



НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Б. М. Шубик

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

Процессы разработки месторождений углеводородов сопровождаются, как правило, повышением уровня сейсмичности, и в частности, возникновением техногенных землетрясений, других деформационных явлений, связанных с изменениями геодинамического режима. Для контроля деформационных и геодинамических процессов должна быть организована служба сейсмического мониторинга. Подобная система также необходима для анализа афтершоковой и вулканической активности. Технология мониторинга должна базироваться на использовании надежных и быстрых методов автоматического обнаружения и локализации сейсмических событий разного масштаба. Традиционные подходы к обнаружению и оценке координат эпицентров и гипоцентров основаны на анализе данных, зарегистрированных одной или несколькими одиночными сейсмическими станциями. Координаты событий оценивались в результате выделения (на фоне шума) и точного измерения времен вступления ряда специфических фаз сейсмического сигнала в каждом пункте регистрации. Существующие компьютерные методы унаследовали этот традиционный подход. Однако автоматические процедуры, основанные на подобной идеологии ручной обработки, оказываются чрезвычайно трудоемкими и малоэффективными из-за сложности построения алгоритмов, адекватных действиям опытного геофизика-интерпретатора. В статье сформулированы новые подходы к синтезу систем автоматического мониторинга, которые основаны на принципах эмиссионной томографии, использовании пространственных систем регистрации, энергетического анализа волновых полей и способах преобразования реальных волновых форм в низкочастотные модельные сигналы (так называемые фильтры-маски). Описанная система была успешно опробована в процессе обнаружения и оценки координат эпицентров и гипоцентров 19 слабых местных землетрясений в Израиле, а также карьерного взрыва.

Ключевые слова: локация источников, эмиссионная томография, эпицентры и гипоцентры, автоматический мониторинг, энергетический анализ, фильтры-маски.

NEW APPROACHES TO THE SYNTHESIS OF AUTOMATIC SEISMIC MONITORING SYSTEMS

B. M. Shubik

Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow, Russia

The processes of development of hydrocarbon deposits are accompanied, as a rule, by an increase in the level of seismicity and, in particular, by the occurrence of technogenic earthquakes and other deformation phenomena associated with changes in the geodynamic regime. To monitor deformation and geodynamic processes, a seismic monitoring service should be organized. A similar monitoring system is also required for the analysis of aftershock and volcanic activity. Monitoring technology should be based on the use of reliable and fast methods of automatic detection and localization of seismic events of various scales. Traditional approaches to the detection and localization of earthquake epicenters and hypocenters are based on the analysis of data recorded by one or more single seismic stations. In that case, seismic event coordinates are estimated by means of signal extraction from noise and accurately measuring arrival times of a number of specific phases of the seismic signal at each recording point. Existing computational techniques have inherited this traditional approach. However, automatic procedures based on the ideology of manual processing turn out to be extremely laborious and ineffective due to the complexity of algorithms adequate to the actions of an experienced geophysicist-interpreter. The article contains a description of new approaches to the synthesis of automatic monitoring systems, which are based on the principles of emission tomography, use of spatial registration systems, energy analysis of wave fields and methods of converting real waveforms into low-frequency model signals (so-called filter masks/templates). The monitoring system was successfully tested in the process of detecting and locating the epicenters and hypocenters of 19 weak local earthquakes in Israel, as well as a quarry explosion.

Keywords: localization of seismic sources, emission tomography, epicenters and hypocenters, automatic monitoring, energy analysis, filters mask.

DOI 10.20403/2078-0575-2020-4-73-81

Проблемы обнаружения и локализации сейсмических источников разного масштаба, наряду с вопросами оценки параметров источника, относятся к основным задачам сейсмологии и сейсморазведки. Однако особенное значение эти пробле-

мы приобретают при синтезе систем сейсмического мониторинга. Современная технология мониторинга немислима без использования надежных и быстрых методов автоматической локации сейсмических событий во времени и пространстве.



Традиционные подходы к обнаружению и оценке координат эпицентров и гипоцентров сложились еще в период становления сейсмологической науки [10]. Эти методы основаны на анализе данных, зарегистрированных одной или несколькими одиночными сейсмическими станциями. Координаты эпицентров оценивались в результате выделения и точного измерения на фоне помех времен вступления ряда специфических фаз сейсмического сигнала в каждом пункте регистрации.

Следует отметить, что в сейсмологии и сейсморазведке все шире применяются пространственные системы регистрации (группы, сети) – своего рода распределенные сейсмические антенны. Однако в современных методах компьютерной обработки сейсмических данных при решении задач обнаружения и локализации событий практически не используются возможности многоканальной обработки. Существующие компьютерные методы унаследовали традиционный подход. Усилия исследователей были нацелены главным образом на разработку более совершенных способов обнаружения и оценки параметров фаз по каждой отдельной записи. Но автоматические процедуры, основанные на подобной идеологии ручной обработки, чрезвычайно трудоемки и малоэффективны из-за сложности построения алгоритмов, адекватных действиям опытного геофизика-интерпретатора.

Принципиальной особенностью предлагаемого метода обнаружения и оценки координат сейсмических событий является переход к многоканальной обработке данных. Несколько лет назад автором была предложена новая методика обнаружения и оценки 3D координат сейсмических источников, основанная на принципах эмиссионной томографии и использовании пространственных систем регистрации [6, 11]. В настоящей статье эти подходы описываются более детально и формулируются направления дальнейших исследований.

В тех случаях, когда событие регистрируется сейсмической группой или сетью станций, совокупность записей можно рассматривать в качестве своего рода многоканальной сейсмограммы. Такая сейсмограмма во многих отношениях подобна многоканальным сейсмограммам, регистрируемым и обрабатываемым в сейсморазведке и глубинном сейсмическом зондировании – областях науки, в которых разработан мощный аппарат оптимальной обработки многоканальных данных. Определенные аспекты этих методов могут быть развиты и для решения сейсмологических задач.

