

УДК 622.83 + 530.1 (075.8)

О ПОСТРОЕНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТКЛИКА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА СИЛЬНЫЕ ВЗРЫВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2015 г. О.А. Хачай¹, О.Ю. Хачай²

¹ Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Проведено сопоставление результатов теоретических исследований причин хаотизации нелинейных диссипативных динамических систем и результатов обработки откликов удароопасного массива горных пород на взрывные воздействия, выполненной методом фазовых диаграмм. В качестве экспериментальных использовались данные детального шахтного сейсмического каталога Таштагольского подземного рудника (шахты) за два года – с июня 2006 г. по июнь 2008 г.

Из теории следует, что общей причиной хаотизации и стохастизации движений динамической системы являются потери устойчивости движений и экспоненциальное разбегание близких фазовых траекторий, характеризующих её состояние. Результаты анализа фазовых диаграмм, построенных по данным шахтного каталога, подтверждают данное положение.

Детально проанализировано изменение во времени типов корреляционных зависимостей функций энергии, поглощаемой и выделяемой массивом. Рассмотрены условия применения алгоритма Н. Н. Боголюбова для анализа накопления и сброса энергии при взрывных воздействиях на массив горных пород.

Ключевые слова: нелинейная модель отклика массива, сейсмический шахтный каталог, анализ натуральных данных воздействия и отклика массива.

Введение

Исследования состояния массива с использованием подходов теории динамических систем [Боголюбов, 2005; Наймарк, Ланда, 2009; Чуличков, 2003; Хачай и др., 2010; Hachay, Khachay, Khachay, 2011] проводились для выяснения критериев смены режимов диссипативности реальных горных массивов, находящихся под сильным техногенным воздействием. Использовались данные сейсмического каталога Таштагольского подземного рудника (шахты) за два года – с июня 2006 г. по июнь 2008 г. Анализировались пространственно-временные координаты всех динамических явлений, произошедших в этот период внутри шахтного поля (откликов массива, взрывов, произведенных для отработки массива), и значения энергии, зафиксированной сейсмической станцией [Чуличков, 2003]. Фазовые портреты состояния массивов двух участков шахты – северного и южного – строились в координатах $E_v(t)$ и $d(E_v(t))/dt$, где E_v – сейсмическая энергия, выделенная массивом, Дж; t – время, сут.

На южном участке проанализирована морфология фазовых траекторий сейсмического отклика на взрывные воздействия в последовательные промежутки времени. По данным о технологических и массовых взрывах, произведенных в рассматриваемый период, большая часть энергии “закачана” на южном участке шахты – именно здесь в конце 2007 г. произошел самый сильный за всю историю шахты горный удар класса 9.

По результатам анализа обнаружена характерная морфология фазовых траекторий отклика массива, находящегося в локальный промежуток времени в устойчивом состоянии (рис. 1, а, в). На фазовой плоскости наблюдается область, имеющая вид “клубка” переплетенных траекторий с небольшими выбросами, не превышающими по энергии 10^5 Дж, которые в отдельные промежутки времени становятся более значительными, достигая 10^6 и даже 10^9 Дж.

