

Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина

*Институт космифизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Россия, 684034, с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край, ул. Мирная, 7
e-mail: marpl@ikir.kamchatka.ru*

Методы исследования пространственной анизотропии геоакустической эмиссии

Получена 25.04.2008, опубликована 09.07.2008

С целью изучения характеристик геоакустической эмиссии в условиях повышенной сейсмичности на Камчатке с 1999 года производится мониторинг в частотном диапазоне 0–10 кГц. В качестве регистраторов геоакустических сигналов используются установленные в естественных и искусственных водоемах гидрофоны, ориентированные по сторонам света. Для более детального исследования анизотропии геоакустического излучения на различных стадиях сейсмической активности с 2004 года на озере Микижа на глубине около 5 метров установлена новая приемная система. В ее состав входит комбинированный приемник, разработанный в ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ, который позволяет одновременно регистрировать звуковое давление и три взаимно ортогональные компоненты колебательной скорости. Для изучения геоакустических сигналов разработан специальный аппаратно-программный комплекс, который позволяет регистрировать сигналы геоакустической эмиссии, автоматически выявлять в шумах импульсы, сгенерированные под действием деформационных сил, определять направление их прихода и частоту следования по каждому направлению, и в итоге строить диаграмму пространственного распределения геоакустической активности в полярной системе координат. Это позволяет исследовать локальные источники генерации таких импульсов. В статье рассмотрены методы, разработанные для автоматического выявления и анализа сигналов. Приведены результаты использования комплекса на моделях геоакустических сигналов в лаборатории и в натурных условиях.

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, векторно-фазовые методы, комбинированный приемник

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что землетрясениям предшествует длительный процесс подготовки. Предложено много моделей этого процесса, имеющих некоторые различия в деталях, но одинаково описывающих основные этапы подготовки. Первый из них, самый продолжительный во времени, длится годами и характеризуется накоплением упругой потенциальной энергии в гипоцентральной области. Следующий этап быстрого роста упругих напряжений, приводящих к лавинному трещинообразованию и подготовке магистрального разрыва, измеряется уже сутками или часами [1, 2]. Именно этот

временной период представляет наибольший интерес для исследований деформационных процессов, распространяющихся из очагов будущих землетрясений [3, 4].

Исследования, проведенные на Камчатке в ИКИР ДВО РАН в последние годы, показали [5–7], что как отклик на напряженное состояние среды в результате трещинообразования и проскальзывания в породах на расстояниях сотни километров от эпицентра готовящегося землетрясения возникают аномалии в геоакустической эмиссии (ГАЭ) приповерхностных пород. Рассматриваемые явления возникают, как правило, в виде сильных возмущений в диапазоне частот единиц килогерц в суточном временном интервале до сейсмического события, поэтому они могут использоваться при анализе деформационных изменений среды в процессе подготовки сейсмического события.

Мониторинг геоакустической эмиссии производится в частотном диапазоне 0–10 кГц. В качестве регистраторов геоакустических сигналов используются установленные в естественных и искусственных водоемах гидрофоны, ориентированные по сторонам света. Подробно методы геоакустических наблюдений в небольших водоемах изложены в [5, 6, 8]. Для более детального исследования анизотропии геоакустического излучения на различных стадиях сейсмической активности с 2004 года на озере Микижа на глубине около 5 метров установлена новая приемная система [9, 10]. В ее состав входит комбинированный приемник, разработанный в ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ, который позволяет одновременно регистрировать звуковое давление и три взаимно ортогональные компоненты колебательной скорости (градиента давления) [11].

Для изучения геоакустических сигналов был разработан специальный аппаратно-программный комплекс, который позволяет регистрировать сигналы геоакустической эмиссии, автоматически выявлять в шумах импульсы, сгенерированные под действием деформационных сил, определять направление их прихода и частоту следования по каждому направлению, и в итоге строить диаграмму пространственного распределения геоакустической активности в полярной системе координат. Это позволяет исследовать локальные источники генерации таких импульсов. В работе рассматриваются методы, разработанные для автоматического выявления и анализа сигналов. Для апробирования методов построена модель геоакустического сигнала. Приведены результаты применения комплекса на модели и реальных геоакустических сигналах.

1. АНАЛИЗ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Проведенные исследования показали [8, 12], что геоакустические сигналы, сгенерированные под действием деформационных сил, представляет собой череду ударных импульсов с амплитудой 0.1–1 Па. Частота следования таких импульсов зависит от относительных деформаций и меняется в широких пределах — от одиночных щелчков на временном интервале несколько секунд в фоновый период до десятков и даже сотен щелчков в секунду. Причинами генерации импульсов являются трещинообразование и проскальзывание в породах, поэтому частота их заполнения

изменяется от импульса к импульсу и, по-видимому, характеризует размер излучаемой области (трещины в породе). Обычно эта частота составляет единицы килогерц, что позволяет оценивать размеры областей генерации в единицы метров [6]. Протяженность импульсов не превышает 200 мс. На рис. 1. показан пример геоакустического импульса.

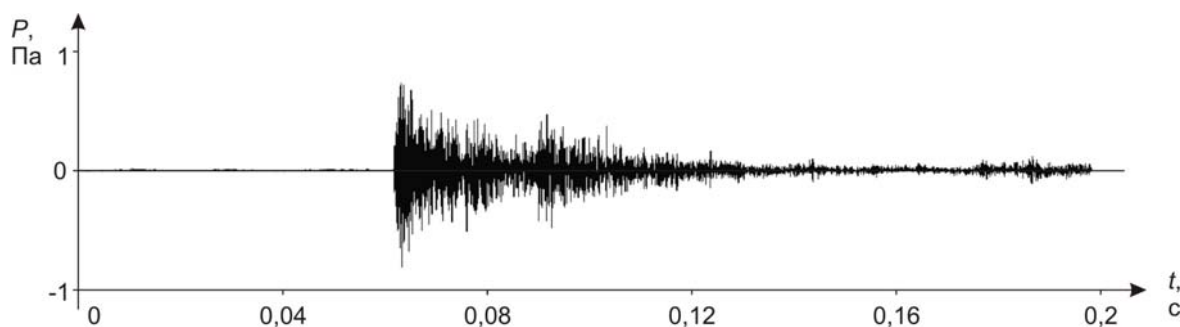


Рис. 1. Пример геоакустического импульса

В целом форма импульсов однотипна и состоит из трех основных частей: тихая область вначале, резкое увеличение интенсивности в середине и достаточно продолжительная область затухания (спада) сигнала. Фронт и начальный фрагмент спада геоакустического сигнала формируют основную часть импульса, несущую информацию о направлении на его источник. Существенную роль в формировании периода спада играет реверберация, обусловленная переотражением сигнала от границ водоема, что хорошо видно на приведенной иллюстрации в виде повторных повышений уровня сигнала. Учитывая ограниченность пространства водоема, имеющего горизонтальные размеры порядка 200 метров, и отдаление КП от берегов можно подсчитать, что на переотражения затрачивается от 25 до 250 мс. Таким образом, учитывая длительность импульса, это явление с большой вероятностью повлияет на полезный сигнал, вызвав внутриимпульсные искажения. Но при этом важно заметить, что амплитуда отраженного сигнала существенно меньше амплитуды первоначального.

