УДК 550.830,
539.3

О.А. Хачай, О.Ю. Хачай

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ ГОРНОГО МАССИВА НА ВЗРЫВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Рассмотрено использование подходов математической теории катастроф для анализа данных сейсмологического шахтного каталога, отражающих степень устойчивости и ее потери горным массивом при активном на него воздействии. Процесс отработки горного массива является динамическим процессом, которым можно управлять, следуя рекомендациям, которые дает теория катастроф. В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Использование методов анализа теории катастроф для краткосрочного и среднесрочного прогноза состояния горного массива только при использовании управляющих параметров не достаточно при наличии резкой его неоднородности. Однако совместное использование качественных рекомендаций теории катастроф и пространственно временные данные изменения внутренних параметров массива позволит предотвратить катастрофы при отработке шахтных массивов.

Ключевые слова: теория катастроф, нелинейная динамическая среда, управляющие и внутренние параметры, сейсмический и электромагнитный мониторинг.

Введение

Для продолжения геоинформационных исследований использован разработанный алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога [10], позволяющий извлечь дополнительную важную информацию для прогноза опасных явлений в рудных глубоких шахтах [12]. Дополнительно акцентировано внимание на процесс подготовки резонансного выброса энергии, включающий не только непосредственное влияние взрывов, но и последовательное влияние слабо энергетических откликов, которые в свою очередь проявляются в виде толчков, способствующих подготовку резонанс-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 88–99.
© 2017. О.А. Хачай, О.Ю. Хачай.

ного выброса. Использованы информативные признаки подготовки высокоэнергетических динамических явлений: время запаздывания отклика на техногенные воздействия и объем формирования очага горного удара в виде градаций расстояний от предполагаемого очага. Полученная комплексная информация из данных сейсмологического каталога является важной для прогноза опасных явлений в рудных шахтах.

Произведено сопоставление теоретических результатов причин хаотизации нелинейных диссипативных динамических систем и результатов обработки методом фазовых диаграмм данных детального шахтного сейсмического каталога – сейсмических откликов на взрывные воздействия удароопасного массива горных пород. Из теории следует, что общей причиной хаотизации и стохастизации движений динамической системы являются потери ими устойчивости и экспоненциальное разбегание близких фазовых траекторий, сочетающиеся с их общей ограниченностью и некоторым их общим сжатием. Этот результат совпадает с полученным анализом фазовых диаграмм, построенных по данным сейсмического шахтного каталога. Рассмотрены детально изменения во времени типы корреляционных зависимостей функцией поглощаемой энергии и выделяемой массивом энергии. Рассмотрены условия применения алгоритма Н.Н. Боголюбова для анализа накопления и сброса накопленной энергии от взрывных воздействий на массив [11].

В настоящее время весьма существенно следующее: все более отчетливо выступает взаимодействие между физикой и математикой, влияние потребностей физики на развитие математических методов и обратное влияние математики на физические знания. В ряде вопросов физики и техники возник ряд проблем, для которых аппарат линейной математики оказался или недостаточным или даже совершенно неприменимым [2].

Для всестороннего охвата разнообразнейших явлений в акустике и механике, математический аппарат линейных дифференциальных уравнений абсолютно недостаточен. В его рамки заведомо не укладываются как раз те явления, которые здесь наиболее характерны и интересны. Дело в том, что дифференциальные уравнения, которые адекватным образом описывают эти явления, заведомо нелинейные. Сообразно с этим мы говорим о «нелинейных» системах. Основы математического аппарата, адекватного не только отдельным задачам, но и всему циклу нелинейных проблем, заложены в знаменитых работах Пуанкаре и Ляпунова [4, 6].

Настоящая работа посвящена использованию подходов математической теории катастроф для анализа данных сейсмологического шахтного каталога, отражающих степень устойчивости и ее потери горным массивом при активном на него воздействии.

