной неоднородностью среды, корреляция сигнала по группе сильно ухудшается. В данной работе показано, что в таких условиях необхо-

можно использовать модификацию метода эмиссионной томографии на базе нелинейного формирователя луча [6].

Эффективность алгоритма, описанного в работе [6], иллюстрирует натурный тест – результаты локализации источника продольных волн местного землетрясения по записям сейсмической сети с большой линейной апертурой (KNET). Она состояла из 10 трехкомпонентных станций, установленных в местности со сложным горным рельефом в центральном Тянь-Шане вокруг Бишкека. Апертура группы около 250 км, расстояние между ближайшими станциями 50 км, диапазон частот регистрации 0.01-20 Гц. За счет значительной удаленности точек регистрации друг от друга и большой геолого-тектонической неоднородности среды для данной системы регистрации высокочастотные сигналы от местных землетрясений оказываются в значительной степени декоррелированными между каналами. На рис.1 показаны полученные разными способами изображения землетрясения с гипоцентром на глубине 40 км в плоскости источника.

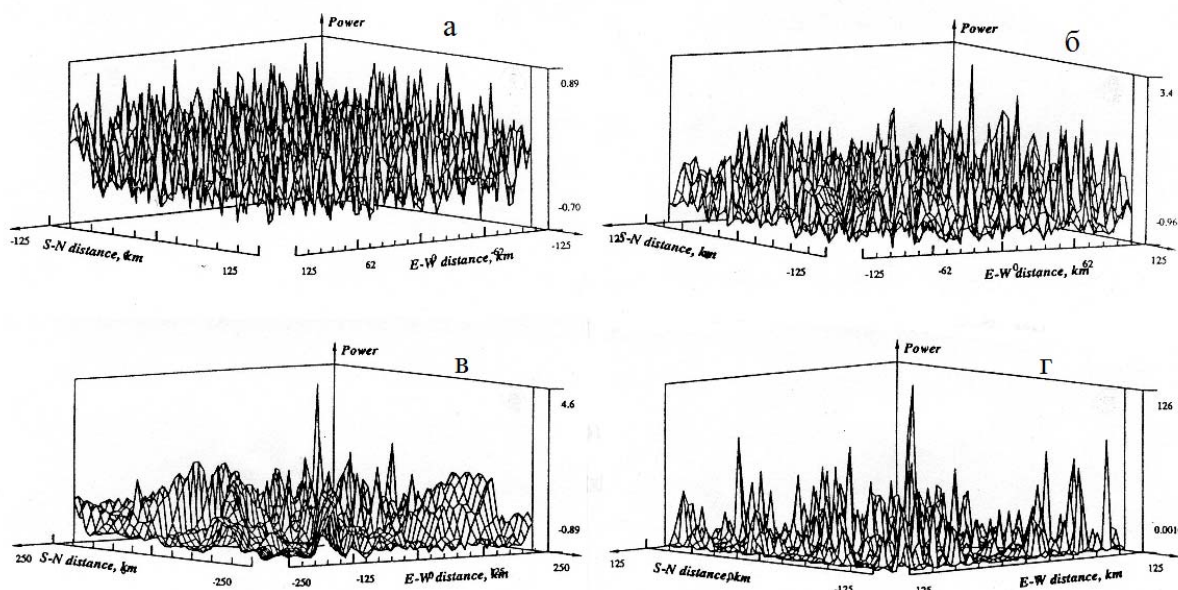
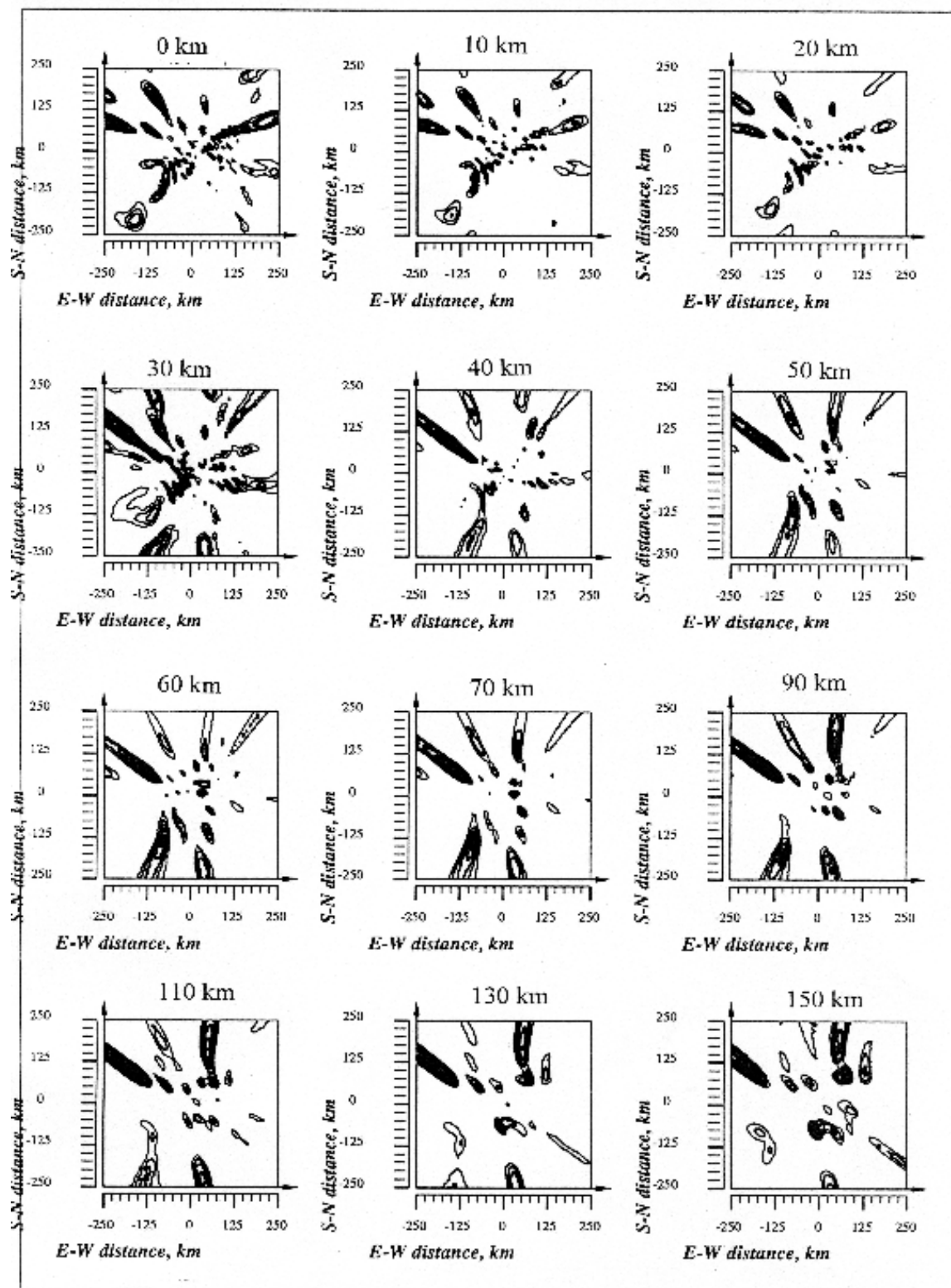