Развиваемый нами подход к проблеме локализации событий базируется на принципах многоканальной обработки сейсмограмм, зарегистрированных сейсмической группой. В статье описаны результаты использования принципов сейсмоэмиссионной томографии для пространственной и временной локализации сейсмических событий по записям нескольких станций или сейсмической

группы. Суть этого подхода, впервые использованного для трехмерного картирования микросейсмической активности в высокотемпературной гидротермальной зоне на севере Исландии [2, 7], сводится к пассивному «сканированию» исследуемого объема среды зондирующим лучом, сформированным регистрирующей сейсмической группой, и оценке энергии слабого когерентного излучения из внутренних точек среды (узлов сетки опроса).

Используя данные сейсмической группы и оценивая по ним энергию волн, излучаемых различными точками исследуемого объема, мы рассчитываем трехмерные карты распределения энергии сейсмически активных объектов. Эти карты используются для обнаружения и локализации источников; для оценки энергии излучения – ранее разработанный аппарат энергоанализа [1, 3, 4].

Рассмотрим кратко основные определения и соотношения, используемые в дальнейшем.

Энергетический анализ волновых полей

Алгоритм энергоанализа основан на линейной аддитивной модели сигналов и шумов. В основе алгоритма лежит представление о многоканальной сейсмической записи как совокупности реализаций некоторого случайного процесса с неизвестными корреляционными свойствами, на которые наложены самые общие ограничения. Эта совокупность может содержать либо не содержать аддитивный регулярный сигнал конечной длительности и неизвестной формы.

Согласно этому представлению запись на p -м пункте регистрации (канале) ($p = 1, 2, \dots, P$) имеет вид

$$f_p(t) = s(t) + n_p(t), \quad (1)$$

где $s(t)$ – сигнал, не зависящий от номера канала; $n_p(t)$ – помеха – стационарный и стационарно-связанный в интервале T_n нормальный случайный процесс.

Отношение сигнал/помеха понимается как отношение энергии сигнала к энергии помех. Так как момент регистрации сигнала неизвестен, а длительность сигнала ограничена интервалом T_s , имеет смысл определять отношение сигнал/помеха в скользящем временном окне $(t - T/2, t + T/2)$.

Для известных сигналов и помех, заданных дискретными временными рядами, это отношение имеет вид

$$\rho(t) = \frac{E_s(t)}{E_n(t)} = \frac{\frac{1}{T_s} \sum_{\delta=-T_s/2}^{T_s/2} s^2(t+\delta)}{\frac{1}{T_n} \sum_{\delta=-T_n/2}^{T_n/2} D[n(t+\delta)]}, \quad (2)$$

где $D[n(t)] = M[n^2(t)]$ – дисперсия помехи; $E_s(t)$ – средняя энергия сигнала; $E_n(t)$ – средняя энергия помехи; T_s – интервал осреднения по сигналу; T_n – интервал осреднения по помехе.



Метод энергетического анализа волновых полей основан на раздельном вычислении оценок средних энергий сигнала $\hat{E}_s(t)$ и помехи $\hat{E}_n(t)$ в скользящем временном окне по экспериментальному материалу. Многоканальная сейсмическая запись предоставляет естественную возможность оценки указанных величин как параметров случайного процесса $f(t)$, заданного совокупностью P реализаций.

В работе [1] показано, что в случаях, когда функции автокорреляции и взаимной корреляции помех убывают по экспоненциальному закону, состоятельными и асимптотически несмещенными оценками средних значений энергии сигнала и помехи будут случайные функции вида

$$\hat{E}_s(t, T_s) = \frac{1}{P(P-1)T_s} \sum_{\delta=-T_s/2}^{T_s/2} [a(t+\delta) - b(t+\delta)]; \quad (3)$$

$$\hat{E}_n(t, T_n) = \frac{1}{P(P-1)T_n} \sum_{\delta=-T_n/2}^{T_n/2} [Pb(t+\delta) - a(t+\delta)], \quad (4)$$

где $a(t) = \left[\sum_{p=1}^P f_p(t + \tau_p) \right]^2$; $b(t) = \sum_{p=1}^P [f_p(t + \tau_p)]^2$; $p = 1, 2, \dots, P$ – номер точки регистрации (канала); P – число каналов, по которым вычисляются оценки средних энергий; $f_p(t)$ – запись на p -й точке (канале) регистрации; τ_p – кинематическая поправка, определяемая временем подхода волны.

Оценка отношения сигнал/помеха (SNR) из формул (3) и (4) определяется по годографу сигнала на заданной базе из P каналов как функция времени

$$\hat{\rho}(t) = \frac{\hat{E}_s(t, T_s)}{\hat{E}_n(t, T_n)}. \quad (5)$$

Сравнительный анализ различных операторов выделения регулярных волн, применяемых в сейсморазведке [3], показал, что выражения \hat{E}_s (3) и \hat{E}_n (4) оператора SNR (5) позволяют наиболее успешно решить задачу раздельного оценивания энергии сигнала и помех.

Совокупность значений $\hat{\rho}(t)$ образует непрерывную кривую (энергограмму), и в каждый момент времени t величина $\hat{\rho}(t)$ оценивает соотношение регулярной и случайной компонент зарегистрированного волнового поля в окне $(t - T_s/2, t + T_s/2)$ к средней энергии помех в окне $(t - T_n/2, t + T_n/2)$. Вообще говоря, эти окна различны. Величина T_s должна быть согласована с ожидаемой длительностью сигнала, а величина T_n должна быть достаточна для получения устойчивых оценок энергии помех и в то же время не настолько велика, чтобы компенсировать систематические изменения уровня помех по времени.

