

## СИСТЕМНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА, СГЕНЕРИРОВАННОГО ЧЕЛЯБИНСКИМ МЕТЕОРОИДОМ

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
Украина, Харьков, 61022, проспект Науки, 14

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет,  
Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы, 4

**Аннотация.** Приведены результаты системного спектрального анализа, использующего ряд линейных и нелинейных интегральных преобразований, временных регистраций акустического сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом и зарегистрированного инфразвуковой станцией в Антарктиде. Проанализирована тонкая структура сигнала

**Ключевые слова:** спектральный анализ, линейные и нелинейные интегральные преобразования, показатель широкополосности, структура сигнала, параметры источника, канал распространения, задачи обнаружения и идентификации

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Инфразвуковые волны, возникшие после пролета и взрыва Челябинского тела, зарегистрированы инфразвуковыми станциями международной системы мониторинга ядерных испытаний с энерговыделением не менее 1 кт, а также станциями, расположенными в ряде геофизических обсерваторий. Ближайшая от места взрыва метеороида станция расположена в г. Актюбинск, Республика Казахстан (расстояние от источника инфразвука  $R \approx 540$  км), наиболее удаленная станция – в Антарктиде, для которой  $R$  составляет 15500 км (прямой сигнал) и 25000 км (обратный сигнал).

Порожденные Челябинским метеороидом инфразвуковые волны, испытав многократные отражения, преломление и рассеяние в атмосфере и преодолев расстояние в тысячи–десятки тысяч километров были зарегистрированы чувствительными микробарографами. Амплитуда и спектр инфразвука несут в себе информацию об источнике волн и параметрах атмосферы [1–9].

Результаты наблюдений инфразвукового эффекта Челябинского метеороида представлены в работах [10–13], а результаты теоретических оценок – в работах [14–17].

Для повышения точности определения параметров источников инфразвука, таких как землетрясения, взрывы вулканов, падения крупных космических тел естественного и техногенного происхождения, стартов и полетов ракет и самолетов, мощных взрывов, а также их селекции требуется знание тонкой структуры инфразвуковых сигналов. Изучение этой структуры целесообразно проводить при помощи разработанного авторами системного спектрального анализа [18, 19].

Исследования показали, что амплитуда инфразвука сильно зависит от скорости и направления ветра на стратосферных и термосферных высотах, направления на станцию и метеоусловий на трассе распространения. Оказалось, что амплитуда сигнала изменяется на порядок и более при одной и той же энергии источника (см., например, [9]). По этой причине измерения амплитуды инфразвука не могут быть положены в основу метода определения энергии взрывного источника. Для оценки энергии более предпочтительны измерения периода основного колебания инфразвука.

Целью настоящей работы является системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сопровождавшего полет и взрыв Челябинского космического тела и зарегистрированного на станции IS27 (ФРГ, Антарктида). Выбор именно этой станции обусловлен тем, что инфразвуковой сигнал в этом случае проходил расстояния 15500 и 25000 км. Именно трассы такой протяженности необходимы для глобального мониторинга источников инфразвукового сигнала и оценки его параметров.

## 2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

### 2.1. Средства наблюдения

В Антарктиде станция *IS27* Международной системы мониторинга Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний в качестве акустических систем использует инфразвуковые станции *MB2000*, с частотной полосой 0,001 – 20 Гц, чувствительностью датчика 20 мВ/Па (динамический диапазон 108 дБ). Для оптимального обнаружения инфразвуковых сигналов, измерительные элементы геометрически расположены в 9 точках вдоль спирали с равномерно увеличивающимся радиусом. Расстояние от центрального до крайнего элемента по прямой составляет около 1,3 км [20].

Методика определения инфразвуковых сигналов базируется на когерентности полезного сигнала в каждом из элементов группы, в то время как шум является случайным. Отдельные микробарографы регистрируют сигнал в разные моменты времени, по мере распространения через группу. По кросс-корреляциям между парами датчиков определяют временные задержки между отдельными датчиками. Параметры распространения такие как азимут и скорость сигнала получают из анализа временных задержек. Для детектирования и расчета параметров использовалась методика *Progressive Multi Channel Correlation (PMCC)* [21].

### 2.2. Методы анализа

Обработка экспериментальных данных проведена с помощью системного спектрального анализа (ССА) [18, 19]. ССА – это метод, основанный на совместном применении целого набора различных линейных и нелинейных интегральных преобразований. Основная его идея состоит в компенсации недостатков одних преобразований за счет достоинств других. Обоснование целесообразности выбора существующего на сегодня множества преобразований, а также тех или иных характеристик на их основе подробно рассмотрено, например, в работах [18, 19]. Обработка проводилась с использованием *Wavelet Toolbox*, *Wavelab*, *TimeFreq*, а также оригинального программного обеспечения авторов для системы компьютерной математики *MATLAB* [18, 19].