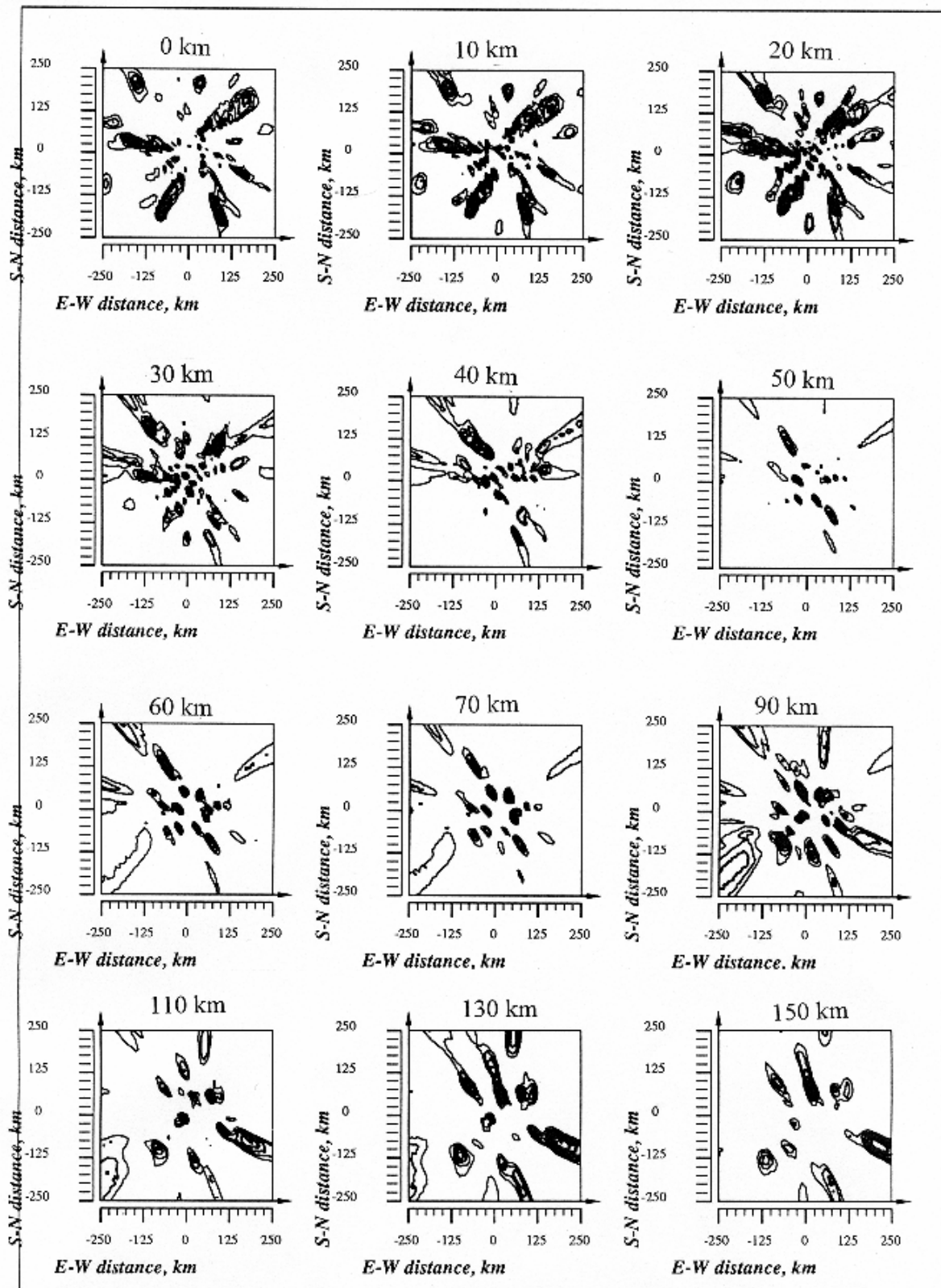
Рис.1. Сейсмоэмиссионные изображения источника землетрясения при использовании различных алгоритмов и диапазонов частот: (а) – алгоритм с линейным формирователем луча, предобработка – частотная фильтрация 3-15 Гц, (б) – то же, предобработка – частотная фильтрация 0,3-2 Гц, (в) – то же, предобработка – частотная фильтрация 0,3-2 Гц и STA/LTA – фильтр, (г) – алгоритм с нелинейным формирователем луча, предобработка – частотная фильтрация 0,3-2 Гц.