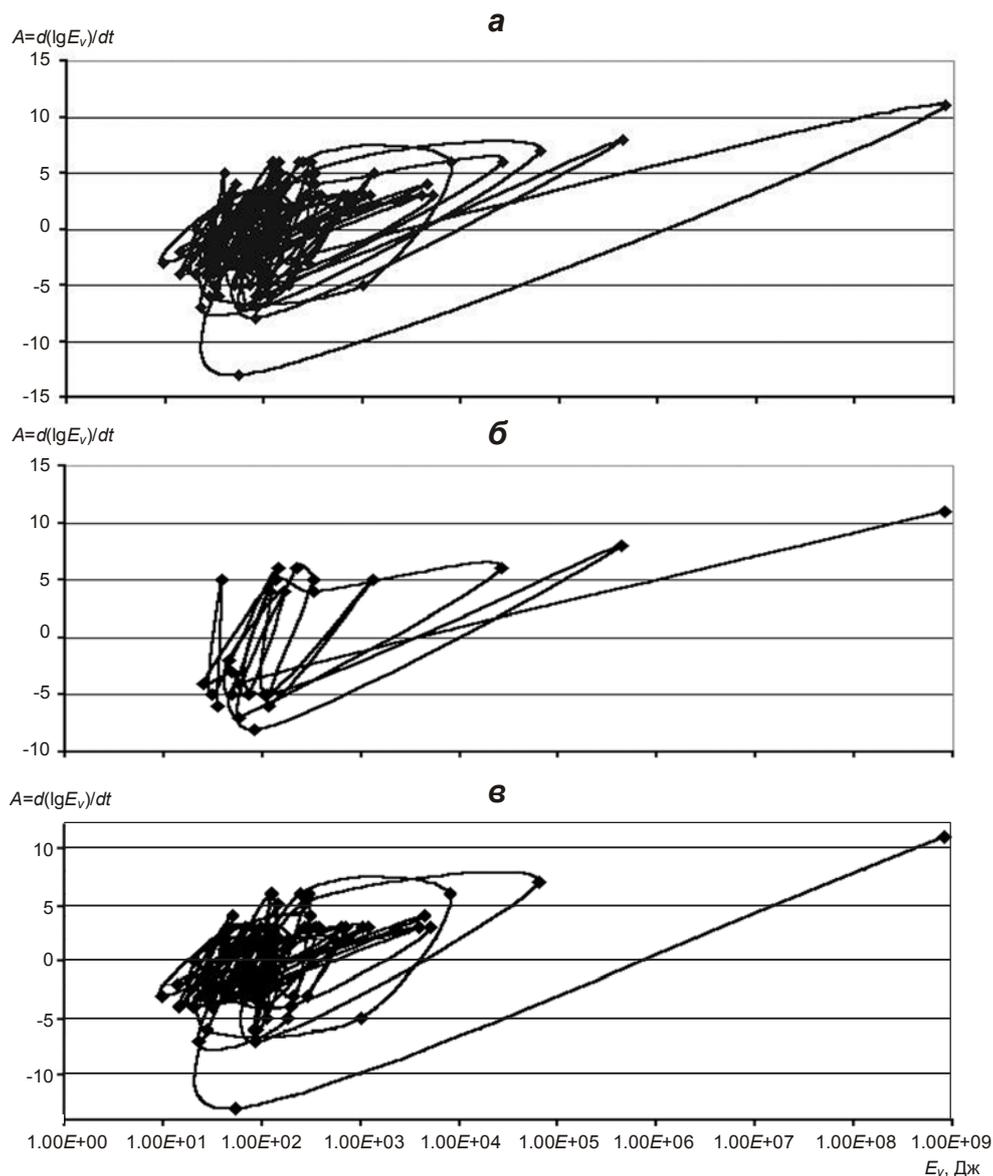


Рис. 1. Фазовый портрет отклика массива на горный удар, произошедший на Таштагольском руднике в конце 2007 г., для разных промежутков времени: *а* – с 25.11. по 29.12.2007 г.; *б* – до горного удара; *в* – после него. Горизонтальная ось – выделенная массивом энергия E_v , Дж; вертикальная – $A = d(\lg E)/dt$

Так как исследуется один и тот же объем массива пород и изучается процесс его активизации и спада, то очевидно развитие двух взаимосвязанных процессов – накопления энергии и её резонансного сброса. Отметим, что отражением процесса активизации и спада является возвращение фазовой траектории в одну и ту же притягивающую локальную область (см. рис. 1). Это подтверждается и детальным анализом фазовых траекторий сейсмического отклика массива в периоды до и после сильного горного удара (см. рис. 1, *б*, *в*).

Сопоставление фазовых портретов отклика массива на удары разной интенсивности в разные промежутки времени свидетельствует, что прослеженная реакция выбранного нами объема южного участка шахты на оказываемое на него воздействие отражает слаженный (или совместный) механизм освобождения накопленной энергии [Khachay, Khachay, Khachay, 2011].

Анализ и обсуждение результатов

Математический аппарат для моделирования процессов в локально активных сплошных средах рассматривается Н.Н. Боголюбовым [2005] и целым рядом других исследователей, чьи работы представлены в обширном библиографическом списке в [Боголюбов, 2005]. В этих работах подчеркивается, что только в нелинейных активных средах возникновение возмущений может носить локализованный и даже спонтанный характер.