Обзор методов теории катастроф для изучения потери устойчивости нелинейных динамических систем

Первые сведения о теории катастроф появились в печати около1979 г., где свидетельствовалось, что эта теория дает универсальный метод исследования всех скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений [1]. Следуя В.И. Арнольду [2], источниками теории катастроф являются теория особенностей гладких отображений Уитни и теория бифуркаций динамических систем Пуанкаре и Андронова. Понятие «бифуркация» означает раздвоение и употребляется для обозначения качественных перестроек различных объектов при изменении параметров, от которых они зависят. Катастрофами называются скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий. Эволюционный процесс, отражающий отклик системы на приложенное воздействие математически описывается векторным полем в фазовом пространстве [5]. Точка фазового пространства задает состояние системы, а приложенный в этой точке вектор указывает на скорость изменения состояния. В точках, в которых вектор обращается в нуль, называются положениями равновесия. С течением времени в системе могут устанавливаться колебания, при этом равновесное состояние становится неустойчиво. На фазовой плоскости установившиеся колебания изображаются замкнутой кривой, называемой предельным циклом. В работе [2] изучение эволюции динамической системы связано с изменением во времени внутренних и управляющих параметров. Схема большинства применений теории катастроф состоит в следующем: предполагается, что изучаемый процесс описывается при помощи некоторого числа управляющих и внутренних параметров. Состояния равновесия процесса образуют поверхность того или иного числа измерений в этом пространстве. Проекция поверхности равновесий на плоскость управляющих параметров может иметь особенности. Эти особенности получили название особенностей общего положения, а теория, связанная с этими особенностями предсказывает геометрию «катастроф», т.е. перескоков из одного состояния в дру-

гое при изменении управляющих параметров. Одна из наиболее известных особенностей – это сборка Уитни. После потери устойчивости равновесия могут наблюдаться два типа установившихся режимов. Один из них колебательный периодический режим. Этот вид потери устойчивости называется мягкой потерей устойчивости, так как устанавливающийся колебательный режим при малой закритичности мало отличается от состояния равновесия. Второй вид связан со следующими особенностями: перед тем как установившийся режим теряет устойчивость, область притяжения этого режима становится очень малой, и случайные возмущения выбрасывают систему из этой области до того, как область притяжения полностью исчезает. Этот вид потери устойчивости называется жесткой потерей устойчивости, при этом система уходит со стационарного режима скачком и переходит на другой режим движения. Этот режим может быть другим устойчивым стационарным режимом, или устойчивыми колебаниями, или более сложным движением. Установившиеся режимы движения называются аттракторами. Те же из них, отличные от состояний равновесия и строго периодических колебаний названы странными аттракторами и связаны с проблемой турбулентности.

Анализ данных шахтного сейсмологического активного мониторинга горного массива, опираясь на схему применения теории катастроф

Основной целью этого мониторинга является определение предкритичного состояния горного массива, находящегося под отработкой с помощью взрывных воздействий. Оно определяется величиной энергии отклика, не превышающего 10^4 Дж. Если эта величина превышает это значение в пределах 10^5–10^7 Дж, то состояние массива считается критическим. При значениях энергии отклика 10^8–10^9 и более состояние массива считается закритическим или катастрофическим.

25 ноября 2007 г. в шахте Таштагольского рудника в 29 орту на глубине 714 м произошел горный удар с энергией $8{,}14 \cdot 10^8$ Дж. Постараемся проследить подготовку этого события с точки зрения потери устойчивости массива и связи этого эффекта с энергетическим воздействием взрывов и их места положения. Исследуемый объем определяется следующей геометрией: по оси *OX*: выработки 25–31 (≈240 м), по оси *OY*: (определяется длиной ортов между полевым и вентиляционном штреками в среднем ≈240 м), по оси *OZ*: (горизонты -140, -425, (≈590–875 м)).

Проанализируем морфологию временного процесса энергетических откликов массива, используя результаты, приведенные на рисунке, *а–н* (см. Приложение).

Рисунок, *а*. Потеря устойчивости равновесия проявляется для четырех воздействий в виде колебательного процесса, при этом первый взрыв происходит в пределах исследуемого объема, однако энергия воздействия наименьшая из анализируемых четырех, поэтому максимальный энергетический отклик находится в пределах предкритического состояния.