Как ранее было указано, информация с выхода комбинированного приемника представляется в виде четырех синхронно регистрируемых параметров акустического поля: трех взаимно ортогональных компонентов градиента давления, являющихся проекциями вектора градиента звукового давления в волне на соответствующие координатные оси, и акустического давления, которое может быть при определенных условиях использовано для устранения неоднозначности направления, связанной с симметрией диаграмм направленности первых. Амплитуда сигнала значительно превышает уровень фоновых шумов (отношение сигнал/шум $\gg 1$). В этом случае для изучения направленности импульсов достаточно воспользоваться наиболее простым и эффективным для оптимизации вычислений **амплитудным методом** определения направления [11].

Рассмотрев импульсы в полярных координатах в горизонтальной плоскости, можно увидеть, что большинство из них имеют характерную направленность (рис. 2, а-б), выраженную в группировке отсчетов в ограниченной области с вытянутой вдоль одной оси формой. При этом для дальнейшего рассмотрения данной области, удобно рассматривать ее в виде описывающей фигуры, в какой-то степени приближенной к эллипсу или **описывающему эллипсу (ОЭ)**. Но при этом важно заметить, что половина эллипса, для примера обозначенная штриховой линией (рис. 3), является следствием симметрии диаграммы направленности каналов градиента давления КП.

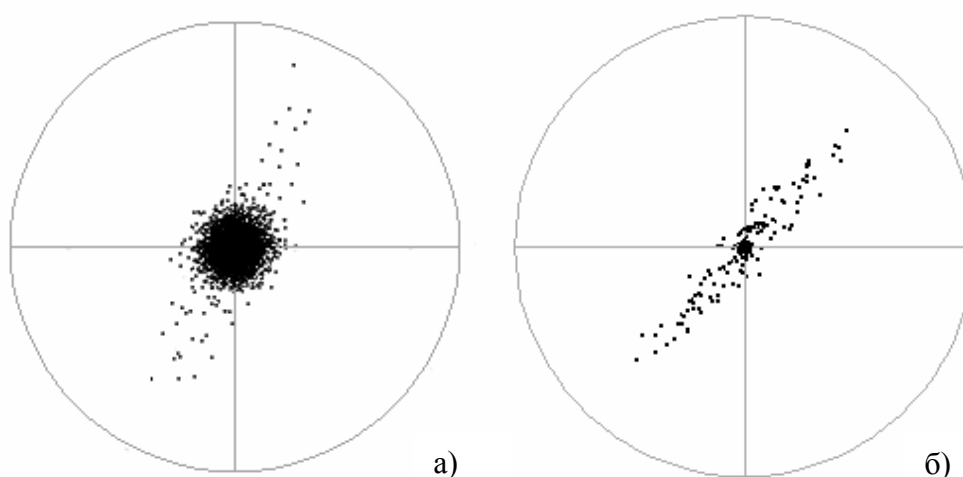


Рис. 2. Распределение отсчетов импульсов в полярных координатах

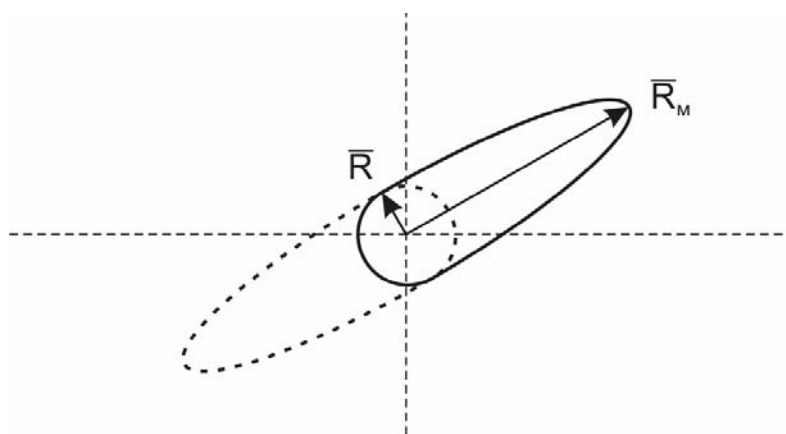


Рис. 3. Пример эллипса, описывающего пространство точек импульса

Приняв это утверждение за основу, можно предположить, что направленность импульса совпадает с направлением большой полуоси описывающего эллипса (рис. 3), а его амплитуда, соответственно, равна длине большого радиуса \bar{R}_M . Это предположение будет справедливым, если считать, что зарегистрированные импульсы представляют P -волну, поскольку S -волны при переходе в водную среду сильно затухают и в регистрируемых сигналах могут соответствовать лишь сигналам с

относительно малой амплитудой. Для устранения разночтений будем называть линию, проходящую через центр координат по большой полуоси ОЭ, **осью импульса**. Направление на источник импульса лежит на данной оси, но вследствие симметрии диаграммы направленности приемников градиента давления требуется дополнительный анализ с учетом канала давления для определения истинного направления. Далее это будет рассмотрено более подробно. Наличие малой полуоси ОЭ с радиусом \bar{R} обусловлено преимущественно слабой эллиптичностью волны. На начальном участке импульса геоакустической эмиссии (в отсутствие реверберации) величина эллиптичности зависит от частоты заполнения сигнала и от расстояния между точкой выхода волны в воду и КП, как правило, уменьшается с увеличением значений этих величин. На последующих участках импульса наиболее существенный вклад в эллиптичность вносит реверберация за счет суммирования многократно отраженных от границ водоема сигналов, приходящих по разным траекториям в точку регистрации сигналов. Наличие собственного шумового фона водоема приводит к неустойчивости формы эллипса движения частиц в среде тем большей, чем меньше соотношение сигнал/помеха. Вклад этих составляющих неодинаков и меняется со временем и от импульса к импульсу. Так в периоды повышенного уровня помех, вызванных, например, ветром, наблюдается повышение изотропного шума, который на данный период, имеет наибольший вклад (рис. 2, а). В более спокойные периоды активнее проявляются эллиптическое движение частиц среды и реверберация.