Энергетический анализ – это анализ структуры и методика интерпретации суммарного волнового поля с помощью энергограмм. В зависимости от вида обрабатываемых данных, выбора системы годографов и размеров окон T_s и T_n , с помощью

энергоанализа решались самые разнообразные задачи: обнаружение слабых сигналов, скоростной анализ, разделение волн по типам и скоростям, определение доли энергии случайного шума в энергии суммарного поля, количественная оценка эффективности различных систем регистрации и обработки, синтезирование оптимального графа обработки.

Методика мониторинга

Суть предлагаемого подхода сводится к сканированию исследуемого объема среды зондирующим лучом, сформированным регистрирующей сейсмической антенной, и сравнительной оценке энергии излучения из внутренних точек среды. Эта процедура аналогична отысканию «яркого пятна» космическим радиотелескопом с фазирруемыми элементами.

Исследуемый объем среды мы покрываем двумерной или трехмерной сеткой опроса, которая задается координатами узловых точек, и вычисляем трехмерную SNR -карту, т. е. набор оценок энергии излучения из заданного множества узлов сетки.

Пусть в узле X_i, Y_j, Z_k сетки опроса генерируется сигнал $s_{ijk}(t)$. Этот сигнал принимается всеми P геофонами ($p = 1, 2, \dots, P$) на фоне аддитивного шума $n_p(t)$:

$$f_p(t) = \alpha_{ijk}^p s_{ijk}(t - \tau_{ijk}^p) + n_p(t),$$

где $p = 1, 2, \dots, P$ – номер геофона приемной сейсмической антенны; $f_p(t)$ – сейсмический сигнал, зарегистрированный p -м геофоном; t – время в точке приема; $s_{ijk}(t - \tau_{ijk}^p)$ – сигнал, исходящий из элементарного объема вблизи опрашиваемого узла сетки с координатами X_i, Y_j, Z_k ; i, j, k – номер данного узла сетки $\{i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K\}$; α_{ijk}^p – амплитудный коэффициент, определяемый расхождением фронта волны и углом подхода луча; τ_{ijk}^p – задержка, определяемая временем пробега сигнала из данного (i, j, k) узла к p -му геофону; n_p – суммарная аддитивная помеха, включающая некогерентный поверхностный шум и сигналы посторонних по отношению к данному узлу источников.

Введение кинематических поправок τ_{ijk}^p обеспечивает последовательную фокусировку сейсмической антенны на узлах сетки опроса. Кинематические поправки вычисляются на основе априорной скоростной модели слоистой среды для выбранных типов волн. Размер временного окна T_s определяется эффективной длительностью полезного сигнала, а размер окна T_n должен быть достаточен для получения устойчивых оценок энергии помех.

Описанные выше оценки отношения сигнал/помеха (5) очень чувствительны к присутствию когерентных компонент в волновом поле многоканальной сейсмограммы. Если координаты данного узла совпадают или наиболее близки к координатам реального источника излучения, то отношение сигнал/помеха, вычисленное для данной точки, будет превышать значения SNR для соседних точек.



Совокупность вычисленных таким образом оценок отношения сигнал/помеха для всех узлов образует трехмерную *SNR*-карту, которая отражает пространственное распределение энергии излучения источников в исследуемой среде и используется для обнаружения и оценки координат источников.

Ранее мы с успехом использовали идею сканирования среды зондирующим лучом, сформированным регистрирующей сейсмической антенной, для решения эмиссионно-томографических задач пассивной сейсмологии. Впервые эти исследования были нацелены на 3D картирование гидротермальных зон на севере Исландии и сейсмоактивных областей путем анализа поля микросейсм [2, 6–8].

Области повышенной микросейсмической активности, для картирования которых использовался метод, могут рассматриваться в качестве адекватных моделей участков земной коры большего масштаба, в которых действуют активные очаги, излучающие сейсмическую энергию.

Вопросы практической реализации метода сканирования

Потенциально метод сканирования среды лучом сейсмической антенны может оказаться эффективным средством оперативного обнаружения и оценки координат эпицентров, гипоцентров и других параметров сейсмических очагов. Однако формы практической реализации этого подхода будут существенно различаться в зависимости от соотношения эпицентрального расстояния и размеров регистрирующей группы. При анализе данных компактной группы можно рассчитывать на сохранение в определенной полосе частот корреляционных связей между записями сейсмических событий на разных станциях группы [8]. В такой ситуации при расчете экспериментальных оценок отношения сигнал/помеха может оказаться эффективным метод когерентного анализа. Однако при обработке данных сейсмической сети большего масштаба, когда зарегистрированные сигналы плохо коррелированы, когерентный анализ неприемлем, поскольку оценки сигнал/помеха в этом случае неэффективны. Поэтому мы используем ранее разработанную идею замены реальных волновых форм на некоторые модельные сигналы с помощью так называемого одноканального фильтра-маски [5].

Вид преобразования определяется характером данных. Например, для решения сейсмологических задач можно выбрать одноканальную процедуру STA/LTA (соотношение энергий записи в соосных окнах малой и большой длительности). В других случаях можно ограничиться вычислением амплитудной огибающей или огибающей квадрата записи, выходных сигналов соответствующих детекторов (поляризационного, спектрального, амплитудного и т.д.). Такая постановка основана на предположении о том, что во многих задачах сейсмологии для структурных построений достаточно получить ин-

формацию о временах пробега волн. Эти вопросы решаются экспериментальным подбором соответствующего детектора.

В процессе сканирования среды по координатам узлов сетки опроса мы рассчитываем по преобразованным сейсмическим записям двух- или трехмерные *SNR*-карты, т. е. набор значений *SNR* для всех узлов заданной сетки опроса. Такая *SNR*-карта отражает картину пространственного распределения сейсмических источников в исследуемой области. Решение об обнаружении события принимается на основании сопоставления максимального значения *SNR* и оценки дисперсии *SNR*-карты.