Как видно на рис.1(а), в полосе частот 3-15 Гц с помощью алгоритма с линейным формирователем луча положение источника землетрясения выявить невозможно – распределение интенсивности в изображении равномерно. При переходе к более низкому диапазону (0,3-2 Гц), в распределении интенсивности появляется максимум, хотя и весьма нечеткий, рис.1(б). Дополнительная предобработка данных с помощью LTA/STA-фильтра [7, 115-126] существенно улучшает результат, рис.1(в). Физический смысл использованной предобработки – переход от слабокоррелированных высокочастотных волновых форм к высококоррелированным низкочастотным функционалами от регистрируемых сигналов. Использование алгоритма с нелинейным формирователем луча позволяет существенно улучшить результат при локализации источника землетрясения без предобработки данных LTA/STA-фильтром. Соответствующее изображение приведено на рис.1(г) – пик в положении источника становится очень четким и периферический фон вокруг источника подавляется даже в большей степени, чем при использовании LTA/STA-фильтра. Модификация

метода с нелинейным формирователем луча имеет еще одно важное преимущество – она может применяться не только для квазиимпульсных сильных сигналов, когда STA/LTA-фильтр способен выделить четкие вступления определенных фаз сигнала, но и для шумоподобных сигналов и сигналов очень слабых, даже полностью маскируемых шумами.



(a)



(б)

Рис.2(а)(б). Послойные горизонтальные изображения литосферы под сетью KNET по записям (а)-коды местных землетрясений и (б)- сейсмического шума для глубин 0-150 км (продольные волны), предварительная частотная фильтрацией в полосе 0,1-2 Гц.

На рис. 2 показаны результаты, полученные при анализе методом эмиссионной томографии с нелинейным формирователем луча сейсмических записей шума и коды местных землетрясений, зарегистрированных Киргизской широкополосной сейсмической сетью. KNET состоит из небольшого числа регистрирующих станций, но линейные размеры сейсмической сети достаточно велики, чтобы обеспечить хорошее пространственное разрешение при построении изображений литосферы до глубины 150 км. Изображения строились в полосе частот 0,1-2 Гц. Использовалась слоистая скоростная модель среды, состоящая из 9 слоев, со скоростями продольных волн, соответствующих модели M1, приведенной в работе [10, 15, 779-795]. Изображение среды рассчитывалось в виде набора срезов для глубин 0-150 км по площади 500 км X 500 км. Ориентация сторон плоских срезов север – юг и восток – запад, центр привязан к центральному датчику группы ААК.

Как видно из сравнения рис.2(а) и рис.2(б), пространственное положение зон рассеяния сейсмических волн в диапазоне глубин 0-30 км для коды и сейсмического шума весьма схоже и отражает геометрию особенностей поверхностного горного рельефа. На глубинах 50 км-90 км, что соответствует для района исследований переходной зоне кора – верхняя мантия [1], картина пространственного распределения источников изменяется. В центре горизонтальных срезов четко проявляется структура узких вертикально вытянутых неоднородностей, форма которой в плане близка к кольцевой, что особенно хорошо видно на изображениях, построенных по записям шума. На больших глубинах изображение центральной структуры размывается. Отличия изображений для коды местных землетрясений и сейсмического шума связаны с различным характером подсветки – помимо спектральных различий, для шума волновое поле изотропно, а кодовое излучение преобладает со стороны источника.