2. МОДЕЛЬ ГЕОАКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА

Для построения эффективной и адекватной системы обработки необходимо определить обобщенную модель геоакустических импульсов, которую целесообразно разложить на две составляющие. Первая описывает амплитудно-временные характеристики импульса, а вторая — его представление в полярных координатах.

В результате анализа амплитудно-временной формы огибающей импульса выявлены два характерных участка, которые можно назвать стадиями фронта и спада. Данные стадии модулируют сложный широкополосный геоакустический сигнал и хорошо описываются экспоненциальными функциями вида:

$$A(t) = A_0 e^{bt}. \quad (1)$$

Исследования характеристик более 1000 импульсов позволили оценить средние значения коэффициентов: для фронта — $A_1(t) = 160e^{0,12t}$, для спада — $A_2(t) = 20000e^{-0,01t}$. Таким образом, среднее время фронта составляет $9 \cdot 10^{-4}$ с, а время затухания примерно 0,013 с.

На основании вышесказанного, синтезируемый геоакустический импульс можно описать следующим соотношением:

$$F(t) = A(t)S(t), \quad (2)$$

где $S(t)$ — широкополосный сигнал в диапазоне частот 1–10 кГц,

$$A(t) = \begin{cases} 160e^{0,12t} & t \leq 9 \cdot 10^{-4} \\ 20000e^{-0,01t} & t > 9 \cdot 10^{-4} \end{cases} \text{ — огибающая сигнала.}$$

На рис. 4 приведен график функции $A(t)$, а на рис. 5 амплитудно-временная форма синтезированного импульса $F(t)$.

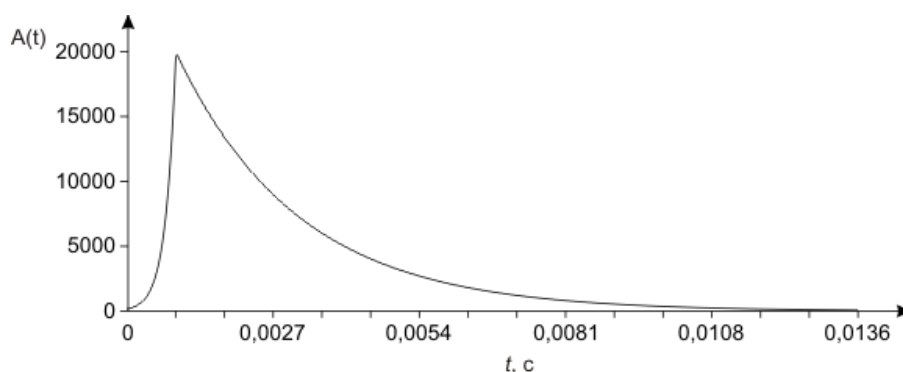


Рис. 4. График синтезированной огибающей импульса

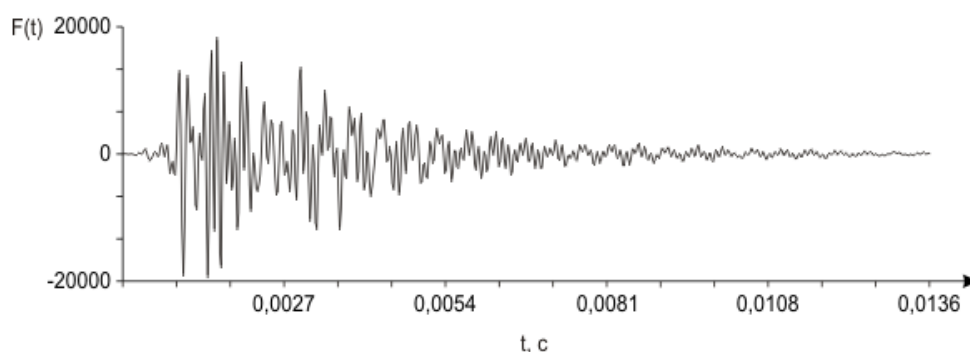


Рис. 5. Амплитудно-временная форма синтезированного сигнала

В основе второй части обобщенной модели импульса лежит его представление в полярных координатах. Для построения этой части модели необходимо проанализировать пространственные свойства реальных импульсов, характерное распределение отсчетов в которых показано на рис. 6.

Видно, что только малая часть отсчетов (<1%) формирует границы импульса (форму ОЭ). Остальные отсчеты распределены по достаточно сложному закону и имеют максимум в начале координат. На выноске видно, что в окрестности этой точки также наблюдается неравномерность распределения с выраженными максимумами в 1 и 3 четвертях, которые дают направление в 45 градусов и могут быть обусловлены различными наводками, действующими одновременно на все составляющие сигнала. При этом, так как количество таких отсчетов во много раз больше, чем отсчетов, несущих полезную информацию о направлении, то их суммарный вклад в усредненный азимут будет значителен. Если не учитывать данное обстоятельство, то оно неизбежно приведет к погрешностям результатов.

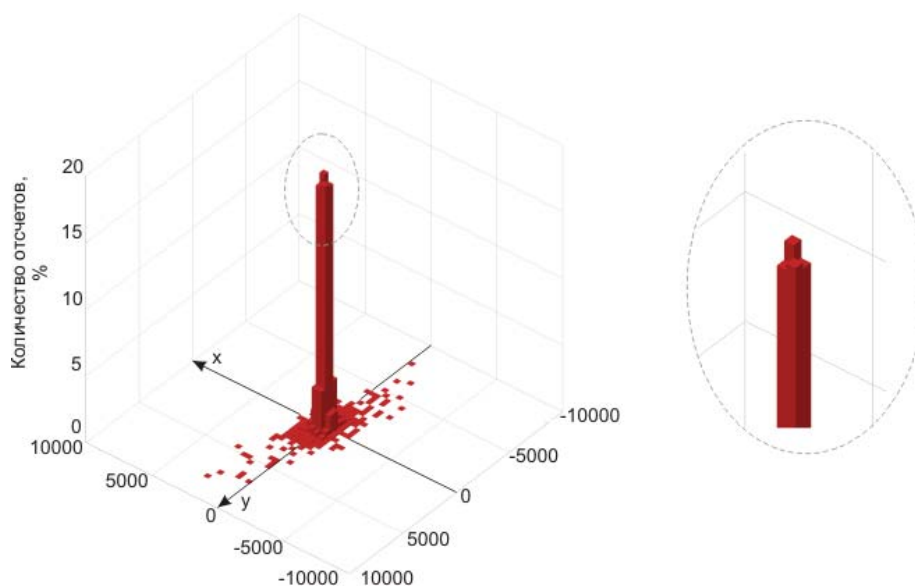


Рис. 6. Гистограмма распределения отсчетов геоакустического импульса

Модель импульса в полярных координатах можно представить в виде описывающего эллипса, ограничивающего пространство, заполненное отсчетами, распределенными по некоторому закону. Форма ОЭ хорошо описывается уравнением эллипса:

$$\frac{x^2}{R_o^2} + \frac{y^2}{R_m^2} = 1, \quad (3)$$

где R_o, R_m — соответственно большая и малая полуось.

Перепишав данное уравнение из канонического в параметрический вид и добавив в него азимут источника φ получим полное уравнение ОЭ:

$$\begin{cases} x = R_o \cos(\alpha) \cos(\varphi) + R_m \sin(\alpha) \sin(\varphi), \\ y = R_o \cos(\alpha) \sin(\varphi) + R_m \sin(\alpha) \cos(\varphi), \end{cases} \quad (4)$$

где x, y — взаимноортогональные направления, $\alpha \in [0, 2\pi)$.

Для уточнения численных значений эллиптичности реальных сигналов были исследованы характеристики порядка 10 000 импульсов собранных в течение 30 дней. Основным критерием при выборе импульсов было отсутствие помех, вызванных метеорологическими факторами, а также средними и сильными сейсмическими процессами в моменты сбора данных. Данное условие обеспечивает малую вероятность наложения соседних импульсов, что увеличивает достоверность измерений. Результат исследования представлен на рис. 7.

Видно, что график распределения эллиптичностей имеет явный максимум в значении 0,12, а в значении более 0,25 ослабляется более чем в 4 раза. Таким образом, можно говорить об определенной закономерности в форме регистрируемых

геоакустических импульсов, которую целесообразно использовать при дальнейшей обработке.

Гистограмма синтезированного импульса приведена на рис. 8. Для распределения отсчетов в импульсе применен достаточно простой экспоненциальный закон.

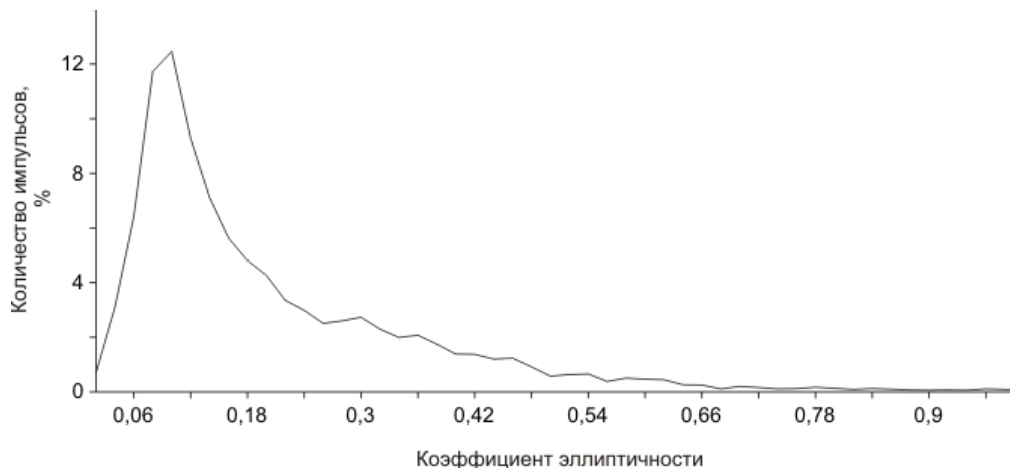


Рис. 7. График распределения эллиптичностей в спокойный период

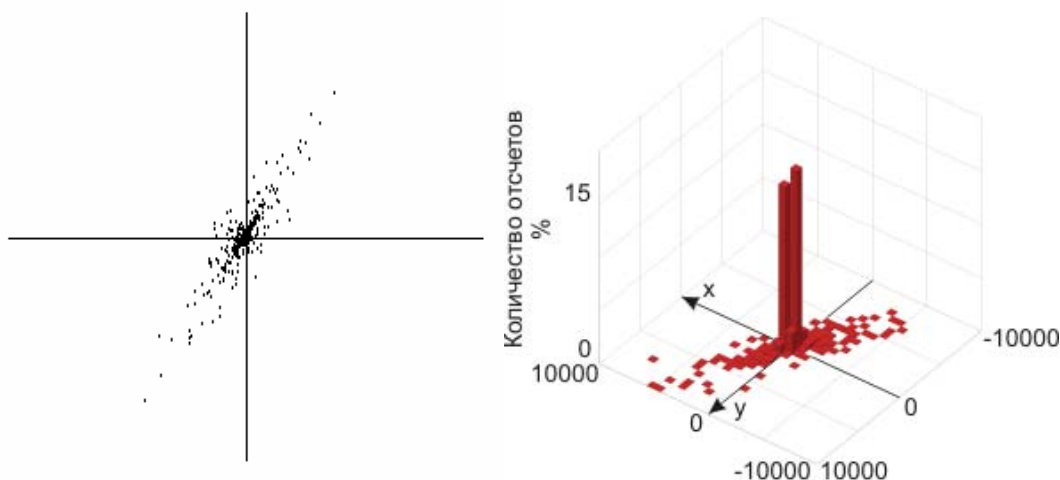


Рис. 8. Форма и гистограмма распределения отсчетов синтезированного импульса

3. МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Для автоматизации процесса поиска импульсов в непрерывном сигнале был разработан специальный метод, который, в соответствии с разработанной моделью, состоит из двух стадий: выявление импульса по его амплитудно-временным параметрам и проверка эллиптичности формы в полярных координатах. Для обработки реального сигнала обе стадии реализуются последовательно в перемещающемся окне данных размером 200 мс. Шаг перемещения окна равен его продолжительности в

случае успешного выявления импульса или $1/5$ от продолжительности при отсутствии импульса. После успешного выполнения этих стадий производится устранение неоднозначности направления и итоговая запись направления прихода импульса.