В рамках данного подхода была разработана высокоэффективная схема сканирования реальной среды. Время обработки данных регионального события, записанного на 10–20 сейсмических станциях с частотой дискретизации 50 Гц (примерно 50 000 отсчетов для 10 станций) и сетке сканирования, включающей около 30 000 узлов (для 10 уровней по глубине), не превышает 20 с.

Разработанный робастный подход, в отличие от традиционных методов оценки координат эпицентров и гипоцентров, может стать основой технологий полностью автоматической массовой обработки данных сейсмических сетей и групп в режиме реального времени.

Для оценки помехоустойчивости, разрешающей способности, требований к каналам регистрации и параметрам обработки была разработана система численного моделирования, учитывающая реальные условия. Программа моделирования синтезирует совокупность сигналов в заданных точках регистрации от заданных глубинных источников в слоистой среде и сложное поле помех, включающее некоррелированный поверхностный шум и коррелированные компоненты от источников, расположенных вне исследуемого объема. Синтезированная сейсмограмма подвергается обработке описанным способом. Для имевшихся сейсмических записей землетрясений (отношение сигнал/помеха больше 2, фильтр STA/LTA и простая модель среды) программа моделирования помогла мне убедиться в работоспособности алгоритма и увидеть, что разрешающая способность локации составляет примерно 5 км. Это значение было использовано для задания шага сетки опроса при обработке реальных данных.

Результаты опробования

На этапе опробования мы использовали метод сканирования среды лучом сейсмической группы для оценки координат эпицентров и гипоцентров 19 слабых местных землетрясений, зарегистрированных региональной сейсмической сетью Израиля, а также карьерного взрыва по записям сейсмических станций Сейсмологического института Финляндии. В процессе обнаружения и локации слабых местных землетрясений анализировался объем среды разме-

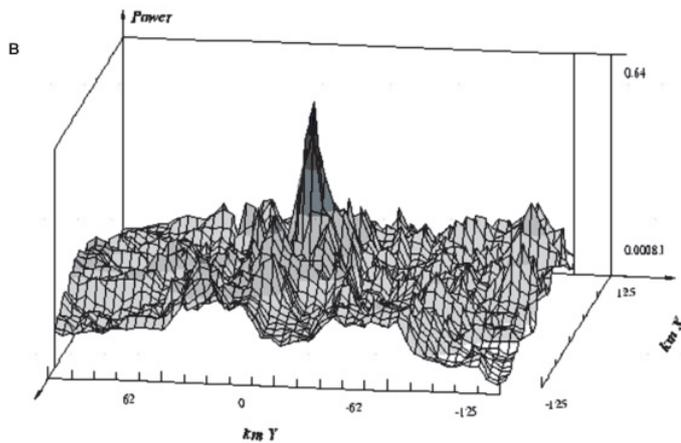
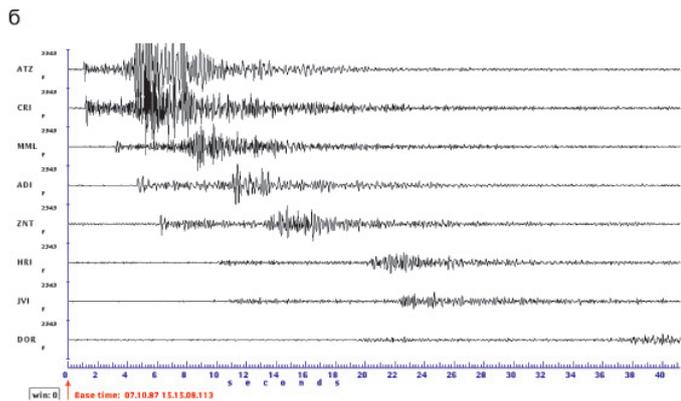
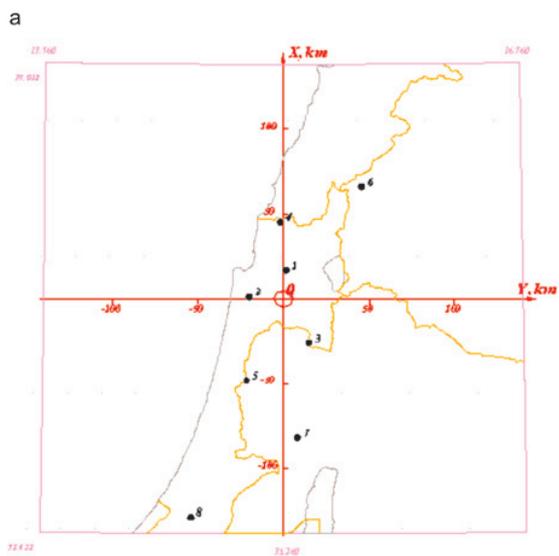


Рис. 1. Пример локализации эпицентра слабого землетрясения 8710071514 по данным 8 станций сейсмологической сети Израиля: а – размещение восьми сейсмических станций локальной сети; б – 8-канальная сейсмограмма землетрясения; в – SNR-карта пространственного распределения оценок отношения сигнал помеха, рассчитанных для площадки 255×255 км с шагом 5 км; координаты эпицентра определяются по максимуму SNR