В настоящей работе представлены результаты детального исследования процесса поглощения и выделения взрывной энергии горным массивом. Авторами анализировались данные сейсмического шахтного каталога для южной части шахты за период с 14.01.2007 г. по 17.05.2008 г. и рассматривались два блока массива. Первый из них характеризовался данными каталога, относящимися к околорудному пространству ортов 13–16 и горизонтам –280, –250; второй – к околорудному пространству ортов 23–31, связующим их штрекам и тем же горизонтам (табл. 1).

Таблица 1. Пространственно-временные характеристики изменения состояния массива вследствие взрывного воздействия по данным шахтного сейсмического каталога за период с 14.01.2007 по 17.05.2008 г.

<i>N</i>	Дата события	Δt , сут.	$\lg E_p$	$\lg E_{v2}$	$\lg E_{v1}$	Место взрыва
1	2	3	4	5	6	7
1	14.01.2007 г.	0	5.218	3.119	1.499	Юго-восточный участок
2	21.01	7	4.833	4.073	0	
3	28.01	14	4.671	4.472	0	
4	04.02	21	6.42	3.291	3.964	
5	18.02	35	5	3.626	0	
6	25.02	42	5.486	2.866	4.175	
7	25.03	70	7.885	3.088	0	
8	01.04	77	4.502	4.359	0	Орт 8, горизонты –210, –280
9	08.04	84	6.098	2.268	0	Юго-восточный участок
10	15.04	91	6.631	1.78	1.723	
11	22.04	98	6.893	3.884	2.688	Орт 8, горизонты –210, –280
12	29.04	105	4.926	0	0	Орт 16, горизонт –350
13	30.04	106	5.831	0	2.326	Орт 8, горизонты –210, –280
14	06.05	112	6.449	1.662	2.553	
15	12.05	118	4.043	0	0	Орт 27, горизонты –210, –280
16	13.05	119	6.19	4.988	4.543	Орт 8, горизонты –210, –280
17	20.05	126	6.234	2.552	3.556	Орт 8, горизонты –210, –280
18	27.05	133	6.317	2.149	2.397	
19	03.06	140	7.148	4.664	2.8	Юго-восточный участок
20	30.06	157	4.043	4.59	6.191	Орт 8, горизонты –210, –280
21	22.07	179	8.417	2.203	3.07	
22	28.07	185	4.043	4.622	2.307	Северо-западный участок
23	12.08	200	4.387	2.493	0	Юго-восточный участок
24	19.08	207	4.502	0	0	
25	26.08	214	6.145	3.238	2.589	
26	16.09	222	6.431	3.064	2.673	Орт 27, горизонты –210, –2800
27	23.09	229	4.9	4.042	1.874	Юго-восточный участок

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
28	30.09.2007 г.	236	6.317	3.857	0	Орт 27, горизонты –210, –280
29	07.10	243	5.218	3.215	6.431	
30	14.10	250	6.255	3.217	0	
31	20.10	256	5	1.626	1.729	Юго-восточный участок
32	21.10	257	6.467	3.81	3.367	Орт 27, горизонты –210, –280
33	27.10	263	5.314	2.074	0	Юго-восточный участок
34	28.10	264	6.502	2.988	2.355	Орт 27, горизонты –210, –280
35	03.11	269	6.481	3.681	0	Юго-восточный участок
36	10.11	276	5.704	2.645	2.407	
37	25.11	291	7.361	8.911	1.972	Орт 27, горизонты –210, –280
38	01.12	297	6.379	4.045	0	Юго-восточный участок
39	09.12	305	5.51	3.513	3.719	
40	22.12	328	3.43	3.727	1.767	Орт 16, горизонт –350
41	30.12	336	8.102	3.175	2.375	Юго-восточный участок
42	02.02.2008 г.	342	4	0	0	
43	10.02	350	6.234	0	0	
44	17.02	357	7.332	2.328	3.902	
45	01.03	370	6.662	1.795	0	
46	09.03	378	5.218	0	0	
47	09.03	378	5	0	2.039	
48	16.03	385	6.502	0	0	
49	22.03	391	4.216	0	0	Северо-западный участок
50	23.03	392	6.317	2.944	0	Юго-восточный участок
51	30.03	399	6.297	0	2.267	Северо-западный участок
52	13.04	413	6.098	0	0	
53	19.04	419	5.678	0	0	Юго-восточный участок
54	20.04	420	5.114	4.639	0	Северо-западный участок
55	26.04	426	5.636	0	0	Юго-восточный участок
56	27.04	427	6.251	0	0	Северо-западный участок
57	03.05	433	6.317	2.087	0	Юго-восточный участок
58	10.05	440	6.317	1.987	0	Северо-западный участок
59	17.05	447	4.516	0	0	Орт 28, горизонты –210, –280
60	17.05	447	4.9	0	0	Орт 3, горизонт –140

