УДК 51-73:550.3 doi: 10.15827/0236-235X.150.261-268 2025. Т. 38. № 2. С. 261–268

Программный комплекс QAMODEL: компьютерное моделирование высокочастотной геоакустической эмиссии

Д.Ф. Сергиенко [1]✉, Р.И. Паровик [1]

[1] Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, с. Паратунка, 684034, Россия

Ссылка для цитирования
Сергиенко Д.Ф., Паровик Р.И. Программный комплекс QAMODEL: компьютерное моделирование высокочастотной геоакустической эмиссии // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 2. С. 261–268. doi: 10.15827/0236-235X.150.261-268
Информация о статье
Группа специальностей ВАК: 1.2.2
Поступила в редакцию: 17.06.2024 После доработки: 24.09.2024 Принята к публикации: 26.09.2024

Аннотация. Предложен программный комплекс QAMODEL для проведения количественного и качественного анализа математической модели высокочастотной геоакустической эмиссии. Математическая модель представляет собой связанную систему, состоящую из двух линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с непостоянными коэффициентами и соответствующими начальными условиями (задача Коши). Такая математическая модель описывает взаимодействие двух линейных осцилляторов посредством линейной связи между источниками излучения высокочастотной геоакустической эмиссии. Количественный анализ математической модели эмиссии проводился с помощью численного метода Розенброка четвертого порядка точности, достаточно устойчивого к жесткости рассматриваемой системы. Численный метод реализован в программном комплексе QAMODEL, который также позволяет производить визуализацию результатов моделирования. В частности, использована возможность построения графиков осциллограмм и фазовых траекторий при различных значениях параметров модели, которые пользователь вводит через интерфейс программного комплекса. Предусмотрено сохранение построенных графиков с расширением png для дальнейшего изучения. Качественный анализ математической модели высокочастотной геоакустической эмиссии заключался в исследовании свойства жесткости. В программном комплексе QAMODEL реализована возможность построения графиков функции жесткости от времени при различных значениях параметров математической модели высокочастотной геоакустической эмиссии. Графики также можно сохранять с расширением png для последующего анализа. Программный комплекс QAMODEL написан на языке C++ с использованием фреймворка для разработки кроссплатформенного ПО Qt.
Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод Розенброка, жесткость, высокочастотная геоакустическая эмиссия, осциллограмма, программный комплекс QAMODEL
Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-11-00064, https://rscf.ru/project/22-11-00064/ и в рамках госзадания ИКИР ДВО РАН по теме 124012300245-2

Введение. Исследование высокочастотной *геоакустической эмиссии* (ГАЭ) играет важную роль в разработке методики прогнозирования сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах в России и за рубежом. Например, в статье [1] показано, как ГАЭ может быть использована для обнаружения активизации деформации горных пород на полуострове Камчатка. Согласно работе [2], высокочастотная (0,002 Гц–20 кГц) *акустическая эмиссия* (АЭ), регистрируемая во Вранче (область изгиба румынских Карпат) с помощью различных датчиков в воздухе и на земле, может быть связана с деформациями горных пород на различных стадиях сейсмотектонического процесса и возникновения землетрясений. Интенсивность вибраций сигнала превышает 4,5 R (по шкале Рихтера) в течение 8–10 часов перед землетрясением. Для повышения эффективности и точности локализации источника АЭ в статье [3] предлагаются включение симплекс-метода трехмерной (3D) локализации источника АЭ и сканирование с поиском по сетке.

Сигнал высокочастотной ГАЭ состоит из комбинации релаксационных импульсов.

Анализ характеристик сигнала высокочастотной ГАЭ (амплитуды, длительности, частоты следования или заполнения) позволяет определить стадию, свойства и место деформационных возмущений [4]. Согласно [5], акустическая дисперсия (энергия) является одной из основных характеристик, позволяющих прогнозировать землетрясения в лабораторных условиях. В результате моделирования областей повышенных деформационных процессов в работе [6] показано, что эти области распространяются на сотни километров от очагов сейсмически активных процессов как на поверхности Земли, так и в ее толще. Зоны повышенных тектонических напряжений также исследова-

лись в работе [7]. Анализ характеристик сигнала позволил авторам работы [8] построить эмпирическую модель сигнала ГАЭ, с помощью которой по величине отклонений от параметров эмиссии можно сделать выводы о появлении аномальных изменений сигнала.

Согласно [9], импульсы сигнала высокочастотной ГАЭ и импульсы, генерируемые функцией Берлаге, имеют схожую структуру. Меняя значения ключевых параметров сигнала (частоту заполнения f, положение максимума $P_{\max}$, крутизну огибающей Δ), можно получить различные по форме импульсы высокочастотной ГАЭ.