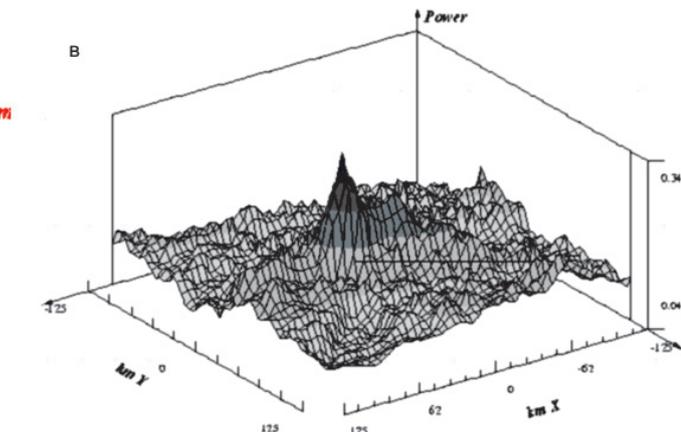
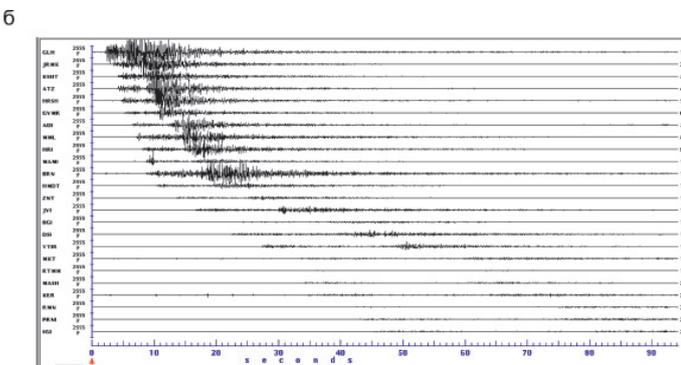
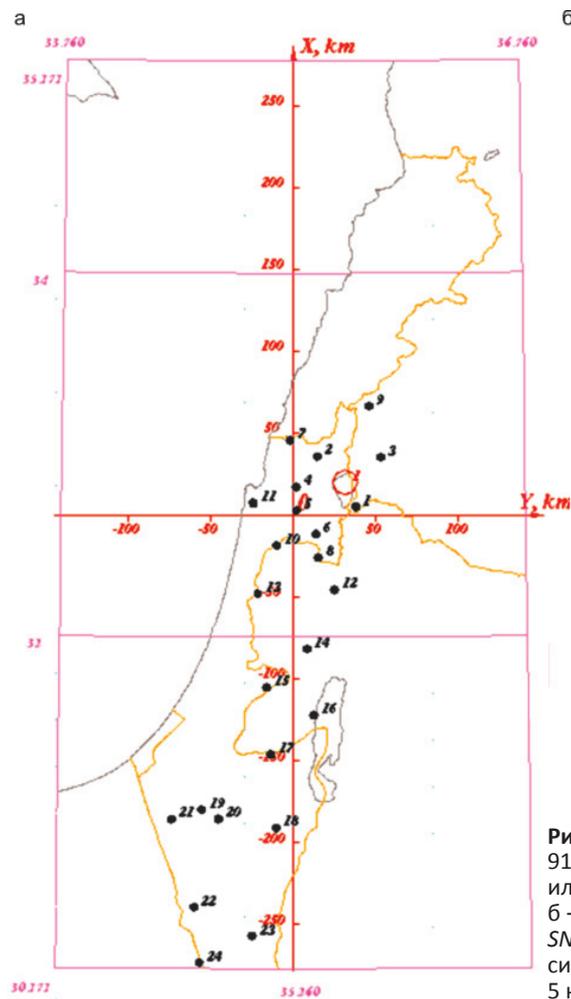


Рис. 2. Оценка координат эпицентра слабого землетрясения 9104270713 по данным 24 станций сейсмологической сети Израиля: а – размещение 24 сейсмических станций локальной сети; б – 24-канальная сейсмограмма землетрясения 9104270713; в – SNR-карта пространственного распределения оценок отношения сигнал помеха, рассчитанных для площадки 255×255 км с шагом 5 км; координаты эпицентра определяются по максимуму SNR