Рассмотрим особенности применения ССА к обработке рассматриваемых регистраций на примере рис. 1 (линейные преобразования) и рис. 2 (нелинейные преобразования). Порядок представления числовых характеристик используемых преобразований на остальных двух рисунках аналогичен. Анализируемый сигнал показан на рис. 1, а, к и рис. 2, а, к. Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) проведено с использованием вейвлета Морле. Выбор именно этого вейвлета обоснован предположениями исследователей о характере ожидаемого возмущения. Именно вейвлет Морле наибольшим образом похож на сверхширокополосный квазипериодический процесс, который, в конечном счете, и был обнаружен. НВП представлено модулем спектра (рис. 1, б), скелетоном (рис. 1, в), энергограммой (рис. 1, е) и дисперсией модуля спектра (рис. 1, ж). Аналитическое вейвлет-преобразование (АВП), которое дает в используемый авторами формат фазу комплекснозначного спектра (рис. 1, г), выполнено на основе комплексного вейвлета Гаусса первого порядка. При использовании преобразования Габора (ПГ) применена оконная функция во временной области, ширина которой составляет 1/10 длины всей анализируемой временной реализации. ПГ представлено модулем спектра (рис. 1, д), энергограммой (рис. 1, з) и дисперсией модуля спектра (рис. 1, и). В адаптивном преобразовании Фурье (АПФ) использовано окно Хэмминга, авторемодельные базисные функции преобразования состоят из одного периода синусоиды. АПФ представлено представлено модулем спектра (рис. 1, л), скелетоном (рис. 1, м), энергограммой (рис. 1, п) и дисперсией модуля спектра (рис. 1, р).

Динамическое (оконное) преобразование Фурье (ДПФ) выполнено с применением того же окна Хэмминга шириной  $1/10$  от длины анализируемой реализации. ДПФ представлено представлено модулем спектра (рис. 1, н), скелетоном (рис. 1, о), энергограммой (рис. 1, с) и дисперсией модуля спектра (рис. 1, т). При проведении преобразования Вигнера (ПВ) для получения функции спектральной плотности (ФСП) (рис. 2, б) использовано классическое преобразование, а скелетон построен с применением псевдопреобразования Вигнера (рис. 2, в). Также для ПВ имеются энергограмма (рис. 2, е) и среднеквадратичное отклонение модуля ФСП (рис. 2, ж). Спектрограмма Фурье (СФ) (рис. 2, г) получена также с использованием окна Хэмминга шириной  $1/10$  от длины анализируемой реализации. Для нее построены скелетон (рис. 2, д), энергограмма (рис. 2, з) и среднеквадратичное отклонение модуля ФСП (рис. 2, и). Преобразование Чои–Вильямса (ПЧВ) (рис. 2, л) вычислено для значения параметра  $s = 1$ , который отвечает за подавление интерференционных структур на время-частотной плоскости. Для ПЧВ имеются также скелетон (рис. 2, м), энергограмма (рис. 2, п) и среднеквадратичное отклонение модуля ФСП (рис. 2, р). Последним нелинейным преобразованием, используемым в данном формате, является преобразование Борна–Жордана (ПБЖ). Оно представлено своей ФСП (рис. 2, н) скелетоном (рис. 2, о), энергограммой (рис. 2, с) и среднеквадратичным отклонением модуля ФСП (рис. 2, т).

Характер подавления интерференционных структур, присутствующих на ФСП ПВ вследствие его нелинейности, различен для ПЧВ, ПБЖ и СФ. Последняя, как известно, дает наилучшее их подавление, но в качестве платы за это приводит к наибольшему ухудшению время-частотного разрешения.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В результате проведения ССА установлено следующее.

На экспериментальной регистрации сигнала, прошедшего по короткой траектории ( $R \approx 15500$  км), зарегистрированного на станции в Антарктиде 15 февраля 2013 г. с 17.30 UT до 18.15 UT, обнаружено волновое возмущение длительностью около  $\tau \approx 20$  мин с характерными периодами  $T \approx 25–90$  с (см. рис. 1, рис. 2). При более детальном рассмотрении достаточно хорошо видна его более сложная структура. Выделено два последовательных волновых возмущения, классифицируемых как сверхширокополосные (СШП) процессы с переменной средней частотой (ПСЧ) [22].