В статье [10] на основании функций Берлаге была предложена математическая модель высокочастотной ГАЭ для описания двух источников излучения, состоящая из двух связанных линейных осцилляторов с непостоянными коэффициентами. Также авторами был проведен количественный анализ предложенной модели ГАЭ, построены осциллограммы, фазовые траектории и спектры полученных сигналов ГАЭ в компьютерной среде Maple. Так как Maple является платным ПО, данное обстоятельство послужило еще одной причиной разработки обсуждаемых алгоритмов. Каждый осциллятор описывает один дислокационный источник ГАЭ. Взаимодействие между источниками осуществляется только через излучение. В [11] проведен качественный анализ математической модели. Исследованы вопросы существования и единственности решения, устойчивости нулевого решения и жесткости исследуемой задачи. Анализ отечественных и зарубежных источников по теме качественного и количественного исследования высокочастотной ГАЭ показал, что литература по рассматриваемой теме практически отсутствует. Так, в работе [12] авторы предлагают аддитивную модель геоакустического сигнала, идея которой заключается в разложении сигнала на сумму составляющих, описываемых модулированными функциями Берлаге и Гаусса. Сходство работы лишь в представлении сигнала в виде функций Берлаге. В работе [13] предложена методика определения зоны локализации источника акустической эмиссии в бетонных конструкциях. Следует отметить, что работы [10, 11] являются ключевыми для выбранной тематики и проводились впервые.

Целью настоящего исследования является разработка программного комплекса на языке объектно-ориентированного программирования C++, с помощью которого можно было бы проводить количественный и качественный анализ высокочастотной ГАЭ по математической модели, ранее предложенной в [10, 11]. Преимуществом программного комплекса является то, что он может быть использован при моделировании источника землетрясений и изучении его свойств как самостоятельный независимый комплекс, при этом не требуются большие материальные и трудоемкие вычислительные затраты. Программный комплекс может быть использован в системах неразрушающего контроля в качестве контролируемого источника акустического излучения. Согласно [14], для решения одной из задач диагностики методами АЭ является имитация исходного сигнала. Для этого необходимо создать программируемый генератор, формирующий последовательность импульсов, характеристики которых определяются в процессе исследования. Предложенный в данной работе программный комплекс способен генерировать модельные импульсы сигнала.

Математическая модель высокочастотной ГАЭ

Представим математическую модель высокочастотной ГАЭ, описывающую взаимодействие двух источников излучения:

$$\begin{cases} \ddot{g}_1(t)=\alpha_1(t)\dot{g}_1(t)-\beta_1(t)g_1(t)+ \\ +\alpha_1(t)\gamma_1(t)+k_1g_2(t), \\ \ddot{g}_2(t)=\alpha_2(t)\dot{g}_2(t)-\beta_2(t)g_2(t)+ \\ +\alpha_2(t)\gamma_2(t)+k_2g_1(t), \\ g_1(t_0)=\gamma_1(t)\operatorname{tg}(c_1t_0+\varphi_{01}), g_2(t_0)= \\ =\gamma_2(t)\operatorname{tg}(c_2t_0+\varphi_{02}), \\ \dot{g}_1(t_0)=\alpha_1(t_0)g_1(t_0)+c_1\gamma_1(t_0), \dot{g}_2(t_0)= \\ =\alpha_2(t_0)g_2(t_0)+c_2\gamma_2(t_0), \end{cases} \quad (1)$$

с коэффициентами системы

$$\alpha_1(t)=a_1\left(\frac{1}{t}-\frac{1}{b_1}\right); \beta_1(t)=\frac{a_1}{t^2}+c_1^2;$$

$$\alpha_2(t)=a_2\left(\frac{1}{t}-\frac{1}{b_2}\right); \beta_2(t)=\frac{a_2}{t^2}+c_2^2; \quad (2)$$

$$\gamma_1(t)=A_1c_1t^{a_1}\exp\left(-\frac{a_1}{b_1}t\right)\cos(c_1t+\varphi_{01});$$

$$\gamma_2(t)=A_2c_2t^{a_2}\exp\left(-\frac{a_2}{b_2}t\right)\cos(c_2t+\varphi_{02}),$$

где A_1, A_2 – амплитуды импульсов; φ_{01}, φ_{02} – начальные фазы импульсов; $c_1 = 2\pi f_1$, $c_2 = 2\pi f_2$, $a_1 = n_1P_{1,\max}\Delta_1$, $b_1 = P_{1,\max}t_{\text{end}}$, $a_2 = n_2P_{2,\max}\Delta_2$,

$b_2 = P_{2,\max} t_{\text{end}}$, где n_1, $n_2 > 0$ – параметры, отвечающие за форму огибающей; k_1, $k_2 > 0$ – коэффициенты связи; $t \in [t_0, t_{\text{end}}]$ – время рассматриваемого процесса, $t_0 > 0$.

Заметим, что коэффициенты (2) системы (1) являются убывающими при больших временах t. Задачи (1) и (2) представляют собой задачу Коши, которую будем называть математической моделью высокочастотной ГАЭ. Этой модели посвящены статьи [10, 11].