Первичная стадия выполняет функции грубого отбора проверяемых импульсов, позволяя ускорить процесс обработки, исключая заведомо излишнюю и ресурсоемкую проверку окна данных на следующей стадии. На данном этапе метода окно данных разбивается на три области (рис. 9), в каждой из которых находится значение \bar{N} по формуле:

$$\bar{N} = \max(\bar{n}_i), \quad (5)$$

где $\bar{n}_i = \frac{1}{T} \sum_{j=-T/2}^{T/2} |r_{i+j}|$ — среднее значение на интервале T .

Данная операция объединяет сглаживание части области и последующий поиск максимального значения, что позволяет учесть малые по времени, но большие по амплитуде сигналы. Для продолжения обработки текущего окна данных полученные значения \bar{N} должны соответствовать определенным амплитудным критериям (заштрихованные области на рис. 9).

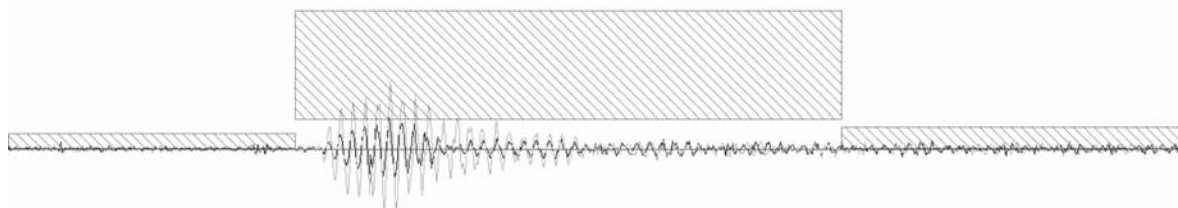


Рис. 9. Пример разбиения импульса на участки

Размах средней области импульса имеет пороги в максимальном и минимальном значениях. Минимальное значение необходимо для выявления всплеска сигнала на фоновом уровне. Верхнее значение необходимо для отбрасывания при обработке заведомо искаженного выходом за пределы динамического диапазона сигнала. Численные значения порогов определяются опытным путем, в соответствии с уровнем шумов на данном измерительном пункте.

На второй стадии метода производится исследование формы импульса в полярных координатах, суть которой заключается в выполнении двух операций: определение направления на источник сигнала и анализ эллиптичности ОЭ. В соответствии с технологиями построения комбинированного приемника определение направления каждого отсчета выделенного сигнала определяется по формуле:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y}{x}\right). \quad (6)$$

К сожалению, специфические особенности регистрируемого сигнала не позволяют применять простые методы определения направления прихода импульса по каждому его отсчету. Так из-за случайных выбросов с большой амплитудой невозможно определять направление по максимально удаленным от центра координат точкам. Обычное же усреднение направлений со всех отсчетов сигнала может привести к большим погрешностям результата, так как подавляющее большинство отсчетов обусловлено шумовыми воздействиями, рассмотренными ранее при анализе сигналов, и их суммарный вклад в усредненный азимут будет значителен.

Учитывая вышесказанное, был разработан более сложный, но эффективный и точный метод. Первоначально, в рамках данного метода, определяется множество $B[]$ по сути являющееся массивом из 360 максимальных значений радиусов отсчетов, округленных до целых значений направлений. Затем для получения ОЭ множество $B[]$ сглаживается методом скользящего среднего по формуле:

$$A[i] = \frac{\sum_{j=i-m}^{j=i+m} B[F_{norm}(j)]}{2m}, \quad (7)$$

где i, j, m — целые числа, $0 \leq i < 360$, $2m$ — интервал усреднения, $A[]$ — сглаженная диаграмма максимальных радиусов ОЭ,

$$F_{norm}(j) = \begin{cases} j \bmod 360, & \text{если } j \geq 0 \\ 360 + (j \bmod 360), & \text{если } j < 0 \end{cases} \text{ — функция нормализации угла.}$$

Вспомогательная функция $F_{norm}(j)$ нормализует угол j , приводя значение результирующего угла к виду $0 \leq F(j) < 360$. Исходя из практического опыта и минимизации аппаратных затрат, интервал усреднения $2m$ выбран равным 10.

После усреднения в положительной относительно вертикальной оси части ОЭ находится максимальная точка D (рис. 10), через которую строится предполагаемая ось эллипса, отклоненная на угол $\bar{\theta}$.

Относительно предполагаемой оси определяются перпендикуляры ($\beta_1 = \bar{\theta} + 90$ и $\beta_2 = \bar{\theta} - 90$), затем вычисляется средний радиус \bar{R} в перпендикулярных направлениях по формуле:

$$\bar{R} = \frac{r(\beta_1) + r(\beta_2)}{2}, \quad (8)$$

где β_1, β_2 — углы перпендикулярные основному направлению, $r(\beta)$ — средний радиус, определенный на промежутке от $\beta - a$ до $\beta + a$.

$$r(\beta) = \frac{\sum_{i=\beta-a}^{\beta+a} A[F_{norm}(i + \beta)]}{2a}, \quad (9)$$

где a — интервал усреднения по углу.

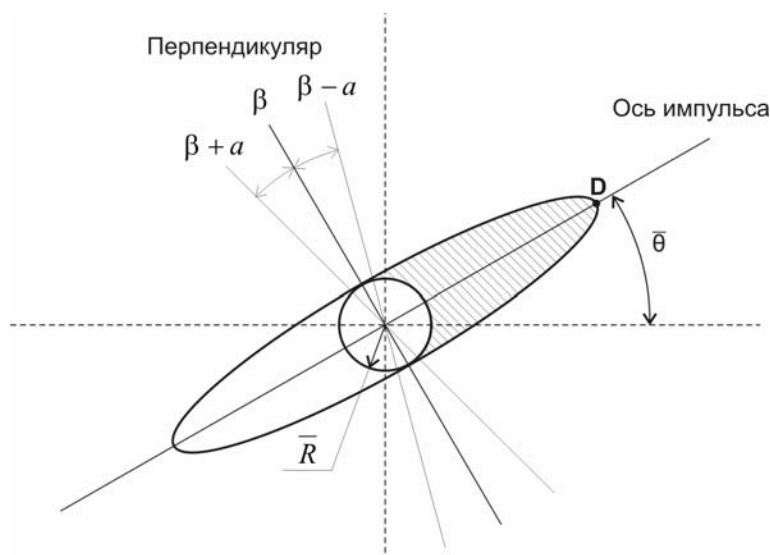


Рис. 10. Определение направления импульса

Предполагается, что все точки с радиусами меньшими \bar{R} не должны учитываться на следующих этапах обработки метода. Так мы исключаем влияние помеховых составляющих, в том числе обусловленных наводками на каналы. Далее происходит определение центра масс M всех отсчетов удовлетворяющих условию $r \geq \bar{R}$:

$$M_i = \sum m v_i, \quad (10)$$

где $v_i = \begin{cases} V_i, & \alpha \in [\bar{\theta} - \pi/2, \bar{\theta} + \pi/2] \\ -V_i, & \alpha \notin [\bar{\theta} - \pi/2, \bar{\theta} + \pi/2] \end{cases}$, $m = \frac{r}{\bar{R}}$ — масса каждого отсчета, r — радиус