Рисунок, *б*. Потеря устойчивости равновесия для двух воздействий проявляется классическим образом в виде мягкой потери равновесия. Имеется отклик в виде практически постоянного распределения по времени энергии, переходящий в колебательный процесс, при этом энергия взрыва 3-го сентября 2006 г. превосходила 10^8 Дж, а энергия взрыва 17 сентября 2006 г. – 10^6 Дж в пределах исследуемого объема, однако общий уровень выделяемой энергии откликами уменьшился и не превосходил 10^3 Дж.

Рисунок, *в*. 24 сентября 2006 г. реакция на взрыв в пределах исследуемого объема имеет другую морфологию, колебательный процесс перемежается со скачкообразным выбросом, после которого система возвращается к колебательному процессу, фоновый уровень которого соответствует мягкой потере устойчивости. Последующие отклики на взрывы за пределами исследуемой области носят малоамплитудный по энергии колебательный характер. 14 октября 2006 г. морфология процесса на взрыв в исследуемой области носит классический характер мягкой потери устойчивости с затуханием колебательного процесса выделения энергии.

Рисунок, *г*. С 21 октября по 12 ноября 2006 г. происходят взрывы в исследуемой области, однако морфология мягкой потери устойчивости массива проявляется более явно после взрыва 12 ноября. Почти сразу после взрыва начинается колебательный процесс выделения энергии, затем скачок, потом снова возврат в колебательное состояние и снова скачок с амплитудой, превышающей 10^4 Дж. Фоновый уровень энергетических колебаний повышается выше 10^2 Дж.

Рисунок, *д*. 19 ноября 2006 г. за пределами исследуемой области происходит взрыв с энергией больше 10^9 Дж, при этом исследуемый массив реагирует двумя скачкообразными выбросами энергии с величиной соответствующей скачкам 12 ноября (рисунок, *г*). Последующий взрыв в исследуемой области 26 ноября 2006 г. вызывает отклик массива характерный мягкой по-

тере устойчивости на энергетическом фоне, соответствующем рисунку, *б*. Следующий взрыв 3 декабря 2006 г. вызывает снова более возбужденный отклик с колебаниями и скачками аналогично рассмотренному выше отклику на рисунке, *в*.

Рисунок, *е*. 24 декабря 2006 г.взрыв в исследуемой области (вблизи места будущего горного удара) с энергией 10^8 Дж вызывает резкую, но еще в рамках критичной, потере устойчивости массива, два скачка с энергией чуть меньше 10^5 Дж, 3 скачка с энергией 10^4–10^3 Дж. Колебательный процесс имеет более интенсивный характер. Остальные взрывы, происходящие на достаточной удаленности от исследуемой области с 30 декабря 2006 г. по 14 января 2007 г., продолжают поддерживать колебательный процесс, вызванный взрывом 24 декабря, а взрыв 21 января с энергией меньше, чем 10^5 Дж, происходящий также на большом удалении от исследуемой области не помешал скачкообразному выбросу энергии, сответствующему процессу затягивания релаксации системы и запаздывающему влиянию предыдущих взрывов.

Рисунок, *ж, з*. Взрывы от 25 марта до 8 апреля 2007 г. происходят вне исследуемой области в основном на достаточно большом удалении. Поэтому отклик массива носит случайный не колебательный характер и в основном энергия его не превышает 10^4 Дж, кроме отклика на взрыв от 1 апреля 2007 г., когда произошел скачок энергии чуть больше, чем 10^4 Дж.

Рисунок, *и*. 6 мая 2007 г. произошел в северной части массива. Затем 13 мая произошли одновременно в северной части и в исследуемой части массива (в орту, где в будущем произошел катастрофический горный удар) взрывы, отклик массива имеет скачок энергии 10^5 Дж.

Рисунок, *к, л*. Результаты демонстрируют взаимодействие откликов исследуемого массива на воздействие взрывов, расположенных в основном вне исследуемой области, а при наличии взрыва внутри нее наблюдаются скачки энергии до 10^5 Дж (рисунок, *к*) без предварительного колебательного процесса.