Как показали исследования, система (1) может быть жесткой. Свойство жесткости системы обыкновенных дифференциальных уравнений наблюдается, когда ее искомое решение медленно меняется, а в это время в любой его окрестности возникают быстро затухающие возмущения.

Напомним, что система обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с непостоянными коэффициентами называется жесткой, если все собственные значения матрицы системы имеют отрицательные действительные части и выполнено условие

$$S(t) = \frac{\max\limits_k \left(\operatorname{Re} \left| \lambda_k(t) \right| \right)}{\min\limits_k \left(\operatorname{Re} \left| \lambda_k(t) \right| \right)} \gg 1, \qquad (3)$$

где $S(t)$ – функция жесткости.

Исходя из вышесказанного, получить при наличии таких возмущений медленно меняющееся решение численным способом бывает затруднительно. Поэтому следует построить численное решение модели высокочастотной ГАЭ (1), (2) при различных значениях ее параметров с помощью метода из семейства методов Розенброка, который более устойчив к жесткости в подобных системах.

Метод Розенброка четвертого порядка точности для решения математической модели

Для решения задач Коши жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений по результатам многочисленных исследований зачастую используют схемы типа Розенброка [15]. Методы обладают хорошими свойствами точности и устойчивости. На каждой стадии метода применяется одна и та же матрица Якоби исходной системы. Схемы Розенброка получены в результате преобразований полуявных методов типа Рунге–Кутта, в которых при вычислении каждой стадии метода используется одна итерация метода Ньютона для решения нелинейной системы алгебраических уравнений [16]. Известно [15], что для m-стадийного метода Розенброка максимальный порядок точности соответствует $m + 1$ и схема максимального порядка может быть только A-устойчивой. При отказе от максимального порядка можно построить L-устойчивую численную формулу m-го порядка точности. На практике часто отказываются от максимального порядка в пользу L-устойчивости [17].

Метод Розенброка (4, 2) – L-устойчивый метод четвертого порядка точности [17], а двойка означает число вычислений правой части системы (1). Метод имеет следующую схему:

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^{4} p_i k_i, D_n = E - \tau a F_n', \qquad (4)$$

$$D_n k_1 = \tau F(y_n), D_n k_2 = k_1,$$

$$D_n k_3 = \tau F(y_n + \beta_{31} k_1 + \beta_{32} k_2) + \alpha_{32} k_2,$$

$$D_n k_4 = k_3 + \alpha_{42} k_2,$$

где τ – шаг интегрирования; y_n – приближенное решение при $t = t_n$; E – единичная матрица размера n; $F_n' = \partial F(y_n)/\partial y$ – матрица Якоби системы (1); a, p_i, $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, k_i, $1 \le i \le 4$, $3 \le j \le 4$, $1 \le k \le 2$ – числовые коэффициенты, которые определяют свойства точности и устойчивости решения модели (1), (2) и имеют вид

$a = 0.57281606248213$, $p_1 = 1.27836939012447$, $p_2 = -1.00738680980438$, $p_3 = 0.92655391093950$, $p_4 = -0.33396131834691$, $\beta_{31} = 1.00900469029922$, $\beta_{32} = -0.259004690299921$, $\alpha_{32} = -0.49552206416578$, $\beta_{31} = -1.28777648233922$.

Численный алгоритм Розенброка четвертого порядка точности (4) был реализован в программном комплексе QAMODEL (*Qualitative analysis of a mathematical model of high-frequency geoacoustic emission*) [18].

Описание и примеры работы программного комплекса QAMODEL

Программный комплекс QAMODEL разработан для операционной системы Linux на языке C++ с использованием фреймворка для разработки кроссплатформенного ПО Qt [18]. Алгоритм работы комплекса представлен на рисунке 1. Комплекс включает в себя модули для количественного и качественного анализа, каждый из которых является самостоятельным блоком. Для визуализации результатов исследования в виде графиков использован виджет Qt QCustomPlot.