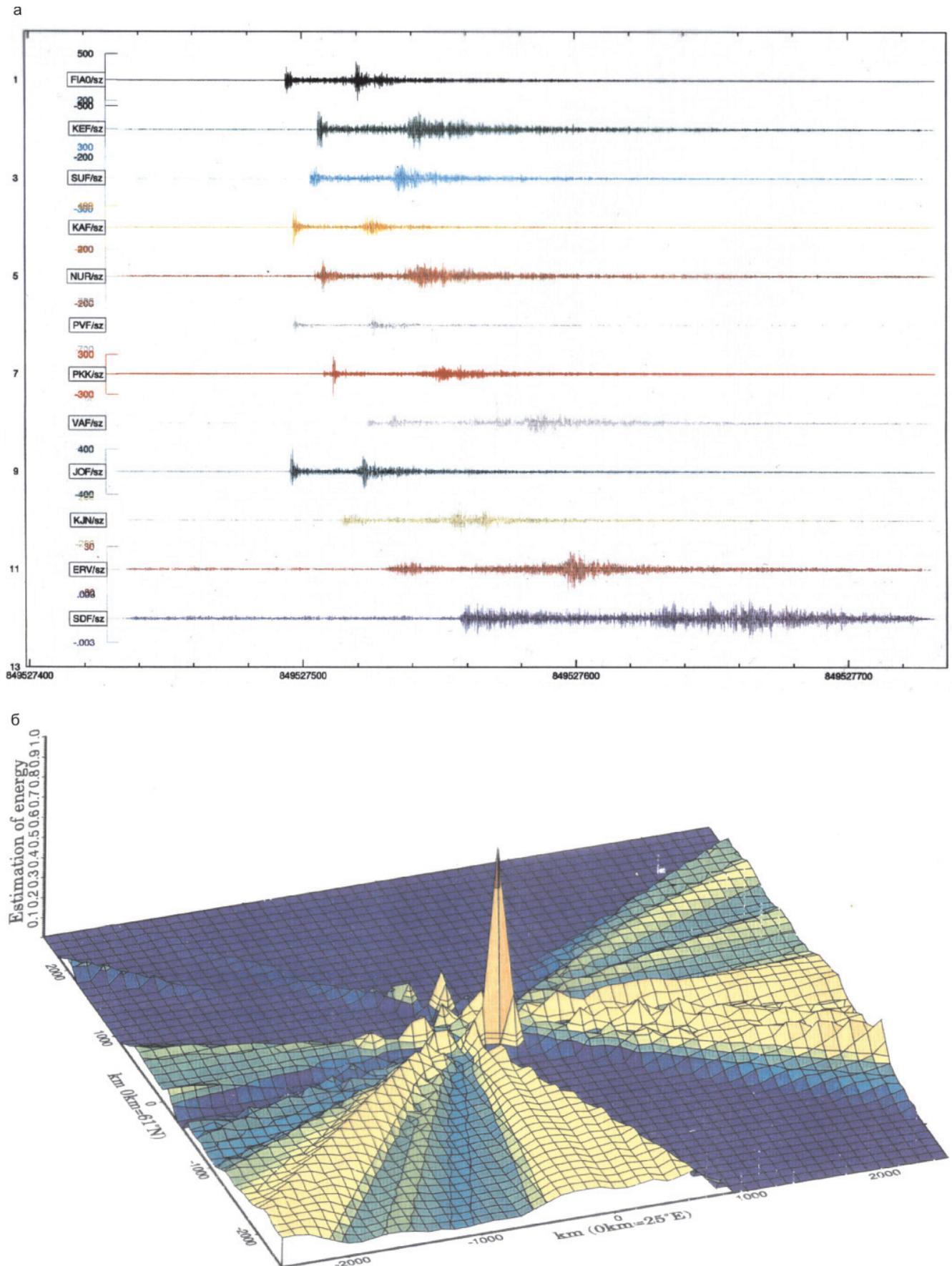


Рис. 3. Оценка координат карьерного взрыва в Карелии, зарегистрированного сейсмической группой Хельсинского университета, состоящей из 12 вертикальных геофонов: а – 12-канальная сейсмограмма взрыва; б – SNR-карта пространственного распределения оценок отношения сигнал/помеха, координаты пункта взрыва определяются по максимуму SNR; площадь сканирования 55×55 км с шагом 1 км