В таблице и далее приняты следующие обозначения: N – номер события по каталогу; Δt , сут – анализируемый временной интервал, отсчитываемый от 14.01.2007 г. до соответствующего события; E_p – энергия произведенного взрыва, Дж; E_v – энергия, выделенная массивом во втором (E_{v2}) и первом (E_{v1}) блоках, Дж. Результаты анализа корреляционной связи процессов поглощения и выделения энергии массивом для разных временных интервалов приведены в табл. 2. Можно видеть, что процесс поглощения и выделения энергии в исследуемых блоках в основном имеет нелинейный характер. Однако степень нелинейности меняется во времени. Так, на интервале между событиями 23–42, составляющем 142 сут (см. табл. 1), коэффициент корреляции $R(\lg E_p, \lg E_{v2})$ достигает максимума (см. табл. 2). Этот интервал включает процесс подготовки резонансного выброса массивом энергии в виде горного удара класса 9. В интервале между событиями 12–42 тип корреляционной зависимости между функциями $R(\lg E_{v2}, \lg E_{v1})$

Таблица 2. Исследование корреляционной связи процессов поглощения и выделения энергии массивом для разных временных интервалов

Интервалы между событиями	$R(\lg E_p, \lg E_{v2})$	$R(\lg E_p, \lg E_{v1})$	$R(\lg E_{v2}, \lg E_{v1})$
1–21	-0.0062		
21–60	0.240683		
23–42	0.535269		
24–41		-0.00881	0.12652
12–24	0.13077	0.30794	0.70973
1–23			0.26314

меняется: в интервале 12–24 коэффициент корреляции соответствует практически линейной функции, что может отражать упругое взаимодействие между двумя блоками (см. табл. 1, интервалы между событиями 15–16 и 27–29). При этом корреляционные зависимости $R(\lg E_p, \lg E_{v1})$ и $R(\lg E_p, \lg E_{v2})$ нелинейны (см. табл. 2).

На интервале между событиями 24–41 функция $R(\lg E_{v2}, \lg E_{v1})$ нелинейна; взаимосвязь между $\lg E_p, \lg E_{v1}$ практически отсутствует (см. табл. 2). Однако за 48 сут до высокоэнергетического горного удара класса 9 в блоке 1 зафиксирован удар класса 6.4, а в блоке 2 – толчки класса 5 и менее (рис. 2). Возникают два вопроса.

Первый из них – может ли событие в блоке 1 (класс 6.4) считаться форшоком для удара класса 9, произошедшего позже? Ответить на этот вопрос можно, только присоединив к сейсмическому каталогу данные детальных ежесуточных наблюдений в рамках электромагнитного активного индукционного и деформационного мониторингов в околовыработочном пространстве обоих рассматриваемых блоков.