Представим интерфейсы программного комплекса QAMODEL (http://www.swsys.ru/uplo-

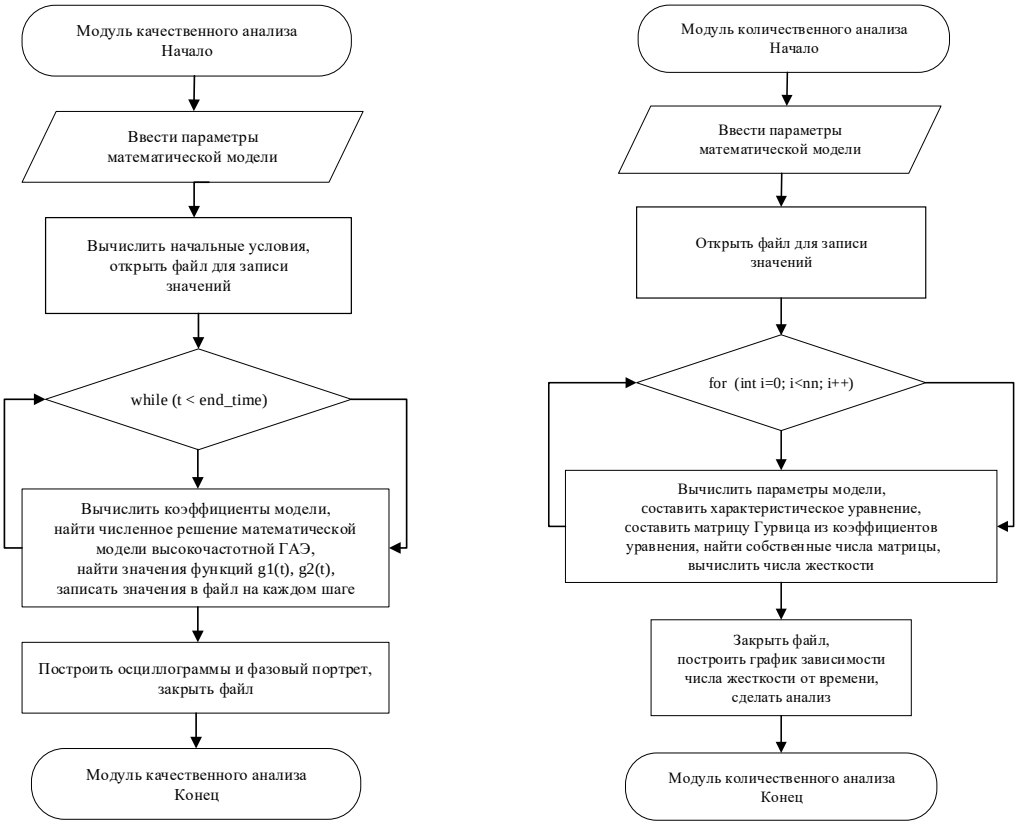


Рис. 1. Блок-схемы программного комплекса QAMODEL для количественного (а) и качественного (б) анализа

Fig. 1. Block diagrams of the QAMODEL software package: a) for quantitative analysis; б) for qualitative analysis

aded/image/2025-2/7.jpg). Интерфейс для количественного анализа позволяет численно решать математическую модель высокочастотной ГАЭ (1) и (2) методом Розенброка четвертого порядка точности (4), строить осциллограммы и фазовые траектории при различных параметрах. Интерфейс для качественного анализа обеспечивает возможность исследования системы на жесткость, построение графиков зависимости функции жесткости от времени (3). Параметры математической модели задаются пользователем в графических интерфейсах программы. Интерфейсы программы также обладают возможностью сохранения графиков в формате png для дальнейшего исследования.

Работу интерфейса для количественного анализа в случае отсутствия жесткости иллюстрирует рисунок 2. Поиск решения происходил на интервале $t \in [0.005, 0.05]$. Значения параметров математической модели высокочастотной ГАЭ (1) и (2) приведены в графическом интерфейсе.

На рисунке 2 отражен результат работы программного комплекса QAMODEL на вкладке Solution после ввода пользователем значений параметров математической модели высокочастотной ГАЭ (1) и (2), гарантирующих отсутствие жесткости, и нажатия кнопки Plot solution. В верхней части окна – графики, которые характеризуют осциллограммы ($g_1(t)$ и $g_2(t)$) функций решений математической модели высокочастотной ГАЭ (1) и (2). В нижней части окна приведена фазовая траектория, построенная по точкам (g_1, g_2).

Очевидно, что происходит взаимодействие двух дислокационных источников высокочастотной ГАЭ, которое заключается в перекачке энергии от одного осциллятора к другому. Это представлено на осциллограммах более слабыми вторыми импульсами. Фазовая траектория для этого случая представляет собой некую замкнутую фигуру со сложной структурой, связанную с процессом взаимодействия дислокационных источников высокочастотной ГАЭ.

На рисунке 3 приведен другой пример работы программного комплекса QAMODEL на той же вкладке Solution с другими значениями параметров математической модели высокочастотной ГАЭ ((1) и (2)), гарантирующих наличие жесткости.