отсчета, α — угловая мера отсчета, V_i — проекция колебательной скорости отсчета на направление i , $i = x, y$.

Масса каждой точки не одинакова и вычисляется по формуле (10). Это позволяет определить приоритет точкам с наибольшим радиусом, которые несут основную информацию о направлении всего импульса. Истинная ось импульса — это линия, проходящая через центр координат и вычисленный центр масс:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{M_y}{M_x}. \quad (11)$$

После определения оси импульса производится проверка формы импульса в полярных координатах (рис. 11). Для этого заново, но уже по уточненной оси импульса вычисляются значения \bar{R}_M и \bar{R} , после чего определяется значение эллиптичности ОЭ.

В соответствии с графиком распределения, представленным на рис. 7, выбран порог эллиптичности равный 0,25. При этом считаем, что в импульсах с эллиптичностью, превышающей это значение из-за высокого уровня помех, форма существенно искажена (пример на рис. 2, а) и такой импульс не подлежит дальнейшей обработке.

Далее, после успешного выявления импульса, на последней стадии разрабатываемого метода, производится устранение неоднозначности, вызванной симметрией диаграмм направленности векторных каналов КП. Наиболее простой способ решения этой задачи — оценка соотношения знаков фаз сигналов с соответствующих приемников градиента давления и давления. В этом случае для оценки истинного направления прихода импульса достаточно воспользоваться таблицей, приведенной в [11].

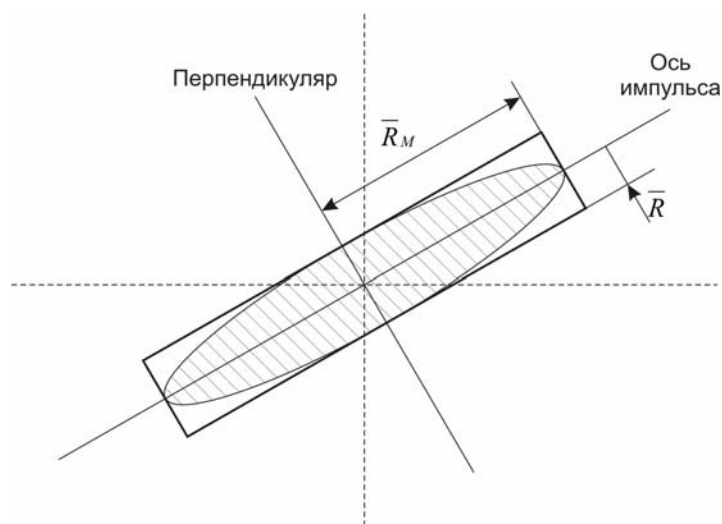


Рис. 11. Определение формы импульса

Другой способ решения этой задачи — оценка соотношения векторов потоков акустической мощности с взаимно ортогональных компонент:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_y}{W_x}, \quad (12)$$

$$W_i = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) V_i(t) dt, \quad (13)$$

где T — интервал усреднения (0,2 с), $i = x, y$, $P(t)V_i(t) = I_i$ — проекция вектора Умова на направление i .

Следует отметить, что здесь существуют определенные проблемы обработки. В формуле (13) $V_i(t)$ проекция колебательной скорости на выделенное направление в пространстве. Приемник же регистрирует градиент звукового давления, который связан со значением колебательной скорости через уравнение Эйлера. Поэтому формальное перемножение сигналов, регистрируемых каналом давления и каналом векторного приемника определяет только величину реактивной составляющей энергии. Для определения вектора Умова необходимо «широкополосно» проинтегрировать сигналы с выхода каналов градиента давления КП. Эта операция наиболее просто осуществляется после выполнения преобразования Фурье. Однако в данном случае из-

за существенной нестационарности регистрируемых сигналов это практически неосуществимо. Широкополосное численное интегрирование также представляет собой трудоемкий вычислительный процесс. Наиболее простое решение — осуществить широкополосный сдвиг на 90° фазы сигнала, регистрируемого каналом давления КП. Это можно сделать путем численного дифференцирования зависимости $P(t)$. В этом случае направление произведения полученных сигналов будет совпадать с направлением вектора Умова. Однако несколько проблематичным становится сравнивать энергетические характеристики импульсов по потоку акустической мощности у импульсов с различной частотой заполнения. В соответствии с известным механизмом формирования вектора потока акустической мощности для эллиптически поляризованных волн вектор W будет направлен в направлении оси эллипса, соответствующего направлению распространения волны. В перпендикулярном направлении его среднее значение за время, равное или значительно превышающее период, обращается в ноль. Как показали ранее проведенные исследования [13] для P -волн это обычно длинная ось эллипса, а для S -волн — короткая.

Для более удобного визуального восприятия на заключительной стадии разрабатываемого метода производится отображение результатов обработки данных. До описания методов формирования и интерпретации результатов необходимо ввести некоторые дополнительные определения.

1. **Пространственная геоакустическая активность** $N'(\alpha)$, выражающая количество зарегистрированных импульсов с направления α в единицу времени:

$$N'(\alpha) = \frac{1}{T} \sum h(a_i, \alpha), \quad (14)$$

где T — период регистрации, a_i — угол i -ой точки,

$$h(a, \alpha) = \begin{cases} 1, & a = \alpha, \\ 0, & a \neq \alpha. \end{cases} \quad (15)$$

2. **Геоакустическая активность** N' , выражающая количество зарегистрированных импульсов в единицу времени независимо от их направленности:

$$N' = \int_0^{2\pi} N'(\alpha) d\alpha = \frac{dn}{dt}, \quad (16)$$

где n — число импульсов в единицу времени.