Судя по функциям спектральной плотности ФСП нелинейных преобразований и особенно по ФСП ПВ, которая имеет наилучшее время-частотное разрешение из всех использованных интегральных преобразований, первый СШП с ПСЧ процесс начинается примерно в 17.41 UT и имеет длительность  $\tau \approx 10–11$  мин (см. рис. 2). Сравнение ФСП линейных преобразований с их энергограммами показывает, что периоды возмущений первого СШП с ПСЧ процесса лежат в диапазоне  $T \approx 35–90$  с, показатель широкополосности всего процесса равен  $\mu \approx 0,8$ , динамический показатель широкополосности процесса [22] изменяется в пределах  $\mu_d \approx 0,6–0,3$ , уменьшаясь с течением времени, при этом средний период сигнала  $T_0$  уменьшается примерно по линейному закону от 65 до 40 с.

Второй СШП с ПСЧ процесс начинается примерно в 17.52 UT, имеет длительность  $\tau \approx 15–16$  мин, периоды возмущений  $T \approx 25–60$  с, показатель широкополосности всего процесса равен  $\mu \approx 0,8$ , динамический показатель широкополосности процесса изменяется в пределах  $\mu_d \approx 0,2–0,3$ , при этом средний период сигнала  $T_0$  уменьшается примерно по линейному закону от 50 до 30 с.

Первый и второй СШП с ПСЧ процессы частично перекрываются по времени на протяжении примерно 4–5 мин (см. рис. 1, рис. 2).

На экспериментальной регистрации сигнала, прошедшего по длинной траектории ( $R \approx 25000$  км), зарегистрированного на станции в Антарктиде 16 февраля 2013 г. с 02.50 UT до 03.35 UT, обнаружено волновое возмущение длительностью около  $\tau \approx 20$  мин, с характерными периодами  $T \approx 20-70$  с (см. рис. 3, рис. 4). Оно также имеет внутреннюю структуру, состоящую из двух СШП с ПСЧ процессов.

Первый СШП с ПСЧ процесс начинается примерно в 03.03 UT, имеет длительность  $\tau \approx 10-15$  мин, периоды возмущений  $T \approx 20-40$  с, показатель широкополосности всего процесса равен  $\mu \approx 0,7$ , динамический показатель широкополосности процесса изменяется в пределах  $\mu_d \approx 0,35-0,3$ , при этом средний период сигнала  $T_0$  уменьшается примерно по линейному закону от 32 до 22 с. Может показаться, что здесь имеет место два ультракоротких СШП процесса, а не один СШП с ПСЧ процесс. Однако мнение авторов склоняется ко второму варианту, что основано, в первую очередь, на анализе ФСП ПВ (см. рис. 4).

Второй СШП с ПСЧ процесс начинается примерно в 03.10 UT, имеет длительность  $\tau \approx 25$  мин, периоды возмущений  $T \approx 28-70$  с, показатель широкополосности всего процесса равен  $\mu \approx 0,8$ , динамический показатель широкополосности процесса изменяется в пределах  $\mu_d \approx 0,5-0,2$ , при этом средний период сигнала  $T_0$  уменьшается примерно по линейному закону от 55 до 30 с.

Первый и второй СШП с ПСЧ процессы также частично перекрываются по времени на протяжении примерно 3 – 5 мин.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа структуры сигналов различного происхождения и назначения традиционно использовалось преобразование Фурье, обладающее хорошо известными достоинствами и недостатками. Для повышения информативности о точной структуре сигналов целесообразно использовать ССА. Знание тонкой структуры сигнала позволит на качественно новом уровне решать (или существенно улучшить результат решения) задач обнаружения, идентификации и оценки параметров источника инфразвуковых волн (сигналов). Источником таких волн, как известно, являются многие естественные процессы (землетрясения, извержения вулканов, падения космических тел, полярные сияния, штормы, погодные фронты, грозы и т. д.), а также техногенные процессы (мощные взрывы, старты, полеты и посадки космических аппаратов, полеты самолетов, функционирование крупных промышленных агрегатов, систем сброса больших масс воды и т. д.) [23 – 27].

В работе на примере анализа инфразвукового сигнала, сгенерированного полетом и взрывом Челябинского космического тела, показана возможность исследования тонкой структуры сигнала (спектрограмм, фазы комплекснозначного спектра, скелетонов, энергограмм, среднеквадратичного отклонения модуля ФСП разных интегральных преобразований и др.). Выявлено, в частности, что инфразвуковой сигнал состоял из двух сильно отличающихся по своим параметрам составляющих. Первая из них связана с генерацией и распространением взрывной ударной волны, вторая – с генерацией и распространением баллистической волны. Только это обстоятельство позволяет выделить и идентифицировать источник инфразвука – вторгающееся в атмосферу космическое тело. В законах изменения периодов колебаний содержится информация об энергии (скорости) космического тела и его высоте. Значения  $\mu$  позволяют оценить параметры канала распространения инфразвука. Информация о дальности до источника содержится во времени запаздывания сигнала по отношению к моменту взрыва метеороида. Поскольку скорость распространения зависит от направления трассы и метеоусловий на трассе, то ее необходимо уточнять для конкретной трассы. Это позволяет сделать дисперсионная зависимость (зависимость групповой скорости от периода составляющих сигнала), получаемая из ФСП.