Рисунок, *м*. С 30 сентября по 21 октября происходят взрывы исключительно в исследуемой области недалеко от орта, где произошел катастрофический горный удар. Морфология распределения энергия откликов такова, что имеется низкоэнергетическая зависимость от времени и очень короткий колебательный процесс.

Рисунок, *н*. Взрывы с 28 октября по 10 ноября не выводят исследуемую область массива на стадию колебательного процес-

са отдачи энергии. При повторном взрыве в блоке 27 25 ноября 2007 г. произошел сложный динамический катастрофический процесс. Имеют место три форшока, один афтершок, четыре предкритических и один закритический скачок энергии. Все эти проявления сопровождались малоэнергетичным колебательным процессом.

Заключение

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Процесс отработки горного массива является динамическим процессом, которым можно управлять, следуя рекомендациям, которые дает теория катастроф. У этого процесса в качестве управляющих параметров являются значения энергии при взрывах и местоположение этих взрывов относительно изучаемой или отрабатываемой области массива. В качестве внутренних параметров выступают кинематические и динамические параметры деформационных волн [7,8], а также параметры, отражающие структурные особенности массива, через которые проходят эти волны [9]. Использование методов анализа теории катастроф для краткосрочного и среднесрочного прогноза состояния горного массива только при использовании управляющих параметров не достаточно из-за резкой его неоднородности и процессов самоорганизации, происходящих в нем при активном на него воздействии. Однако совместное использование качественных рекомендаций теории катастроф и пространственно временные данные изменения внутренних параметров массива позволит предотвратить катастрофы при отработке шахтных массивов на больших глубинах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андронов А.А.*, *Витт А.А.*, *Хайкин С.Э.* Теория колебаний. 2-е изд., перераб. и испр. – М.: Наука, 1981. – 918 с.

2. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. 3-е изд., доп. – М.: Наука, 1990. – 128 с.

3. *Климонтович Ю.Л.* Турбулентное движение и структура хаоса. – М.: Ком Книга, 2007. – 328 с.

4. *Ляпунов А.М.* Собрание сочинений в трех томах. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954–1959. – 446, 472, 374 с.

5. *Наймарк Ю.И.* Динамические системы и управляемые процессы. – М.: Наука, 1978. – 336 с.

6. *Пуанкаре А.* Избранные труды в трех томах. – М.: Наука, 1971–1974. – 776, 901, 703 с.

7. *Хачай О.А.*, *Хачай О.Ю.*, *Климко В.К.* Динамические характеристики медленных волн деформации как отклика массива на взрывные

воздействия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 208–214.

8. *Хачай О.А.*, *Хачай О.Ю.*, *Шипеев О.В.* Исследование иерархической структуры динамических характеристик медленных деформационных волн – отклика на взрывные воздействия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 215–222.

9. *Хачай О.А.*, *Хачай О.Ю.* Сопоставление особенностей синергетических свойств состояния удароопасного массива горных пород, определяемых по данным сейсмического и индукционного электромагнитного мониторинга // Мониторинг. Наука и технологии. – 2014. – № 3. – С. 50–55.

10. *Хачай О.А.*, *Хачай О.Ю.*, *Климко В.К.*, *Шипеев О.В.* Информативные признаки подготовки высокоэнергетических динамических явлений по данным шахтного сейсмологического мониторинга // Горный Информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 4. – С. 155–216.

11. *Хачай О.А.*, *Хачай О.Ю.* О построении нелинейной динамической модели отклика массива горных пород на сильные взрывные воздействия // Геофизические исследования. – 2015. – Т. 16 – № 2. – С. 19–26, UT RSCI:23569010.

12. *Хачай О.А.*, *Хачай О.Ю.*, *Климко В.К.*, *Шипеев О.В.* Изучение нелинейного динамического состояния горного массива по данным сейсмического каталога в глубоких шахтах при техногенных воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 217–230. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хачай Ольга Александровна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, старший научный сотрудник, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, e-mail: olgakhachay@yandex.ru,
Хачай Олег Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Уральский федеральный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 88–99.