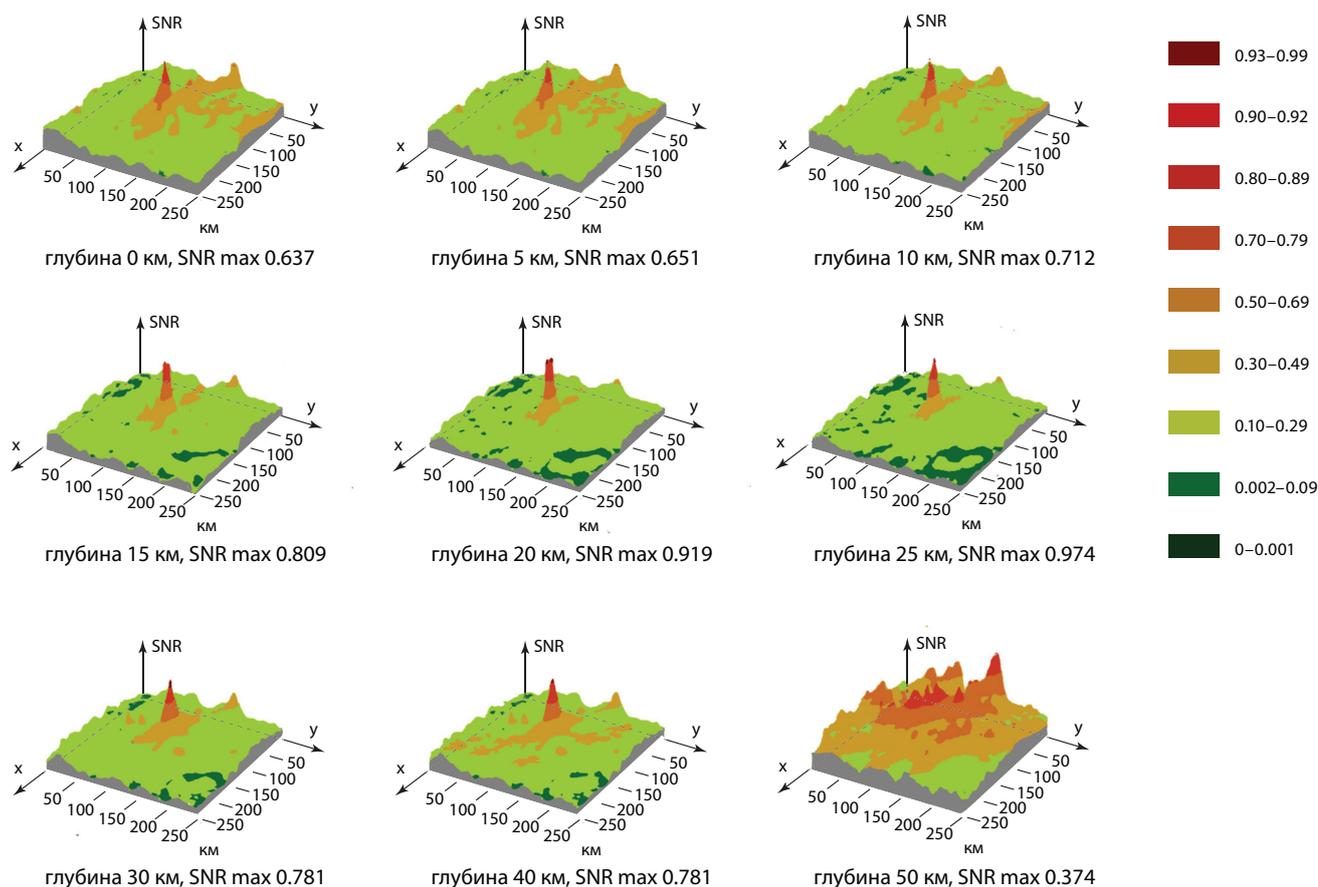


Рис. 4. Пример оценки координат эпицентра и гипоцентра слабого землетрясения 9104270713 по данным сейсмологической сети Израиля. Показан набор SNR-карт, рассчитанных по 24-канальной записи землетрясения; размер площадки сканирования 255×255 км, шаг сетки опроса 5 км. Представлены SNR-карты, рассчитанные для 9 глубин (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 км). Общее число узлов трехмерной сетки сканирования 23409. SNR-карты нормированы по максимуму для каждого глубинного сечения. Под каждым горизонтальным сечением приводятся глубина и численное значение максимума SNR. Максимальное значение SNR растет вплоть до глубины 25 км, которая ассоциируется с гипоцентром

ром 255×255 км, глубиной до 50 км. Шаг сетки опроса (сканирования) по площади и глубине составлял 5 км (2601 узел по каждому горизонтальному сечению, 26010 узлов для 10 уровней по глубине).

Обработка данных сводится к вычислению оценок отношения сигнал/помеха для каждого узла сетки опроса (SNR-карта). Координаты эпицентра определяются по максимальному значению SNR-карты. Момент излучения оценивается в скользящем временном окне для координат обнаруженных событий.

Следует иметь в виду, что зарегистрированные трассы перед окончательной обработкой должны подвергаться препроцессингу с целью удаления выбросов и других аппаратных помех.

Некоторые результаты пробной обработки записей землетрясений и карьерного взрыва иллюстрируются рис. 1–4.

На рис. 4 следует обратить внимание на монотонное изменение характера пространственного распределения и максимального значения SNR с глубиной и резкое возрастание дисперсии SNR-карты на глубинах более 30 км. Положение гипоцентра фиксируется по абсолютному максимуму SNR на глубине 25 км. Расчеты проводились для простой

однородной эффективной скоростной модели со скоростями волн $V_p = 6,2$ км/с, $V_s = 3,4$ км/с. Анализ результатов обработки и сравнение с данными каталога показали, что в 80 % случаев ошибка определения координат эпицентров не превышает шага сетки опроса (5 км). Возможно также, что в некоторых случаях точность локации методом сканирования превышает точность локации по каталогу.

Выводы и направления дальнейших исследований

Когда я приступил к реализации данного проекта, я полагался на свой опыт использования площадных групп для трехмерного картирования микросейсмической активности в гидротермальной зоне на севере Исландии [2, 7, 8]. Этот вид эмиссионной томографии я решил использовать для обнаружения и локации эпицентров и гипоцентров разномасштабных событий.

В данной публикации для меня важно было обнародовать именно принципы нового подхода, которые достаточно просто адаптировать для решения разнообразных конкретных задач.

Понимаю, что практическая реализация метода потребует решения частных вопросов, включая



выбор одноканального фильтра маски. Такую процедуру следует применять для замены реальных волновых форм в тех случаях, когда сигналы на разных пунктах приема плохо коррелированы и, следовательно, оценки сигнал/помеха неэффективны.

Результаты исследований и обработки реальных данных позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработан новый метод определения координат и времени возникновения сейсмических событий разного масштаба по данным сейсмических групп, основанный на использовании направленных свойств пространственной системы регистрации и принципов сканирования среды.

2. Проведено численное моделирование и массовое опробование метода по записям слабых землетрясений и карьерных взрывов. Экспериментальное опробование подтверждает работоспособность и высокую эффективность разработанного подхода.

3. Принципиальная особенность и преимущество разработанного метода состоят в естественной возможности и простоте оценки координат не только эпицентров, но и гипоцентров событий с использованием единой процедуры обработки. Таким образом, метод обеспечивает, например, различение взрывов и землетрясений.

4. В принципе, методы многоканального сканирования среды обладают, при прочих равных условиях, более высокой чувствительностью и разрешающей способностью по сравнению с традиционной одноканальной обработкой (выделение фаз) именно за счет многоканальной обработки данных (как и в других сейсморазведочных методах).

5. Разработанная методика универсальна, один и тот же подход применим к макро- и микрособытиям. Речь может идти о выборе более подходящих одноканальных детекторов – фильтров-масок, использовании более сложных скоростных моделей и разных типов волн.

6. Компьютерная технология метода сканирования обеспечивает высокое быстродействие и пригодна для построения робастных систем автоматического мониторинга, работающих в реальном времени.

7. Метод может быть использован для уточнения априорной скоростной модели среды. При этом в качестве целевой функции используется зависимость максимального значения SNR -карты (соответствующего координатам обнаруженного события) от выбранной скоростной модели. В статье методика оптимизации скоростной модели не описана, но для сейсморазведки это общепринятый прием – подбирать кинематику путем максимизации SNR . Также можно проиллюстрировать эту методику аналогичным способом, который использовался для оценки глубины гипоцентра по максимуму SNR .

8. Разработанный подход может быть использован как для когерентного, так и для некогерентного анализа. Во втором случае надежность обнаружения и локализации слабых событий может быть

увеличена путем использования более эффективных одноканальных фильтров-масок. Волновые формы в имевшихся записях землетрясений не коррелируются от станции к станции, поэтому прямой метод оценки SNR неэффективен. При обработке был использован фильтр-маска типа STA/LTA для замены реальных сигналов. Этот фильтр позволил с достаточной точностью определить координаты эпицентров и гипоцентров событий.