Здесь в силу большого значения параметра a_1 = 1 380 наблюдается эффект жесткости в системе (1). Он проявляется в совершенно других осциллограммах и фазовой траектории: осциллограммы имеют затухающий характер, а фазовая траектория незамкнута и принимает вид закручивающейся спирали. Взаимодействие дислокационных источников высокочастотной

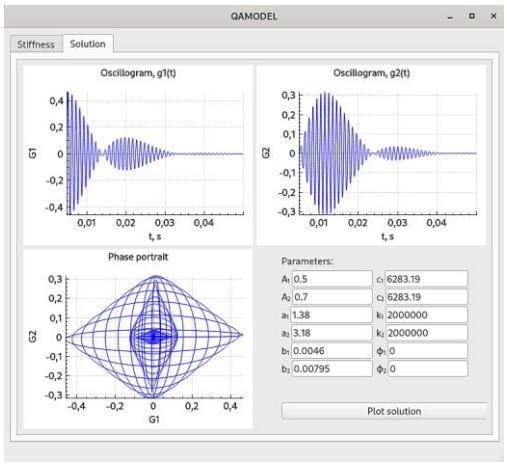


Рис. 2. Пример работы интерфейса для количественного анализа в случае отсутствия жесткости

Fig. 2. Example of the interface for quantitative analysis with no rigidity

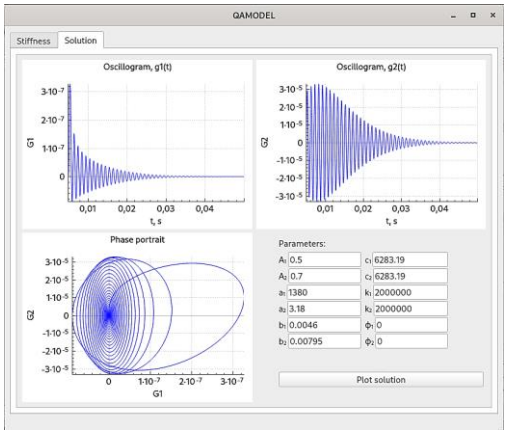


Рис. 3. Пример работы интерфейса для количественного анализа в случае наличия жесткости

Fig. 3. Example of the interface for quantitative analysis with rigidity

ГАЭ слабо выражено. Подобные случаи тяжело поддаются физической интерпретации, поэтому необходимо знать решающие соответствующие обратные задачи реальные значения параметров модели, которые можно оценить из экспериментальных данных.

На рисунке 4 показаны расчетные кривые функции жесткости $S(t)$ по формуле (3) при $t \in [0.1, 10]$ для случаев, приведенных на рисунках 2 и 3.

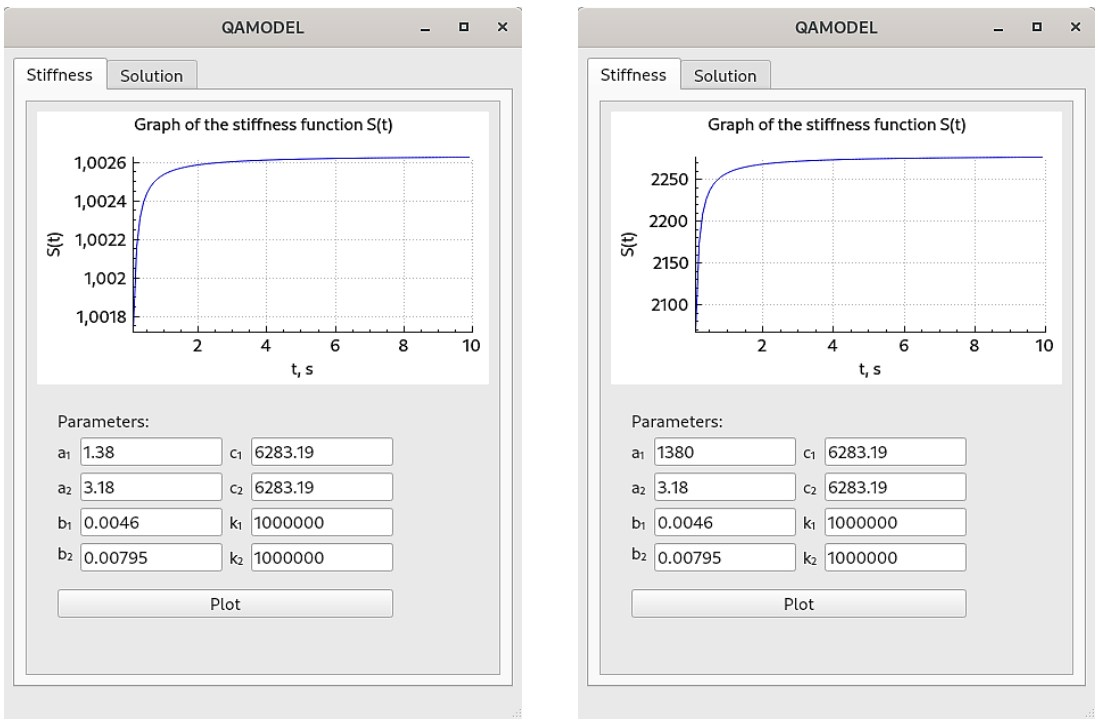
Видно, что при больших временах t функция жесткости (3) переходит в число жесткости: $\lim\limits_{t\to\infty} S(t) = S$. Это связано со свойствами непостоянных коэффициентов, которые входят в модельные уравнения системы (1). При отсутствии жесткости $S \approx 1$, при наличии жесткости S = 2 280, то есть $S \gg 1$.