UDC 550.830, 539.3

O.A. Khachay, O.Yu. Khachay

ANALYSIS OF SEISMIC RESPONSE OF ROCKS TO BLASTING USING THE METHODS OF THEORY OF EMERGENCIES

At present, more and more clearly the interaction between physics and mathematics performs, it is an influence of needs of physics on the development of mathematical methods and it is the reverse influence of mathematics on the physical knowledge. A number of problems for which the apparatus of linear mathematics is insufficient occur in the number of questions of physics and engineering.

For comprehensive coverage of the diverse phenomena in acoustics and mechanics, the mathematical formalism of linear differential equations is absolutely insufficient. It certainly does not fit the scope of just the phenomena that are the most typical and interesting.

This paper deals with the use of the mathematical theory of catastrophes approaches for data analysis of mine seismological catalog, reflecting the degree of stability and the loss of its by the rock massif during the active impact on it. The process of mining the rock massif is a dynamic process and it can be managed by following the recommendations offered by the catastrophe theory. The analysis suggests the following conclusions. Using the methods of analysis of catastrophe theory for short-term and medium-term forecast of the rock massif state only by use the control parameters it is not enough because of it sharp heterogeneity. However, the integrating use of the qualitative recommendations of the catastrophe theory and space-time data changes of the internal massif parameters will prevent the catastrophe when developing mine rock massive.

Key words: catastrophe theory, nonlinear dynamic massif, internal and control parameters, seismic and electromagnetic monitoring.

AUTHORS

Khachay O.A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher, Senior Researcher,
e-mail: olgakhachay@yandex.ru,
Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
620016, Ekaterinburg, Russia,
Khachay O.Yu., Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant Professor,
Ural Federal University, 620002, Ekaterinburg, Russia.

REFERENCES

1. Andronov A.A., Vitt A.A., Khaykin S.E. *Teoriya kolebaniy*, 2-e izd (Теория колебаний. 2nd edition), Moscow, Nauka, 1981, 918 p.

2. Arnol'd V.I. *Teoriya katastrof*, 3-e izd. (Теория катастроф. 3-е изд.), Moscow, Nauka, 1990, 128 p.

3. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa* (Турбулентное движение и структура хаоса), Moscow, Kom Kniga, 2007, 328 p.

4. Lyapunov A.M. *Sobranie sochineniy v trekh tomakh* (Собрание сочинений в трех томах), Moscow, Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1954–1959.

5. Naymark Yu.I. *Dinamicheskie sistemy i upravlyaemye protsessy* (Динамические системы и управляемые процессы), Moscow, Nauka, 1978, 336 p.

6. Puankare A. *Izbrannye trudy v trekh tomakh* (Избранные труды в трех томах), Moscow, Nauka, 1971–1974.

7. Khachay O.A., Khachay O.Yu., Klimko V.K. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 5, pp. 208–214.

8. Khachay O.A., Khachay O.Yu., Shipeev O.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 5, pp. 215–222.

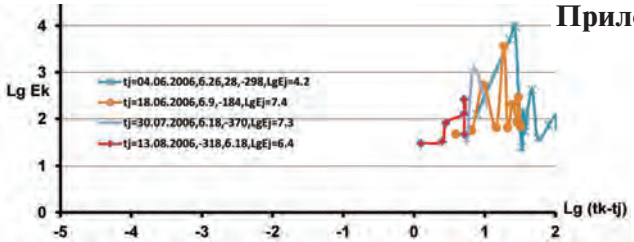
9. Khachay O.A., Khachay O.Yu. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2014, no 3, pp. 50–55.

10. Khachay O.A., Khachay O.Yu., Klimko V.K., Shipeev O.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 4, pp. 155–216.

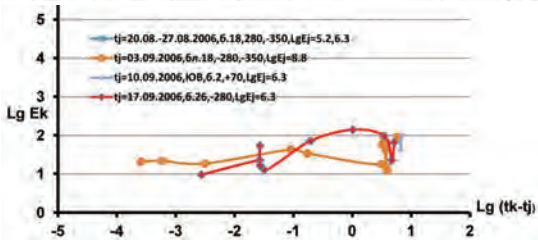
11. Khachay O.A., Khachay O.Yu. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2015. T. 16, no 2, pp. 19–26, UT RSCI:23569010.

