

# Эмиссионно-томографические подходы в сейсмических исследованиях

**Б.М. Шубик**

к.ф.-м.н., в.н.с.

[bmshtubik@mail.ru](mailto:bmshtubik@mail.ru)

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

**На основе принципов эмиссионной томографии разработаны новые более эффективные методы трехмерного картирования активных сред, обнаружения и локализации сейсмических и микросейсмических источников в режиме мониторинга реального времени. Разработана также система трехмерной сейсморазведки сложных сред методами дифракционной томографии с управляемым облучением и адаптивной фильтрацией.**

## Материалы и методы

Данные сейсмических групп с записями микросейсм, сейсморазведочные данные и данные сейсмологических сетей и групп. Методы сканирования среды и оптимальной адаптивной фильтрации.

## Ключевые слова

микросейсм, томография, эпицентрия, локация, мониторинг, дифракция, адаптация

По существу, томография — эффективный способ получения данных о внутренней структуре путем анализа сигналов, проходящих через объект. В методах трансмиссионной томографии источники сигналов располагаются вне исследуемого объема, а в методах эмиссионной томографии анализируются сигналы от внутренних источников (эммитеров или переизлучателей) в исследуемой среде.

Методы эмиссионной томографии позволяют извлечь информацию о строении и состоянии среды на основе регистрации микросейсм. Развитию методов предшествовали исследования сейсмических шумов на поверхности земли, в штольнях и скважинах, у истоков которых стоял Е.И. Гальперин [1].

Присутствие в среде источников сейсмического излучения или контрастных неоднородностей приводит к появлению когерентных компонент в случайном волновом поле, зарегистрированном на поверхности. Используя данные площадной группы (сейсмической антенны) и оценивая по ним энергию когерентного излучения из внутренних точек среды, можно построить трехмерные карты распределения микросейсмической активности или 3D "изображение" сейсмически шумящих объектов и контрастных неоднородностей. При этом для оценки энергии когерентного излучения используется предложенная проф. А.В. Николаевым идея сканирования среды лучом сейсмической антенны [2].

В рамках данного сообщения кратко освещаются три темы, тесно связанные между собой единым подходом:

(I). Анализ микросейсм.

(II). Автоматическая система сейсмического мониторинга реального времени.

(III). Трехмерная сейсморазведка (3D дифракционная томография с направленным облучением).

(I). В начале 90-х гг. в рамках Советско-Исландской геолого-геофизической экспедиции РАН были проведены успешные исследования по трехмерному картированию активных гидротермальных зон, на основе анализа микросейсм, зарегистрированных мобильной сейсмической группой.

Впервые было показано, что картина пространственного распределения энергии эндогенных микросейсм стабильна во времени. Анализ этого распределения и сопоставление рассчитанной модели с другими геофизическими полями и температурными аномалиями, выполненное исландскими геофизиками, показали, что трехмерная картина энергии сейсмических шумов (5х6 км до 2 км глубины), соответствует реальному распределению гидротермальной активности [3, 4, 5].

Проведенные пионерские исследования дали толчок интенсивному развитию разнообразных методов пассивной сейсморазведки и сейсмического мониторинга, широко применяющихся в настоящее время. Разработанная методика может использоваться для решения многих разведочных задач.

На рис. 1 (а, б) приведен пример обработки реальных микросейсмических данных, зарегистрированных мобильной площадной группой в гидротермальной зоне.

(II). Описанные подходы были использованы для разработки робастного и быстрого метода обнаружения и локализации реальных сейсмических источников разного масштаба и создания автоматической системы сейсмического мониторинга.