Дисперсионное расплывание инфразвукового сигнала дает дополнительную и независимую информацию о дальности от источника инфразвука до места регистрации.

Таким образом, применение ССА дает обширные сведения о тонкой структуре инфразвукового сигнала, в котором содержится информация об источнике инфразвука и трассе распространения. Все это позволяет решать на новом технологическом уровне задачи обнаружения, идентификации и оценки параметров источника инфразвука.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Проведен ССА порожденных Челябинским метеороидом регистраций инфразвуковых волн, которые испытав многократные отражения, преломление и рассеяние в атмосфере и преодолев расстояние в 15–25 тыс. км были, зафиксированы чувствительными микробарографами, расположенными в Антарктиде.

2. ССА позволил провести анализ внутренней структуры возникающих волновых возмущений, созданных Челябинским метеороидом. Установлено, что каждое из двух проанализированных возмущений содержит в себе два СШП с ПСЧ процесса, показатели широкополосности которых составляют  $\mu \approx 0,7–0,8$ , а средние периоды уменьшаются с течением времени примерно по линейному закону. Первый и второй СШП с ПСЧ процессы в обоих случаях перекрываются по времени примерно на 3–5 мин.

3. Обнаруженные закономерности в тонкой структуре инфразвукового сигнала могут быть использованы при совершенствовании алгоритмов обнаружения, идентификации и оценки параметров источников инфразвуковых сигналов.

Авторы благодарны А. И. Лящуку за предоставление регистраций акустического сигнала для их анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Reed J.* Airblast overpressure decay at long ranges / J. Reed // J. Geophys. Res. – 1972. – V. 77. – P. 1623–1629.

2. *ReVelle D.O.* On meteor-generated infrasound / D. O. ReVelle // J. Geophys. Res. – 1976. – V.81. – P. 1217–1231.

3. *Edwards W. N.* Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves / W. N. Edwards, P. G. Brown, D. O. ReVelle // Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2006. –V. 68. – P. 1136–1160.

4. Infrasound scaling and attenuation relations from Soviet explosion data and instrument design criteria from experiments and simulations / Stevens, J.L., D. Adams, G.E. Baker, et al. // Proceedings 21th Annual Seismic Research Symposium on monitoring a CTBT. – 1999.– P. 185–194.

5. An estimate of the terrestrial in flux of large meteoroids from infrasonic measurements / E. Silber, D. O. ReVelle, P. Brown, W. Edwards // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114. – P. 1–8.

6. *Edwards W.N.* Meteor-generated infrasound: theory and observation / W. N. Edwards // Springer, Dordrecht, Netherlands. – 2010. – P. 361–414.

7. *Silber E. A.* Infrasound detection of a near-earth object impact over Indonesia on 8 October 2009 / E. A. Silber, A. LePichon, P. G. Brown / Geophys. Res. Lett. – 2011. – V. 38, No. 12.

8. Infrasound production by bolides: A global statistical study / T. A. Ens, P. G. Brown, W. N. Edwards, E. A. Silber // Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2012. – V. 80. – P. 208–229.

9. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. / В. В. Емельяненко, О. П. Попова, Н. Н. Чугай и др. // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47. – № 4. – С. 262–277.

10. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям / Ю. С. Рыбнов, О. П. Попова, В. А. Харламов и др. // Динамические процессы в геосферах. Сб. науч. тр. ИДГ РАН. – М.: Геос. – 2013. – Вып.4. – С. 21–31.
11. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. / В. В. Алпатов, В. А. Буров, Ю. П. Вагин и др. – М.: ФГБУ «ИПГ», 2013. – 37 с.
12. *Сорокин А. Г.* Об инфразвуковом излучении Челябинского метеороида / А. Г. Сорокин // Труды XXIV Всероссийской научной конференции. Распространение радиоволн. РРВ-24, Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014 г. Научный редактор Куркин В. И. – 2014. – Т. III. С. 242 – 245.
13. Russian fireball largest ever detected by СТВТО infrasound sensors / A. Le Pichon, L. Ceranna, S. Pilger et al // Geophysical Research Letters. – 2013 – V.40, №14 – P. 3732–3737.
14. *Черногор Л. Ф.* Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» / Л. Ф. Черногор // Инженерная физика. – 2013. – № 8. – С. 23 – 40.
15. *Chernogor L. F.* The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage / L. F. Chernogor, Rozumenko V. T. // Problems of Atomic Science and Technology. – 2013. – Vol. 86, No 4. – P. 136 – 139.
16. *Черногор Л. Ф.* Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования / Л. Ф. Черногор // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / [редкол.: Н. А. Антипин и др. ; сост. Н. А. Антипин]. – Челябинск, 2014. – С. 229–264.
17. *Черногор Л. Ф.* Физические эффекты пролета Челябинского метеорита / Л. Ф. Черногор // Доповіді Національної академії наук України. – 2013. – № 10. – С. 97 – 104.
18. *Лазоренко О. В.* Системный спектральный анализ сигналов: теоретические основы и практические применения / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. –Т. 12, № 2. –С. 162 – 181.
19. *Лазоренко О. В.* Сверхширокополосные сигналы и процессы: монография / О. В. Лазоренко., Л. Ф. Черногор. – Харьков: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2009. – 576 с.
20. [http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Seismologie/Kernwaffenteststopp\\_en/%C3%9Cberwachungnetz\\_en/Deutsche-IMS-Stationen/deutsche-ims-stationen\\_inhalt.html](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Seismologie/Kernwaffenteststopp_en/%C3%9Cberwachungnetz_en/Deutsche-IMS-Stationen/deutsche-ims-stationen_inhalt.html)
21. *Cansi Y.* An automated seismic event processing for detection and location: the P. M. C. C. method / Y. Cansi // Geophys. Res. Lett. – 1995. – V. 22. – P. 1021 – 1024.
22. *Лазоренко О. В.* Использование атомарных функций в Чои-вильямс-анализе сверхширокополосных сигналов / О. В. Лазоренко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2009. – Т. 52, № 8. – С. 3 – 12.
23. *Пасечник И. П.* Наука доказала: ядерные взрывы можно обнаружить, где бы они ни производились / И. П. Пасечник // Природа. – 1962. – №7. – С. 3 – 12.
24. *Голицын Г. С.* Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере / Г. С. Голицын, В. П. Докучаев // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1977. – Т.13, №9. – С. 926–936.
25. *Госсард Э.* Волны в атмосфере / Э. Госсард, У. Хук; пер. с англ. И. М. Шейнис; ред. пер. Г. С. Голицын. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
26. *Черногор Л. Ф.* Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 1. – С. 119 – 132.
27. *Черногор Л. Ф.* Физика и экология катастроф: монография / Л. Ф. Черногор // Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. – 556 с.