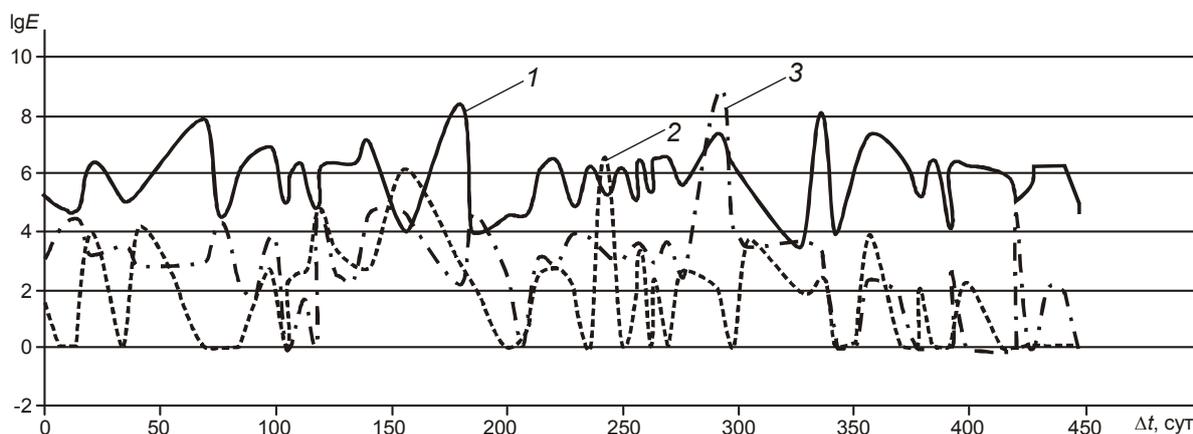


Рис. 2. Отражение процесса поглощения взрывной энергии (E_p , кривая 1) и ее выделения в блоках 1 (E_{v1} , кривая 2) и 2 (E_{v2} , кривая 3) в период с 14.01.2007 по 17.05.2008 гг. На горизонтальной оси Δt , сут – временные интервалы, отсчитываемые от 14.01.2007 г.

Второй вопрос – является ли отражением перехода механического состояния системы из устойчивого в неустойчивое изменение корреляционной зависимости между функциями, описывающими процесс поглощения и выделения энергии, с линейной на нелинейную? В связи с этими вопросами особый интерес представляет рассмотрение установившегося синхронного колебательного процесса между функциями $\lg E_p$ и $\lg E_{v2}$ на интервале, предвещающем горный удар класса 9 (см. рис. 2, $\Delta t=250-276$ сут).

Вариации функции $\lg E_p$ обусловлены колебаниями энергии регулярных взрывов, происходящих попеременно в разных пространственных точках юго-восточного участка и блока 2 (см. табл. 1). Колебания функции $\lg E_{v,2}$ на том же интервале отражают колебательный процесс выделения энергии блоком 2.

Для ответа на поставленные вопросы обратимся к теоретическим результатам изучения нелинейных колебательных процессов.

Обзор теоретических исследований по изучению нелинейных колебательных процессов

Основоположниками методов изучения нелинейных колебательных процессов были А. Пуанкаре, А. Ляпунов, Б. Ван-дер-Поль, Дж. В. Стретт, чьи идеи позже нашли свое развитие в трудах А.А. Андропова, А.А. Витта (см. библиографию в [Боголюбов, 2005]). Основы нелинейной механики были заложены Н.М. Крыловым и Н.Н. Боголюбовым, которые создали методы интегрирования нелинейных уравнений, описывающих нелинейные процессы колебаний, и методы исследования общей теории неконсервативных динамических систем [Боголюбов, 2005].

Существует глубокое принципиальное различие между механикой линейных и нелинейных колебаний, сохраняющееся даже при рассмотрении слабо нелинейных колебаний, описываемых дифференциальными уравнениями, отличающимися наличием малых членов, влияние которых будет особенно сказываться на промежутках времени, превышающих период колебаний. В системе могут присутствовать источники и поглотители энергии, которые производят и поглощают весьма малую работу за один период колебаний, но при длительном действии производимый ими эффект может накапливаться и оказывать существенное влияние на протекание колебательного процесса, вызывая его затухание, раскачивание, изменение устойчивости. Малые нелинейные члены могут оказывать кумулятивное действие и разрушать принцип суперпозиции; отдельные гармоники вступают во взаимодействие между собой, в результате чего индивидуальное рассмотрение поведения каждого гармонического колебания в отдельности невозможно.

Незатухающие колебания практически могут существовать лишь в случае, когда в системе присутствует источник энергии, способный компенсировать расход энергии, возникший в результате наличия диссипативных сил. Такой источник играет роль отрицательного трения. Колебания, поддерживаемые источником, не обладающим определенной периодичностью воздействия, называются автоколебаниями, и любая автоколебательная система описывается нелинейным дифференциальным уравнением.