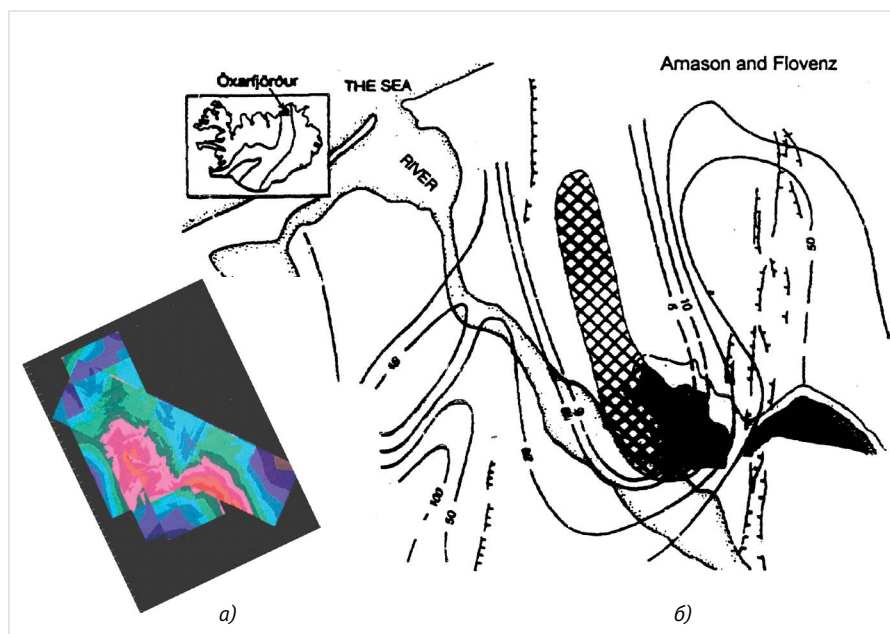


Рис. 1 — а) Пример скомпилированной карты сейсмической эмиссии, ассоциированной с гидротермальной активностью на глубине 1800 м. Карта рассчитана по данным 10 сейсмических антенн размером 1000х600 м; б) Сопоставление полученных результатов с данными электроразведки [6].

Метод применялся для оценки координат эпицентров и гипоцентров слабых землетрясений, карьерных взрывов [7, 8, 9]. На рис. 2 показан пример обработки реальных данных (обнаружение эпицентра и гипоцентра слабого местного землетрясения, зарегистрированного локальной сетью Израиля). Площадь сканирования 255x255 км (рис. 2).

Разработанный метод может стать основой современных технологий полностью автоматической массовой обработки данных сейсмических сетей и групп в режиме реального времени. Использование данных ВСП и многомерной адаптивной фильтрации позволяет существенно повысить надежность и разрешающую способность метода. Метод может использоваться для картирования активных зон и распределения микроземлетрясений (например, при разработке сланцевых месторождений), а также для анализа временной эволюции афтершоковой активности при изучении очагов.

(III). Основным и наиболее эффективным способом поиска и разведки структур, к которым приурочены нефтяные и газовые месторождения, остается метод ОГТ. По сути дела, ОГТ представляет собой частный случай пространственной системы возбуждения и приема сейсмических сигналов, которая обеспечивает возможность фокусировки сейсмических волновых полей на внутренних точках среды. Принципиальная особенность технологии ОГТ состоит в том, что метод ориентирован в основном на выделение и прослеживание границ и плохо работает в сложных средах с невыдержанными границами, часто представляющими разведочный интерес. В основе предлагаемого нами подхода лежит идея перехода от корреляции отражений и трассирования отражающих границ к сканированию среды с использованием направленных свойств пространственных систем излучения и приема.

Суть развиваемого нами метода 3D дифракционной томографии с направленным облучением сводится к использованию

управляемых компьютером излучающей и приемной пространственных систем для формирования направленного излучения и приема сейсмической энергии, синхронному сканированию среды этими двумя лучами и оптимальной адаптивной фильтрации. В процессе такой обработки появляется возможность построения трехмерного изображения внутренней структуры среды. На метод был получен ряд патентов РФ [10, 11, 12, 13].

На рис. 3 показан пример обработки реальных данных, полученных совместно с кафедрой сейсмологии геологического факультета МГУ. Результатом обработки являются не временные разрезы, а трехмерное изображение мелко заглубленного объекта (инженерного туннеля).

### Итоги

(I) Впервые было показано, что пространственное распределение энергии эндогенных микросейсм стабильно во времени. Метод эмиссионной томографии может использоваться для решения многих разведочных задач.

(II) Предложен метод обнаружения и локализации сейсмических событий разного масштаба. Могут использоваться все доступные типы волн (в режиме когерентного или некогерентного анализа).