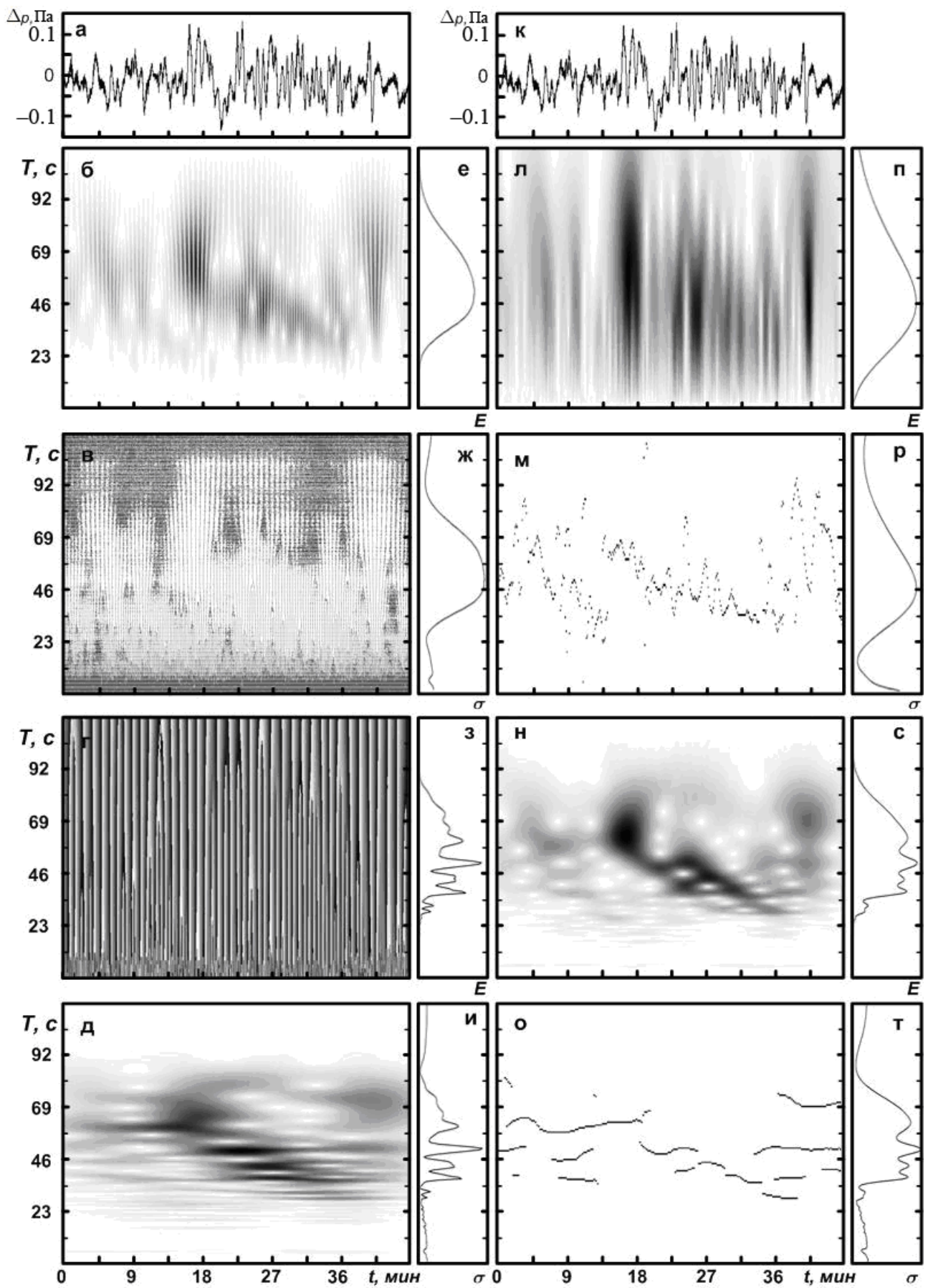


Рис. 1.