В природе широко распространены релаксационные колебания, при которых колебательный процесс распадается на две стадии – медленное накопление энергии системой и последующая её разрядка, происходящая почти мгновенно после достижения некоторого критического потенциального порога для указанного накопления энергии.

При количественном изучении поведения разных типов нелинейных динамических систем будем опираться на асимптотические методы нелинейной механики, разработанные Н.М. Крыловым, Н.Н. Боголюбовым и Ю.А. Митропольским (см. библиографию в [Боголюбов, 2005]). Однако для их использования применительно к интерпретации данных сейсмического каталога необходимо от энергетических характеристик перейти к силам и перемещениям, для чего понадобится дополнительная информация о деформациях, происходящих в массиве под воздействием взрывов.

Заключение

Математический аппарат, разработанный академиком Н.Н. Боголюбовым и его школой, вместе с рассмотренным им целым рядом модельных нелинейных задач позволяет на количественном уровне понять причины самовозбуждения нелинейной механической системы и возникновения её пространственно-временного локального резонанса как отклика на внешнее воздействие.

Рассмотренный набор решений нелинейной механики [Боголюбов, 2005] может образовать систему аппроксимационных конструкций для локального пространственно-временного моделирования состояния сложнопостроенной нестационарной среды, какой является горный массив, находящийся под сильным регулярным техногенным воздействием.

Использование совместных теоретических подходов [Боголюбов, 2005; Наймарк, Ланда, 2009; Hachay, Khachay, Khachay, 2011] позволит сформулировать и решать такие задачи; анализ данных детального сейсмического мониторинга показал их применимость. При этом для построения нелинейной динамической модели требуется расширить комплекс входных данных, введя в него данные сейсмического каталога, деформационного и индукционного электромагнитного мониторинга.

Литература

- Боголюбов Н.Н. Собрание научных трудов в 12 томах. Математика и нелинейная механика Т. III. М.: Наука, 2005. 605 с.
- Наймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 424 с.
- Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики. М.: Физматлит, 2003. 294 с.
- Хачай О.А., Хачай О.Ю., Климко В.К., Шипеев О.В. Отражение синергетических свойств состояния массива горных пород под техногенным воздействием в данных шахтного сейсмологического каталога // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 6. С.259–271.
- Hachay O.A., Khachay O.Yu., Klimko V.K., Shippeev O.Yu. The reflection of synergetic features in the response of geological medium on outer force actions, Advances in heterogeneous Material Mechanics. 2011, Shanghai, China. P.361–366.
- Hachay O., Khachay A., Khachay O. Construction of a state evolution dynamical model of a rock massive, which is in a regime of energetic pumping, EGU 2011, Geophysical Research Abstracts. 2011. V. 13. P.1528.

Сведения об авторах

ХАЧАЙ Ольга Александровна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геофизики УрО РАН. 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100. Тел.: 8(343)267-95-60. E-mail: olgakhachay@yandex.ru

ХАЧАЙ Олег Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического анализа и теории функций института математики и компьютерных наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел.: 8(343)350-67-41. E-mail: khachay@yandex.ru

ON CONSTRUCTION OF A NONLINEAR DYNAMICAL MODEL OF ROCK MASSIF RESPONSE TO STRONG EXPLOSION INFLUENCE

O.A. Khachay¹, O.Yu. Khachay²

¹ *Bulashevitch Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*

² *Eltsin Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

Abstract. A comparison was made between results of theoretical investigations of chaotization causes in nonlinear dissipative dynamical systems and results of processing rock massif responses to explosion actions using the method of phase diagrams. Detailed seismic mine catalog data of the Tashtagolsk mine for two years, from June 2006 to June 2008, served as experimental material.

The theory implies that the general cause of chaotization and stochastization of dynamical system movements is the losses of their stability and exponential recession of close phase trajectories. That result coincides with phase diagram analysis, developed using data of a seismic mine catalog.

Detailed analysis was performed on temporal changes in the types of correlation relations of the functions of energy, absorbed and released by the massif. Conditions of Bogolubov's algorithm application to analysis of accumulation and energy release under explosion impact on the massif were analyzed.

Keywords: nonlinear model of massif response, seismic mine catalogue, analysis of natural data by action of massif response.