(III) Разработанный метод 3D сейсморазведки позволяет повысить разрешающую способность и надежность обнаружения неоднородностей за счет двойной фокусировки излучающей и приемной сейсмических антенн на внутренних точках среды, накопления и оптимальной согласованной адаптивной фильтрации принимаемых сигналов.

### Выводы

Данное исследование дало толчок интенсивному развитию разнообразных пассивных сейсмических методов, широко применяющихся в настоящее время.

Предлагаемый новый метод обнаружения и локализации событий обеспечивает

возможность оперативного анализа и мониторинга сейсмичности, связанной с макро и микро источниками, в том числе контроля ГРП. Метод 3D сейсморазведки может быть использован для дополнительной обработки сложных фрагментов уже имеющихся сейсморазведочных данных ОГТ с целью картирования локальных неоднородностей в зонах нарушения прослеживаемости границ. Для этого комплекс может быть встроен в современные системы обработки сейсморазведочных данных.

### Список литературы

1. Гальперин Е.И., Винник Л.П., Петерсен Н.В. О модуляции высокочастотного сейсмического шума приливными деформациями литосферы // Известия АН СССР. Физика Земли. 1987. № 12. С. 102–109.
2. Nikolaev A.V., Troitsky P.A. Lithospheric studies based on array analysis of P-coda and microseisms. Tectonophysics, 1987, Vol. 140, issue 2, pp. 103–113.
3. Шубик Б.М., Киселевич В.Л., Николаев А.В., Рыкунов Л.Н. Микросейсмическая активность в гидротермальной области. Физические основы сейсмического метода. Нетрадиционная геофизика. М.: Наука, 1991. С. 143–158.
4. Shubik B.M., Nikolaev A.V., Rykounov L.N., Kiselevich V.L. and Flovenz O.G. Array based seismic emission tomography. XXV General Assembly ESC. Reykjavik, Iceland, 1996. p. 37.
5. Shubik B.M. Seismic emission tomography techniques. Knowledge for the Future. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) IAHS IAPSO IASPEI Joint Assembly Gothenburg, abstracts. Sweden, July, 2013.
6. Arnasson K., Flovenz O.G. Evaluation of physical methods in geothermal exploration of rifted volcanic crust, Transactions of Geothermal Resources Council, 1992, Vol. 16, pp. 207–214.

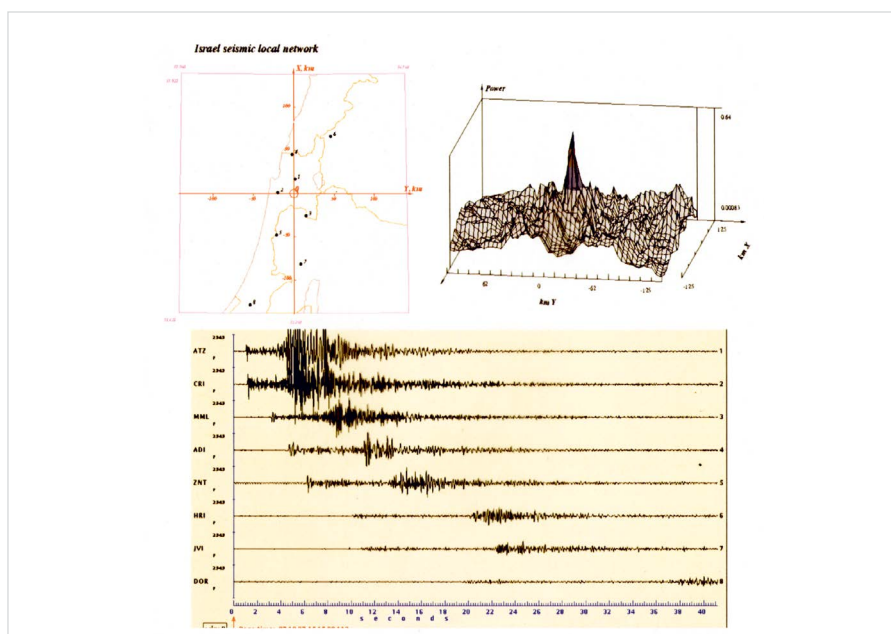


Рис. 2 — Пример обнаружения эпицентра и гипоцентра слабого местного землетрясения, зарегистрированного локальной сетью Израиля. Вверху, слева — схема размещения 8 станций локальной сети, внизу — запись местного землетрясения, зарегистрированного на 8 станциях сети, вверху, справа — обнаружение эпицентра — карта распределения рассчитанных оценок сигнал/помеха на площади 255 x 255 км