На жесткость системы (1) влияют не только большие значения параметров a_1 и a_2, но и очень маленькие значения параметров b_1 и b_2 [12], что также вытекает из свойств коэффициентов системы (1). В то же время в статье [12] было показано, что коэффициенты связи k_1 и k_2 дислокационных источников не влияют на жесткость системы (1). Это связано с тем, что выполняется условие устойчивости решения задачи Коши (1) и (2): $\beta_1\beta_2 > k_1k_2$.

Стоит отметить, что дальнейшее развитие функционала программного комплекса QAMODEL связано с дальнейшим исследованием математической модели высокочастотной ГАЭ (1) и (2). Например, система (1) может быть обобщена и составлена из N дислокационных источников, которые будут представлять собой цепочку связанных осцилляторов. По аналогии с результатами работы [19] можно учесть нелинейность математической модели высокочастотной ГАЭ посредством нелинейного взаимодействия между дислокационными источниками. Существует возможность продолжить исследование динамической системы (1) в условиях наличия эффектов наследственности. Это приводит к понятию производной дробного порядка. Осцилляторы с производными дробных порядков называют дробными осцилляторами, и дальнейшее исследование модели может быть проведено по аналогии с [20], где дробную производную имеет смысл вводить в диссипативные члены математической модели высокочастотной ГАЭ (1) и (2).

Заключение

Для исследования математической модели высокочастотной ГАЭ в виде линейных связанных осцилляторов с непостоянными коэффи-



а) *б)*

Рис. 4. Интерфейс программы с введенными параметрами при отсутствии (а) и при наличии (б) жесткости

Fig. 4. Program interface with entered parameters: a) with no rigidity; б) with rigidity

циентами были представлены обзор и примеры работы программного комплекса QAMODEL, выполняющего следующие функции: построение осциллограмм и фазовых траекторий численным методом Розенброка четвертого порядка точности, исследование модели на жесткость, а также построение графиков функции жесткости от времени при условии наличия или отсутствия жесткости. Также даны дальнейшие направления развития программного комплекса. Использование программного комплекса для исследования высокочастотной ГАЭ позволило значительно улучшить качество результатов анализа.

Список литературы

1. Marapulets Y., Solodchuk A., Lukovenkova O., Mishchenko M., Shcherbina A. Sound range AE as a tool for diagnostics of large technical and natural objects. Sensors, 2023, vol. 23, no. 3, art. 1269. doi: 10.3390/s23031269.
2. Toader V.E., Moldovan I.A., Mihai A. Forecast earthquakes using acoustic emission. Proc. 19th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM, 2019, vol. 19, no. 1.1. doi: 10.5593/sgem2019/1.1/S05.100.
3. Liu Wj., Wang Hn., Xiao Y. et al. Study on joint method of 3D acoustic emission source localization simplex and grid search scanning. AG, 2024, vol. 21, pp. 456–467. doi: 10.1007/s11770-023-1042-y.
4. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Deshcherevskii A.V., Lander A.V. et al. Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). Pure and Applied Geophysics, 2020, vol. 177, pp. 397–419. doi: 10.1007/s00024-019-02311-3.
5. Rouet-Leduc B., Hulbert C., Lubbers N., Barros K., Humphreys C.J., Johnson P.A. Machine learning predicts laboratory earthquakes. Geophysical Research Letters, 2017, vol. 44, no. 18, pp. 9276–9282. doi: 10.1002/2017GL074677.
6. Гапеев М.И. Оценка областей повышенных деформаций, возникающих при подготовке камчатских землетрясений // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 41. № 4. С. 32–46. doi: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46.
7. Gapeev M., Marapulets Y. Modeling locations with enhanced earth crust deformation during earthquake preparation near the Kamchatka peninsula. Applied Sci., 2023, vol. 13, no. 1, art. 290. doi: 10.3390/app13010290.
8. Gapeev M.I., Senkevich Yu.I., Lukovenkova O.O. Estimation of probability distributions of geoacoustic signal characteristics. JPCS, 2021, vol. 2096, art. 012018. doi: 10.1088/1742-6596/2096/1/012018.
9. Tristanov A., Lukovenkova O., Marapulets Yu., Kim A. Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals. Proc. SPA, 2019, pp. 256–260. doi: 10.23919/SPA.2019.8936817.

10. Гапеев М.И., Солодчук А.А., Паровик Р.И. Связанные осцилляторы как модель высокочастотной геоакустической эмиссии // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 40. № 3. С. 88–100. doi: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-88-100.

11. Мингазова Д.Ф., Паровик Р.И. Некоторые аспекты качественного анализа модели высокочастотной геоакустической эмиссии // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 42. № 1. С. 191–206. doi: 10.26117/2079-6641-2023-42-1-191-206.