Введенные параметры позволяют оценивать как геоакустическую активность всего района регистрации, так и активность с одного определенного направления. Для более удобного практического использования соотношений (15) и (16) целесообразно перейти от интегральных функций к суммированию усредненных значений:

$$h(a, \alpha) = \begin{cases} 1, & a \in (\alpha, \alpha + b], \\ 0, & a \notin (\alpha, \alpha + b], \end{cases} \quad (17)$$

$$N' = \sum_{i=0,1,2,\dots}^{2\pi/b} N'(ib) = \frac{\Delta n}{T}, \quad (18)$$

где b — интервал усреднения.

На рис. 12 показан пример гистограммы распределения $N'(\alpha)$ в декартовых и полярных координатах.

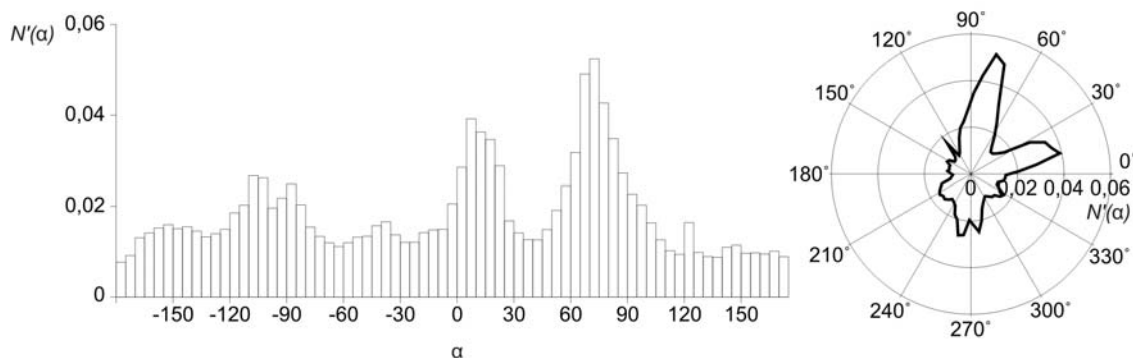


Рис. 12. Пример гистограммы распределения $N'(\alpha)$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТОДА

Для оценки адекватности модели геоакустического сигнала и работоспособности метода выявления импульсов был синтезирован специальный тестовый сигнал. Структурно он состоит из сигнала, имитирующего фоновый шум, с прямоугольным спектром от 0 до 22 кГц и протяженностью 1 мин. на который наложено шесть тестовых импульсов, разделенных на две категории (рис. 13).

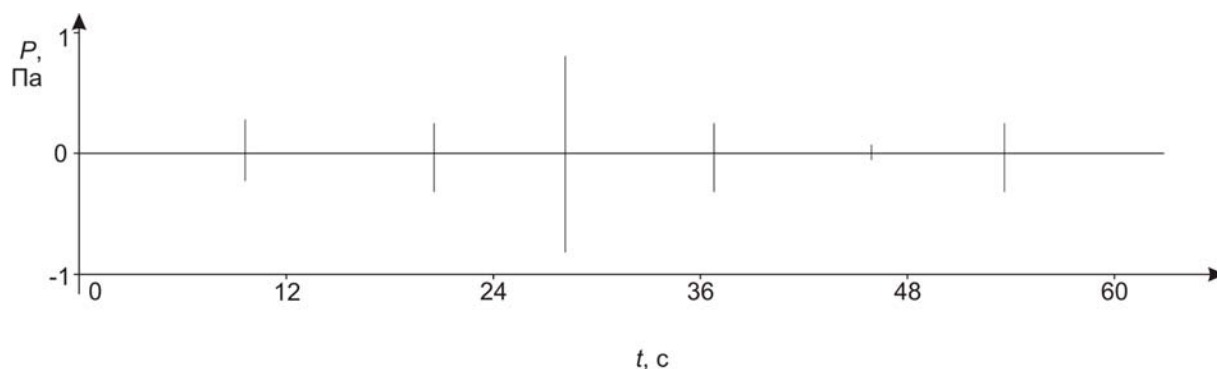


Рис. 13. Сгенерированный тестовый сигнал

Первая категория импульсов включает три идеальных импульса (второй, четвертый и шестой на рис. 13), полученных путем моделирования, с максимальной амплитудой равной 17 000 отсчетов (используется аналог 16-ти разрядного АЦП с максимальным количеством отсчетов $\pm 32\,000$), направленностью 30° , 45° и 60° , соответственно, и эллиптичностью 0,2. Форма, спектр и распределение данных импульсов синтезированы в соответствии с разработанной моделью, представленной на рис. 5. Вторая категория

включает три импульса (первый, третий и пятый на рис. 13) с заведомым искажением одного из его параметров: первый имеет эллиптичность равную 0,5, второй — максимальную амплитуду равную 32 000 отсчетов и третий — максимальную амплитуду равную 3 500 отсчетов.

После генерации тестовый сигнал был подвергнут обработке разработанным методом. В результате были успешно выявлены все три неискаженных импульса. Азимут источника был успешно вычислен с погрешностью, не превышающей $0,4^\circ$. Первый импульс (с эллиптичностью 0,5) превысил порог эллиптичности, третий и пятый (с превышением и недостатком максимальной амплитуды, соответственно) не соответствовали амплитудно-временным критериям. Поэтому, все эти импульсы были отбракованы методом на второй и первой стадии, соответственно.

После успешной обработки тестового сигнала была произведена обработка случайно выбранного фрагмента реального сигнала длительностью 15 мин., зарегистрированного в период средней активности сейсмотектонического процесса (рис. 14). Дополнительно в процессе обработки производился подсчет количества найденных импульсов и выбракованных на разных стадиях окон данных. Причем для первой стадии метода определялось число выбракованных окон, которые соответствовали амплитудно-временным критериям только по двум из трех своих областей (см. рис. 9). В результате обработки было выделено 997 окон, содержащих полезные импульсы. При этом на первой стадии отбраковано 16 623, а на второй — 887 окон в исходном фрагменте данных.