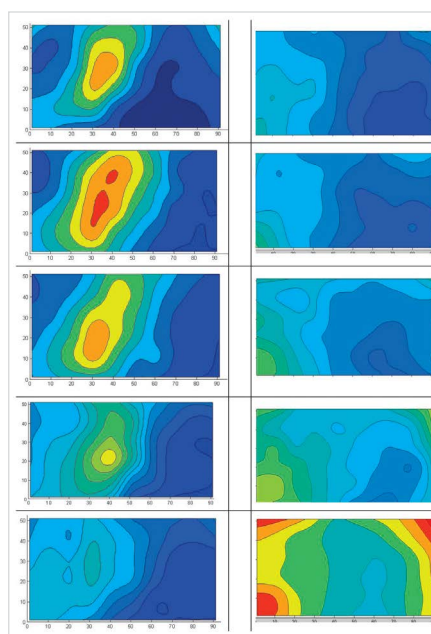


Рис. 3 — Пример обработки реальных данных, полученных совместно с кафедрой сейсмологии геологического факультета МГУ. Показаны 10 горизонтальных

7. Шубик Б.М., Ермаков А.Б. Автоматическое определение координат и моментов возникновения сейсмических событий на основе принципов эмиссионной томографии. Сборник научных трудов «Проблемы геотомографии». Москва: Наука, 1997. 336 с.
8. Shubik B.M., Ermakov A.B. Automatic seismic event detection and location in space and time based on the principles of emission tomography. XXIV General Assembly Society Symposium Solid Earth Geophysics&Geology, General Assembly of the European Geophysical Society, Sec. SE34, The Hague, Netherlands, 1996, Vol. 1, p. 124.
9. Shubik B.M. Real-time automatic seismic monitoring system. Knowledge for the Future International, Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) IAHS IAPSO IASPEI Joint Assembly Gothenburg, abstracts. Sweden, July, 2013.
10. Шубик Б.М. Принципы построения самонастраивающихся процедур обработки сейсмических данных // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2011. № 3. С. 39–47.
11. Патент на изобретение RU № 2129719 Способ сейсмической разведки Заявлено 18.08.1997. Опубликовано 27.04.1999. G01V1/00.
12. Патент на изобретение RU № 2136018 Способ сейсмической разведки Заявлено 02.12.1997. Опубликовано 27.08.1999 G01V1/00.
13. Патент на изобретение RU № 2145097 Способ сейсмической разведки. Заявлено 02.12.1997. Опубликовано 27.01.2000. G01V1/00.

ENGLISH

GEOPHYSICS

## Emission tomography principles in seismic researches

UDC 550.3

### Author:

**Boris M. Shubik** — Ph.D., leading scientist; [bmshtubik@mail.ru](mailto:bmshtubik@mail.ru)

Oil and Gas Research Institute, Moscow, Russian Federation

### Abstract

Based on the principles of emission tomography, new effective techniques for 3D mapping of active media, real-time detection and localization of seismic and microseismic sources were developed. Also, a system of 3D seismic prospecting of complex geological media by means of diffraction tomography with controlled irradiation and adaptive filtering was developed.

### Materials and methods

Microseismic data recorded by seismic arrays, seismic prospecting data, and data of seismic networks. Methods of scanning geological media and optimal adaptive filtering.

### Results

(I) It was shown for the first time that the spatial distribution of endogenous

microseismic activities is stable over time.

Emission tomography methods may be used to solve many exploration problems.

(II) A robust and fast method for the detection and location of seismic events of different levels was developed on the basis of the principles of emission tomography. It can use any types of seismic waves (within coherent or incoherent analysis).