12. Khachay O.A., Khachay O.Yu., Klimko V.K., Shipeev O.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 4, pp. 217–230.

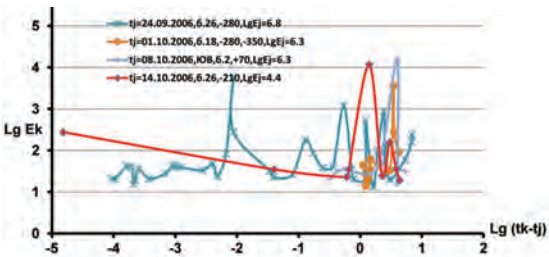
а)


tj=04.06.2006,6.26,28,-298,LgEj=4.2
tj=18.06.2006,6.9,-184,LgEj=7.4
tj=30.07.2006,6.18,-370,LgEj=7.3
tj=13.08.2006,-318,6.18,LgEj=6.4
Lg Ek
Lg (tk-tj)

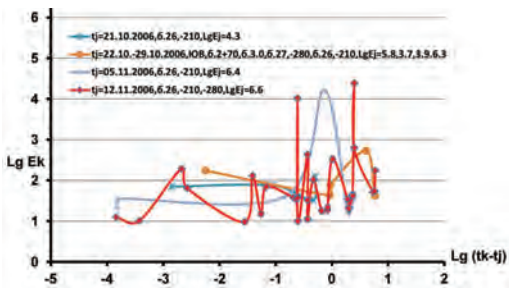
б)


tj=20.08.-27.08.2006,6.18,280,-350,LgEj=5.2,6.3
tj=03.09.2006,6л.18,-280,-350,LgEj=8.8
tj=10.09.2006,IOB,6.2,+70,LgEj=6.3
tj=17.09.2006,6.26,-280,LgEj=6.3
Lg Ek
Lg (tk-tj)

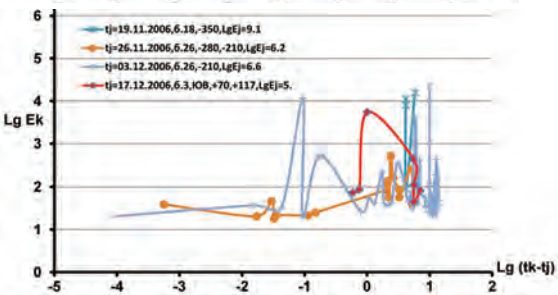
в)


tj=24.09.2006,6.26,-280,LgEj=6.8
tj=01.10.2006,6.18,-280,-350,LgEj=6.3
tj=08.10.2006,IOB,6.2,+70,LgEj=6.3
tj=14.10.2006,6.26,-210,LgEj=4.4
Lg Ek
Lg (tk-tj)

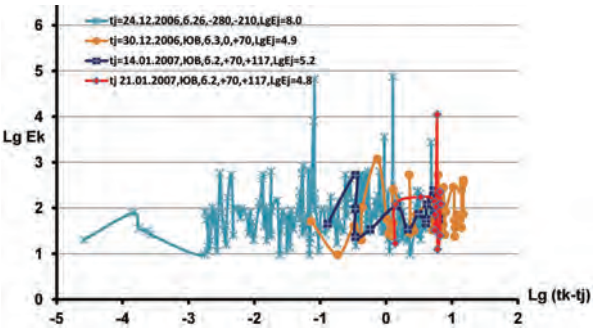
г)


tj=21.10.2006,6.26,-210,LgEj=4.3
tj=22.10.-29.10.2006,IOB,6.2+70,6.3.0,6.27,-280,6.26,-210,LgEj=5.8.3.7,8.9.6.3
tj=05.11.2006,6.26,-210,LgEj=6.4
tj=12.11.2006,6.26,-210,-280,LgEj=6.6
Lg Ek
Lg (tk-tj)