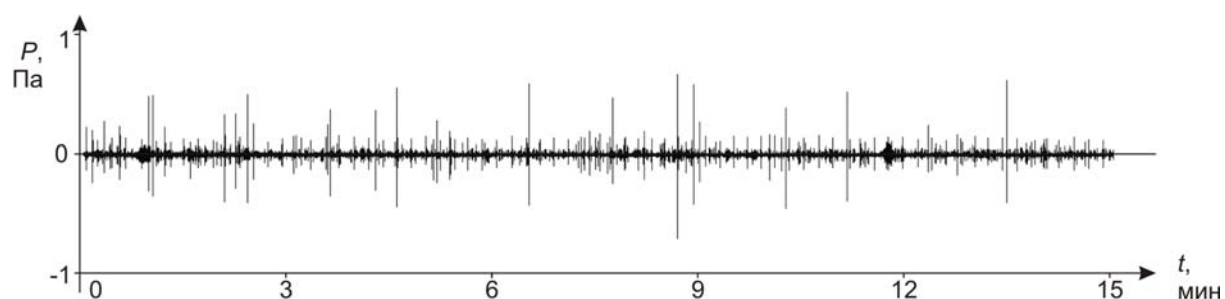


Рис. 14. Фрагмент реального сигнала длительностью 15 мин

Анализ формы выделенных полезных импульсов в реальном сигнале показывает, что они полностью соответствует предъявляемым требованиям, что подтверждает достоверность работы метода по их выявлению. С помощью метода удалось достаточно точно определить как уровень изотропных шумов, так и уровень искомого сигнала, при этом соотношение данных величин превышает 14 раз.

После выявления всех импульсов, в соответствии с разработанным методом, была построена гистограмма распределения $N'(\alpha)$ (рис. 15).

Как видно из приведенной иллюстрации в данном случае наибольшей активностью обладают направления $150 \dots 330$ градусов, с которых регистрируется от 0,025 до 0,05

импульсов в секунду. Максимальное значение с частотой импульсов равной 0,05 наблюдается по азимуту 180 градусов. Остальные направления не проявляют в этом фрагменте заметной активности.

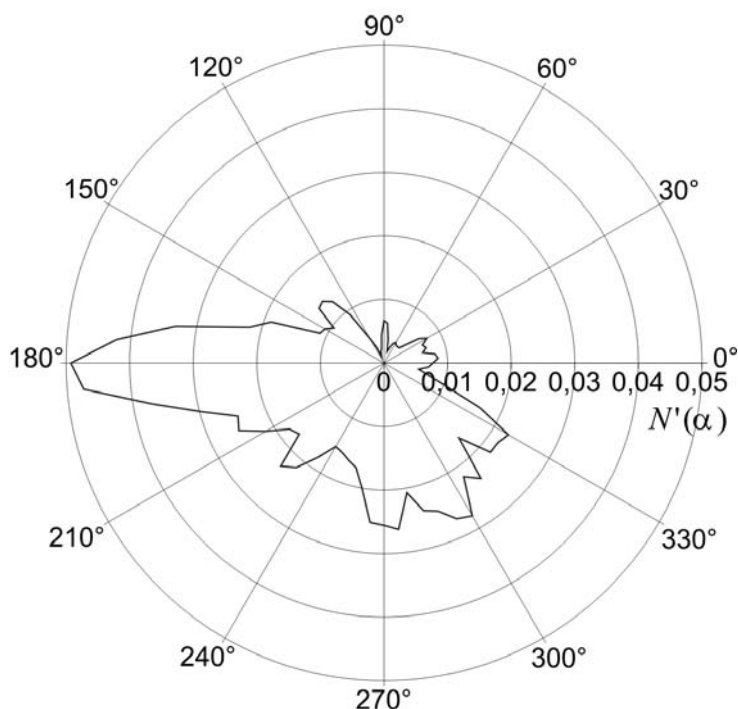


Рис. 15. Гистограмма распределения пространственной геоакустической активности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод позволяет выявлять из непрерывного сигнала геоакустические импульсы, сгенерированные под действием деформационных сил, а также точно определять их направленность, что подтверждается как на синтезированной модели импульсов, так и на фрагменте реального сигнала. Это позволяет предложить данный метод для реализации в автоматизированных системах регистрации и определения направления прихода геоакустических сигналов.

Подобие результатов в реакции разработанного метода на синтезированные и реальные воздействия показывает, что разработанная модель геоакустического импульса адекватна и достаточно точно описывает исследуемый сигнал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райс Дж. Механика очага землетрясений. М.: Мир, 1982, 217 с.
2. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестников. М: Наука, 2003, 270 с.
3. Алексеев А. С., Белоносов А. С., Петренко В. Е. Определение интегрального предвестника землетрясений с использованием многодисциплинарной модели и активного вибросейсмического мониторинга. // М.:ГЕОС. Сб. трудов. Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология, Выпуск 32, 2001, с. 81–97.
4. Водинчар Г. М., Пережогин А. С., Сагитова Р. Н., Шевцов Б. М. Моделирование зон геоакустической эмиссии. // Математическое моделирование, 2007, т. 19, № 11, с. 59–63.
5. Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли, 2005, № 10, с. 59-65.
6. Купцов А. В., Ларионов И. А., Шевцов Б. М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. // Вулканология и сейсмология, 2005, № 5, с. 45–59.
7. Долгих Г. И., Купцов А. В., Ларионов И. А., Марапулец Ю. В., Швецов В. А., Шевцов Б. М., Широков О. Н., Чупин В. А., Яковенко С. В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений. // ДАН, 2007, т. 413, №5, с. 96–100.
8. Купцов А. В., Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М. Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке. Электронный журнал «Исследовано в России», 262, с. 2809–2818, 2004 г., <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf>
9. Гордиенко В. А., Гордиенко Т. В., Купцов А. В., Ларионов И. А., Марапулец Ю. В., Рутенко А. Н., Шевцов Б. М. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений. // ДАН, 2006, т.407, №5, с. 669–672.
10. Гордиенко В. А., Гордиенко Т. В., Краснописцев Н. В., Купцов А. В., Ларионов И. А., Марапулец Ю. В., Рутенко А. Н., Шевцов Б. М. Об особенностях векторно-фазовой структуры поля высокочастотных геоакустических предвестников землетрясений. //Акустический журнал, 2008, № 54, с. 97–109.
11. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007, 480 с.
12. Марапулец Ю. В., Щербина А. О., Мищенко М. А., Шадрин А. В. Методы исследования высокочастотной геоакустической эмиссии. П-Кам.: КГТУ, 2008, 105 с.
13. Гордиенко В. А., Гончаренко Б. И. Векторно-фазовые методы в низкочастотной аэро- и сейсмоакустике // Сб. трудов семинара научн. школы проф. Красильникова. М.: МГУ, 2002, с. 209–229.