Известные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности наличия в месте проведения наблюдений интенсивных восходящих флюидных потоков. Так, для центрального Тянь-Шаня характерен расслоенный тип земной коры, характеризующийся наличием волноводов и электропроводящих слоев, чья повышенная удельная проводимость связывается с поступлением горячих растворов из нижних горизонтов через субвертикальные зоны, соединяющие эти горизонты, на геоэлектрическом разрезе прослеживается прогиб электропроводящих структур до глубин более 80 км [2, 1610-1621]. Литосферные скоростные вариации в районе наблюдений, к востоку от Таласо-Ферганского разлома, обусловлены неоднородностью состава или температур [10, 15, 779-795]. Скорость поперечных волн в коре центрального Тянь-Шаня на глубине 10-35 км на несколько процентов ниже, чем за его пределами, а переход от верхней мантии к коре происходит в более широком интервале глубин, что связывается с вертикальной интрузией мантийного материала в кору [8, 4437-4448]. В этом же районе наблюдается аномалия поляризации поперечных волн [9, 144-147], которая может быть объяснена тем, что течение мантии в этом районе отличается от пассивной реакции на сжатие, характерной для западного Тянь-Шаня, и обусловлено наличием восходящей термической аномалии (мантийного плюма) и мелкомасштабной конвективной ячейки.

Анализ вариаций поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в этом районе [3, 808-812] показал, что перед сильными землетрясениями в нижней коре и мантии формируются области повышенного поглощения поперечных волн и существенные временные вариации структуры поля поглощения, что объясняется активной миграцией ювениального флюида в нижней части коры и верхней мантии. Последнее предполагает наличие высокопроницаемых вертикальных каналов, насыщенных флюидом, и мантийных корней разломов. При построении трехмерной скоростной модели земной коры Тянь-Шаня на основе использования времен пробега P- и S-волн от местных и удаленных

землетрясений выявлены такие особенности скоростного строения очаговых зон сильных землетрясений, как волноводы, субвертикальные ослабленные “каналы” и высокоскоростные тела, к которым приурочены очаги сильных землетрясений [5, 1543-1553].

Как следует из вышеприведенных экспериментальных результатов, проявившаяся на изображениях литосферы на глубинах 50 км-100 км кольцевая система квазивертикальных рассеивающих неоднородностей может быть системой высокопроницаемых деструктивных зон, обеспечивающих внедрением мантийного флюида в кору, и, возможно, потоков с обратной направленностью флюида, обеспечивающих перемешивание вещества в коре и мантии. Схожесть на всех глубинах изображений, полученных по шуму и коде, говорит о том, что проявившиеся в обоих случаях детали являются результатом рассеяния распространяющегося сейсмического излучения на латеральных неоднородностях среды.

Автор выражает искреннюю благодарность Соколовой И.Н. (Институт геофизических исследований НИЦ РК, Алма-Ата) за предоставление сейсмических данных, использованных в работе.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Беляевский Н.А. Земная кора в пределах территории СССР. М.: Недра, 1974.
2. Брагин В.Д., Баталев В.Ю., Зубович А.В. и др. О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры центрального Тянь-Шаня и с распределением сейсмичности // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10.
3. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью // Доклады РАН. 2010. Т. 433. N 6.
4. Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами // ДАН СССР. 1986. Т. 282, N 9.
5. Сабитова Т.М., Адамова А.А. Сейсмотомографические исследования земной коры Тянь-Шаня. // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. N 10.
6. Чеботарева И.Я., Рожков М.В., Тагизаде Т.Т., Ерохин Г.Н. Способ микросейсмического мониторинга пространственного распределения источников эмиссии и рассеянного излучения и устройство для его осуществления// Патент Росс. Федерации. N 2278401. 2006.
7. Bungum H., Huseby E.S., Ringdal F. The NORSAR array and preliminary results of data analysis // Geoph. J. R. astr. Soc. 1971. V.25. N 1.
8. Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault // J. Geophys. Res. 1993. V. 98.
9. Makeeva L.I., Vinnik L.P., Roecker S.W. Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle // Nature. 1992. V. 358.
10. Roecker S.W., Sabitova T.V., Vinnik L.P. et al. Three-Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central Tien Shan // J.Geoph.Res. 1993. V. 98. N 9.