12. Lukovenkova O., Marapulets Y., Kim A., Tristanov A. Methods for increasing the accuracy of geoacoustic emission signal models based on sparse approximation. Proc. Int. Multi-Conf. FarEastCon, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602501.

13. Smaragdakis C., Taroudakis M.I. Acoustic signal characterization based on hidden Markov models with applications to geoacoustic inversions. JASA, 2020, vol. 148, no. 4, pp. 2337–2350. doi: 10.1121/10.0002256.

14. Овчарук В.Н., Марченко О.А. Моделирование процесса генерации сигналов акустической эмиссии в многоканальных системах // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: матер. конф. 2018. С. 56–60.

15. Zhang F., Pahlavan L., Yang Y. Evaluation of acoustic emission source localization accuracy in concrete structures. Structural Health Monitoring, 2020, vol. 19, no. 6, pp. 2063–2074. doi: 10.1177/1475921720915625.

16. Moreta M.J. Rosenbrock type methods for solving non-linear second-order in time problems. Math., 2021, vol. 9, no. 18, art. 2225. doi: 10.3390/math9182225.

17. Wu H., Ma C., Ihme M. Efficient time-stepping techniques for simulating turbulent reactive flows with stiff chemistry. Computer Physics Communications, 2019, vol. 243, art. 81–96. doi: 10.1016/j.cpc.2019.04.016.

18. Сергиенко Д.Ф., Паровик Р.И. Программа QAMODEL – Качественный анализ математической модели высокочастотной геоакустической эмиссии: Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2024663843. Рос. Федерация, 2024.

19. Luan V.T., Michels D.L. Efficient exponential time integration for simulating nonlinear coupled oscillators. JCAM, 2021, vol. 391, art. 113429. doi: 10.1016/j.cam.2021.113429.

20. Паровик Р.И. Дробная модель геоакустической эмиссии // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 45. № 4. С. 24–35. doi: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-24-35.

Software & Systems doi: 10.15827/0236-235X.150.261-268 2025, 38(2), pp. 261–268

QAMODEL software package: Computer simulation of high-frequency geoacoustic emission

Darya F. Sergienko [1]✉, Roman I. Parovik [1]

[1] Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Kamchatka Reg., Paratunka Vill., 684034, Russian Federation

For citation

Sergienko, D.F., Parovik, R.I. (2025) ‘QAMODEL software package: Computer simulation of high-frequency geoacoustic emission’, *Software & Systems*, 38(2), pp. 261–268 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.150.261-268

Article info

Received: 17.06.2024 After revision: 24.09.2024 Accepted: 26.09.2024

Abstract. The authors propose the QAMODEL software package for quantitative and qualitative analysis of the mathematical model of high-frequency geoacoustic emission. The mathematical model is a coupled system. It consists of two linear ordinary differential equations of the second order with non-constant coefficients and corresponding initial conditions (Cauchy problem). This model describes the interaction of two linear oscillators using linear coupling between radiation sources of high-frequency geoacoustic emission. The authors performed quantitative analysis of the emission mathematical model using the numerical Rosenbrock method of the fourth accuracy order. It is sufficiently robust to the stiffness of the system under consideration. The numerical method is implemented in the QAMODEL software package, which also enables visualization of the simulation results. In particular, the authors used the possibility of plotting oscillograms and phase trajectories at different values of model parameters entered by the user through the software package interface. It is possible to save the plots with png extension for further study. The qualitative analysis of the mathematical model of high-frequency geoacoustic emission involved studying the stiffness property. The QAMODEL software package is able to construct a stiffness function over time at different values of mathematical model parameters of high-frequency geoacoustic emission. The QAMODEL software package is written in C++ using Qt cross-platform software development framework. The software package was registered in Rospatent.

Keywords: computer modeling, Rosenbrock method, rigidity, high-frequency geoacoustic emission, oscillograms, QAMODEL software package

Acknowledgements. This research was funded by Russian Science Foundation, grant no. 22-11-00064, https://rscf.ru/project/22-11-00064/and was carried out under the government assignment of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, project no. 124012300245-2

References

1. Marapulets, Y., Solodchuk, A., Lukovenkova, O., Mishchenko, M., Shcherbina, A. (2023) 'Sound range AE as a tool for diagnostics of large technical and natural objects', *Sensors*, 23(3), art. 1269. doi: 10.3390/s23031269.

2. Toader, V.E., Moldovan, I.A., Mihai, A. (2019) 'Forecast earthquakes using acoustic emission', *Proc. 19th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM*, 19(1.1). doi: 10.5593/sgem2019/1.1/S05.100.

3. Liu, Wj., Wang, Hn., Xiao, Y. et al. (2024) 'Study on joint method of 3D acoustic emission source localization simplex and grid search scanning', *AG*, 21, pp. 456–467. doi: 10.1007/s11770-023-1042-y.