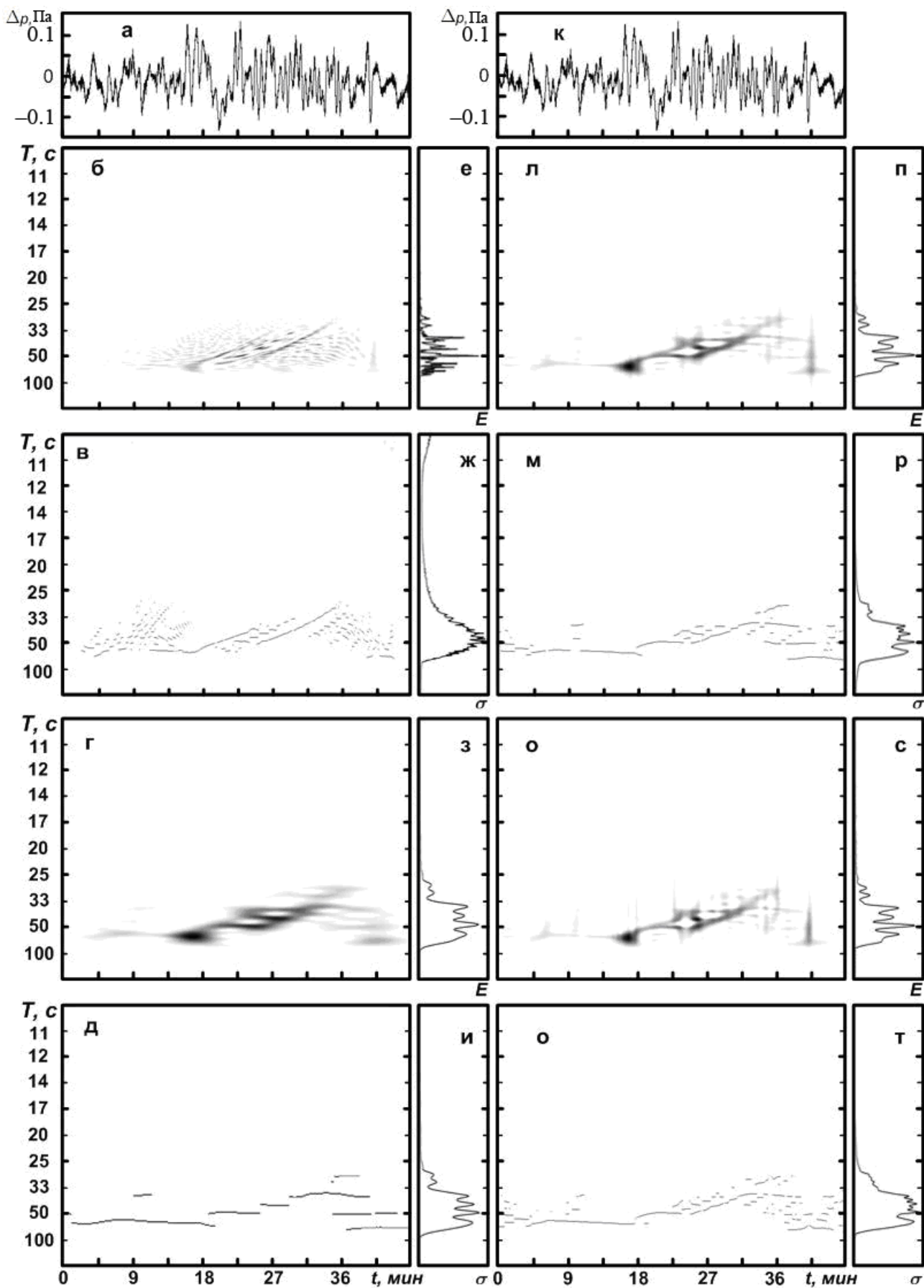


Рис. 2.



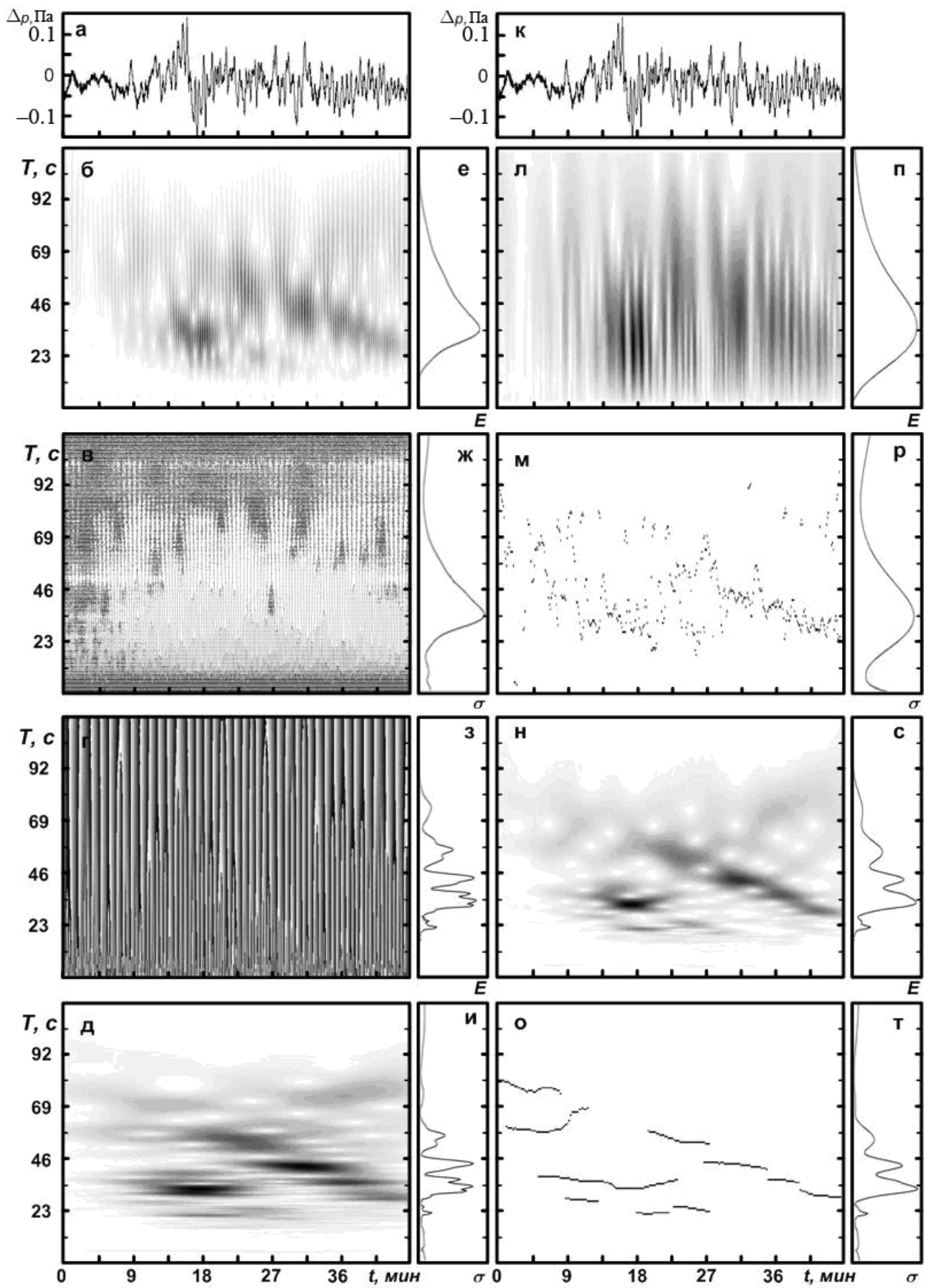


Рис. 3.