9. Метод может оказаться важным инструментом анализа временной и пространственной эволюции очагов и локальной сейсмичности при мониторинге сейсмически активных зон и зон регистрации форшоков и афтершоков.

10. Эффективность и точность локации может быть повышена за счет применения априорной информации обо всех регистрируемых типах волн, которые могут быть обнаружены и использованы в процессе локации. Разработанная универсальная методика обеспечивает возможность сканирования среды с учетом волн разного типа.

11. Эти проблемы, наряду с адаптацией сформулированных подходов к условиям и требованиям конкретных задач и систем регистрации определяют направления дальнейших исследований.

Автор искренне благодарен специалистам Израильского геофизического института и Сейсмологического института Хельсинского университета за предоставление данных для обработки, а также д. ф.-м. н. А. Б. Ермакову за обсуждение и помощь в подготовке программы решения прямых задач и специалисту по компьютерной графике П. Б. Ремпелю за помощь в подготовке иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кац С. А., Шубик Б. М.** Адаптивные многоканальные фильтры в сейсмических исследованиях. – М.: Наука, 1986. – 153 с.
2. **Микросейсмическая** активность в гидротермальной области / Б. М. Шубик, В. Л. Киселевич, А. В. Николаев, Л. Н. Рыкунов // Физические основы сейсмического метода. – М.: Наука, 1991. – С. 143–158.
3. **Шубик Б. М.** Многоканальная адаптивная фильтрация и энергетический анализ сейсмических волновых полей: автореф. дис. ... к. ф.-м. н. – М.: ИФЗ РАН, 1980. – 21 с.
4. **Шубик Б. М.** Принципы построения самонастраивающихся процедур обработки сейсмических данных // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2011. – № 3. – С. 39–47.
5. **Шубик Б. М.** Фильтры-маски // Разведочная геофизика. – 1980. – Вып. 88. – С. 10–18.
6. **Шубик Б. М.** Эмиссионно-томографические подходы в сейсмических исследованиях // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – № 3 (49). – С. 46–48.
7. **Array based seismic emission tomography** / B. M. Shubik, A. V. Nikolaev, L. N. Rykounov, et al. // XXV



General Assembly ESC. – Reykjavik, Iceland, 1996. – P. 37.

8. **Gurevich V. A., Kiselevich V. L., Shubik B. M.** ASET – Array Based Seismic Emission Tomography // IRIS Newsletters. – 1994. – Vol. XIV, no. 1. – P. 10–11.

9. **Harvey D.** Correlation analysis using teleseismic events recorded by the JSP Kyrgyz Network for Crust and Upper Mantle time residuals // Proceedings of the 17th Annual seismic research symposium on monitoring of comprehensive test Ban Treaty. – University of Colorado, USA, 1995. – P. 636–646.

10. **Kennett B. L. N.** Event location and source characterization // Monitoring a comprehensive test ban treaty / E. Husebye, A. Dainty (eds.). – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – P. 501–520.

10. **Shubik B. M.** Real-time automatic monitoring system // European Seismological Commission, 33rd General Assembly (ESC-12): conference Proceedings. – Moscow; Obninsk, Russia, 2012. – P. 257–258.

REFERENCES

1. Kats S.A., Shubik B.M. *Adativnye mnogokanalnye filtry v seysmicheskikh issledovaniyakh* [Adaptive multichannel filters in seismic operations]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 153 p. (In Russ.).

2. Shubik B.M., Kiselevich V.L., Nikolaev V.N., Rykunov L.N. [Microseismic activity in hydrothermal area]. *Fizicheskie osnovy seysmicheskogo metoda* [Physical principles of seismic method]. Moscow, Nauka Publ., 1991, pp. 143–158. (In Russ.).

3. Shubik B.M. *Mnogokanalnaya adaptivnaya filtratsiya i energeticheskiy analiz seysicheskikh volnovykh poley. Avtoref. dis. k.f.-m.n.* [Multichannel adap-

tive filtration and energy analysis of seismic wave fields, Author's abstract of PhD thesis]. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS Publ., 1981. 21 p. (In Russ.).

4. Shubik B.M. [Concepts of self-adaptive procedures formation for seismic data processing]. *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri – Geology and mineral resources of Siberia*, 2011, no. 3, pp. 39–47. (In Russ.).

5. Shubik B.M. [Mask filters]. *Razvedochnaya geofizika*, 1980, vol. 88, pp. 10–18. (In Russ.).

6. Shubik B.M. [Emission tomography principles in seismic researches]. *Ekspozitsiya Neft Gaz – Exposition Oil & Gas*, 2016, no. 3 (49), pp. 46–48. (In Russ.).

7. Gurevich V.A., Kiselevich V.L., Shubik B.M. ASET – Array Based Seismic Emission Tomography. *IRIS Newsletters*, 1994, vol. XIV, no. 1, pp. 10–11.

8. Shubik B.M., Nikolaev A.V., Rykounov L.N., et al. Array based seismic emission tomography. *XXV General Assembly ESC*. Reykjavik, Iceland, 1996, p. 37.

9. Harvey D. Correlation analysis using teleseismic events recorded by the JSP Kyrgyz Network for Crust and Upper Mantle time residuals. *Proceedings of the 17th Annual seismic research symposium on monitoring of comprehensive test Ban Treaty*. University of Colorado, USA, 1995, pp. 636–646.

10. Kennett B.L.N. Event location and source characterization. *Monitoring a comprehensive test ban treaty*. E. Husebye, A. Dainty (eds.). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996, pp. 501–520.

10. Shubik B.M. Real-time automatic monitoring system. *European Seismological Commission, 33rd General Assembly (ESC-12): conference Proceedings*. Moscow; Obninsk, Russia, 2012. pp. 257–258.

© Б. М. Шубик, 2020