4. Gavrilov, V.A., Panteleev, I.A., Deshcherevskii, A.V., Lander, A.V. et al. (2020) 'Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia)', *Pure and Applied Geophysics*, 177, pp. 397–419. doi: 10.1007/s00024-019-02311-3.

5. Rouet-Leduc, B., Hulbert, C., Lubbers, N., Barros, K., Humphreys, C.J., Johnson, P.A. (2017) 'Machine learning predicts laboratory earthquakes', *Geophysical Research Letters*, 44(18), pp. 9276–9282. doi: 10.1002/2017GL074677.

6. Gapeev, M.I. (2022) 'Estimating the increased deformations areas that occur during the preparation of Kamchatka earthquakes', *Bull. KRASEC. Phys. and Math. Sci.*, 41(4), pp. 32–46 (in Russ.). doi: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46.

7. Gapeev, M., Marapulets, Y. (2023) 'Modeling locations with enhanced earth crust deformation during earthquake preparation near the Kamchatka peninsula', *Applied Sci.*, 13(1), art. 290. doi: 10.3390/app13010290.

8. Gapeev, M.I., Senkevich, Yu.I., Lukovenkova, O.O. (2021) 'Estimation of probability distributions of geoacoustic signal characteristics', *JPCS*, 2096, art. 012018. doi: 10.1088/1742-6596/2096/1/012018.

9. Tristanov, A., Lukovenkova, O., Marapulets, Yu., Kim, A. (2019) 'Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals', *Proc. SPA*, pp. 256–260. doi: 10.23919/SPA.2019.8936817.

10. Gapeev, M.I., Solodchuk, A.A., Parovik, R.I. (2022) 'Coupled oscillators as a model of high-frequency geoacoustic emission', *Bull. KRASEC. Phys. and Math. Sci.*, 40(3), pp. 88–100 (in Russ.). doi: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-88-100.

11. Mingazova, D.F., Parovik, R.I. (2023) 'Some aspects of the qualitative analysis of the high-frequency geoacoustic emission model', *Bull. KRASEC. Phys. and Math. Sci.*, 42(1), pp. 191–206 (in Russ.). doi: 10.26117/2079-6641-2023-42-1-191-206.

12. Lukovenkova, O., Marapulets, Y., Kim, A., Tristanov, A. (2018) 'Methods for increasing the accuracy of geoacoustic emission signal models based on sparse approximation', *Proc. Int. Multi-Conf. FarEastCon*, pp. 1–6. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602501.

13. Smaragdakis, C., Taroudakis, M.I. (2020) 'Acoustic signal characterization based on hidden Markov models with applications to geoacoustic inversions', *JASA*, 148(4), pp. 2337–2350. doi: 10.1121/10.0002256.

14. Ovcharuk, V.N., Marchenko, O.A. (2018) 'Modeling of the acoustic emission signal generation process in multichannel systems', *Proc. Conf. Physics: Basic and Applied Research, Education*, pp. 56–60 (in Russ.).

15. Zhang, F., Pahlavan, L., Yang, Y. (2020) 'Evaluation of acoustic emission source localization accuracy in concrete structures', *Structural Health Monitoring*, 19(6), pp. 2063–2074. doi: 10.1177/1475921720915625.

16. Moreta, M.J. (2021) 'Rosenbrock type methods for solving non-linear second-order in time problems', *Math.*, 9(18), art. 2225. doi: 10.3390/math9182225.

17. Wu, H., Ma, C., Ihme, M. (2019) 'Efficient time-stepping techniques for simulating turbulent reactive flows with stiff chemistry', *Computer Physics Communications*, 243, art. 81–96. doi: 10.1016/j.cpc.2019.04.016.

18. Sergienko, D.F., Parovik, R.I. (2024) *QAMODEL Program – Qualitative Analysis of a Mathematical Model of High-Frequency Geoacoustic Emission*, Pat. RF, no. 2024663843.

19. Luan, V.T., Michels, D.L. (2021) 'Efficient exponential time integration for simulating nonlinear coupled oscillators', *JCAM*, 391, art. 113429. doi: 10.1016/j.cam.2021.113429.

20. Parovik, R.I. (2023) 'Fractional model of geoacoustic emission', *Bull. KRASEC. Phys. and Math. Sci.*, 45(4), pp. 24–35 (in Russ.). doi: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-24-35.

Авторы
Сергиенко Дарья Фаритовна [1],
программист, darya@ikir.ru
Паровик Роман Иванович [1],
д.ф.-м.н., доцент,
ведущий научный сотрудник,
parovik@ikir.ru

[1] Институт космофизических
исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Камчатский край, с. Паратунка, 684034, Россия

Authors
Darya F. Sergienko [1],
Programmer, darya@ikir.ru
Roman I. Parovik [1],
Dr.Sci. (Physics and Mathematics),
Associate Professor, Leading Researcher,
parovik@ikir.ru

[1] Institute of Cosmophysical Research
and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Kamchatka Reg., Paratunka Vill.,
684034, Russian Federation