(III) The emission tomography approach was also used to develop a 3D seismic prospecting method (diffraction tomography with controlled irradiation). It increases the resolution and reliability of the detection of inhomogeneities in the geological medium. This is achieved by focusing the emitting and receiving seismic arrays on the internal points of the medium, and stacking and optimal adaptive matched filtering of the received signals.

### Conclusions

This pioneering study has stimulated the intensive development of various passive seismic methods that are now widely used. The proposed method for the detection and localization of seismic events provides the possibility of rapid analysis and monitoring of seismicity associated with macro- and microseismic sources and hydraulic fracturing. The 3D seismic prospecting method can be used for post-processing of complex fragments of CDP seismic sections to reveal local inhomogeneities where there are no traceable seismic boundaries. For this purpose, this technique should be implemented in seismic data processing systems.

### Keywords

tomography, epicentre, detection, location, monitoring, diffraction, adaptation, 3D seismic

### References

1. Gal'perin E.I., Vinnik L.P., Petersen N.V. *O modulyatsii vysokochastotnogo seysmicheskogo shuma prilivnymi deformatsiyami litosfery* [About modulation the high-frequency seismic noise by tidal deformation the lithosphere]. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*, 1987, issue 12, pp. 102–109.
2. Nikolaev A.V., Troitsky P.A. Lithospheric studies based on array analysis of P-coda and microseisms. *Tectonophysics*, 1987, Vol. 140, issue 2, pp. 103–113.
3. Shubik B.M., Kiselevich V.L., Nikolaev A.B., Rykunov L.N. *Mikroseysmicheskaya aktivnost' v gidrotermal'noy oblasti* [Micro seismic activity in hydrothermal area]. *Fizicheskie osnovy seysmicheskogo metoda. Netraditsionnaya geofizika*. Moscow: Nauka, 1991, pp. 143–158.
4. Shubik B.M., Nikolaev A.V., Rykunov L.N., Kiselevich V.L. and Flovenz O.G. Array based seismic emission tomography. XXV General Assembly ESC. Reykjavik, Iceland, 1996. p. 37.
5. Shubik B.M. Seismic emission tomography techniques. Knowledge for the Future. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) IAHS IAPSO IASPEI Joint Assembly Gothenburg, abstracts. Sweden, July, 2013.
6. Arnasson K., Flovenz O.G. Evaluation of physical methods in geothermal exploration of rifted volcanic crust, *Transactions of Geothermal Resources Council*. 1992. Vol. 16, pp. 207–214.
7. Shubik B.M., Ermakov A.B. *Avtomaticheskoe opredelenie koordinat i momentov vznikeniya seysmicheskikh sobyitij na osnove printsipov emissionnoy tomografii* [Automatic determination of coordinates and moments of occurrence of seismic events on the basis of emission tomography]. *Proceedings "Geotomography problems"*. Moscow: Nauka, 1997, 336 p.
8. Shubik B.M., Ermakov A.B. Automatic seismic event detection and location in space and time based on the principles of emission tomography. XXIV General Assembly Society Symposium Solid Earth Geophysics&Geology, General Assembly of the European Geophysical Society, Sec. SE34, The Hague, Netherlands, 1996, Vol. 1, p. 124.
9. Shubik B.M. Real-time automatic seismic monitoring system. Knowledge for the Future International, Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) IAHS IAPSO IASPEI Joint Assembly Gothenburg, abstracts. Sweden, July, 2013.
10. Shubik B.M. *Printsipy postroeniya samonastroyayushchikhsya protsedur obrabotki seysmicheskikh dannykh* [Principles of construction of self-tuning procedures for the processing of seismic data]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*, 2011, issue 3, pp. 39–47.
11. Patent for invention RU № 2129719 *Sposob seysmicheskoy razvedki* [Method of seismic prospecting]. Priority from 18.08.1997. Published 27.04.1999.
12. Patent for invention RU № 2136018 *Sposob seysmicheskoy razvedki* [Method of seismic prospecting]. Priority from 02.12.1997. Published 27.08.1999 G01V1/00.
13. Patent for invention RU № 2145097 *Sposob seysmicheskoy razvedki* [Method of seismic prospecting]. Priority from 02.12.1997. Published 27.01.2000. G01V1/00.