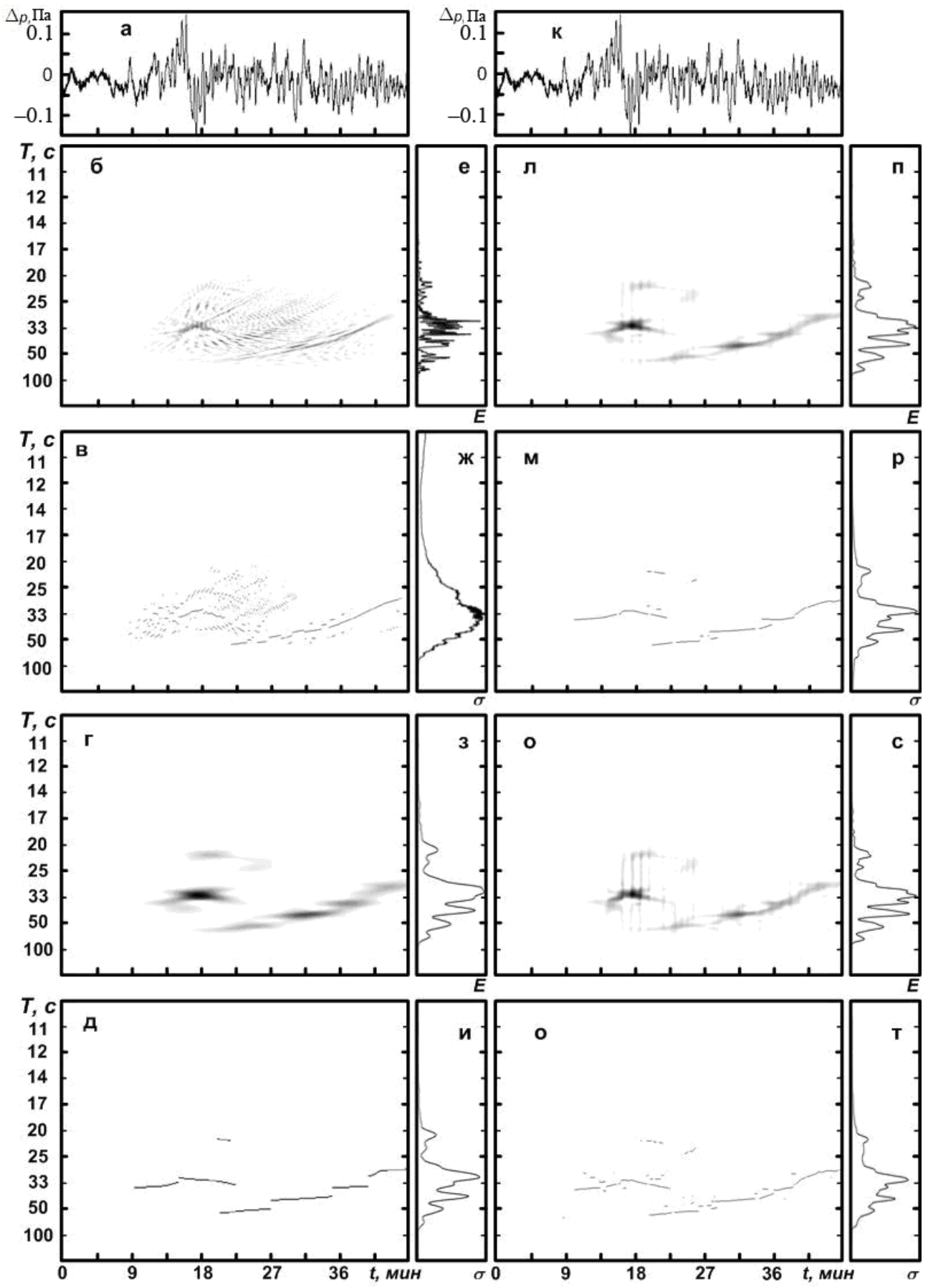


Рис. 4.