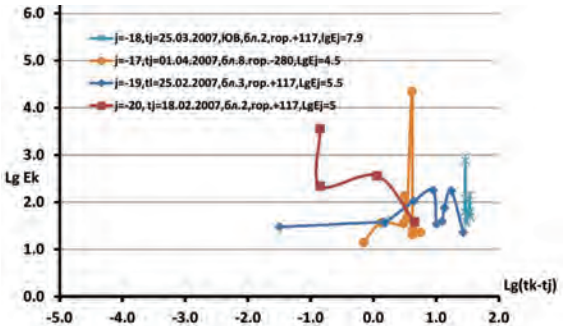
д)


tj=19.11.2006,6.18,-350,LgEj=9.1
tj=26.11.2006,6.26,-280,-210,LgEj=6.2
tj=03.12.2006,6.26,-210,LgEj=6.6
tj=17.12.2006,6.3,IOB,+70,+117,LgEj=5.
Lg Ek
Lg (tk-tj)

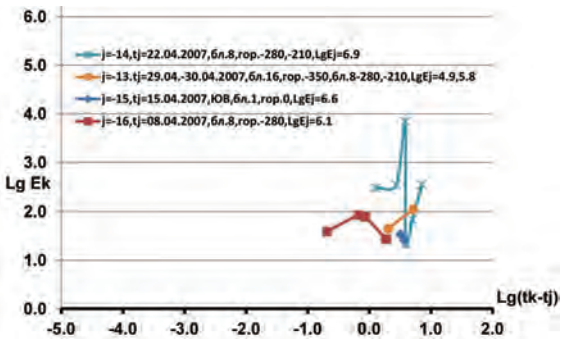
е)


tj=24.12.2006,6.26,-280,-210,LgEj=8.0
tj=30.12.2006,ЮВ,6.3,0,+70,LgEj=4.9
tj=14.01.2007,ЮВ,6.2,+70,+117,LgEj=5.2
tj 21.01.2007,ЮВ,6.2,+70,+117,LgEj=4.8
Lg Ek
Lg (tk-tj)

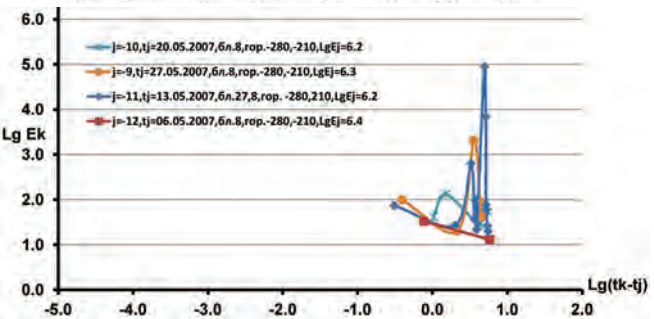
ж)


j=-18,tj=25.03.2007,ЮВ,бл.2,гор.+117,lgEj=7.9
j=-17,tj=01.04.2007,бл.8,гор.-280,LgEj=4.5
j=-19,tl=25.02.2007,бл.3,гор.+117,LgEj=5.5
j=-20, tj=18.02.2007,бл.2,гор.+117,LgEj=5
Lg Ek
Lg(tk-tj)

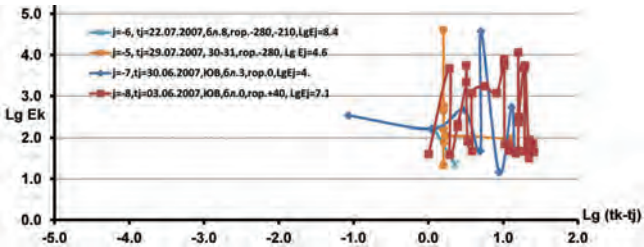
з)


j=-14,tj=22.04.2007,бл.8,гор.-280,-210,LgEj=6.9
j=-13.tj=29.04,-30.04.2007,бл.16,гор.-350,бл.8-280,-210,LgEj=4.9,5.8
j=-15,tj=15.04.2007,ЮВ,бл.1,гор.0,LgEj=6.6
j=-16,tj=08.04.2007,бл.8,гор.-280,LgEj=6.1
Lg Ek
Lg(tk-tj)

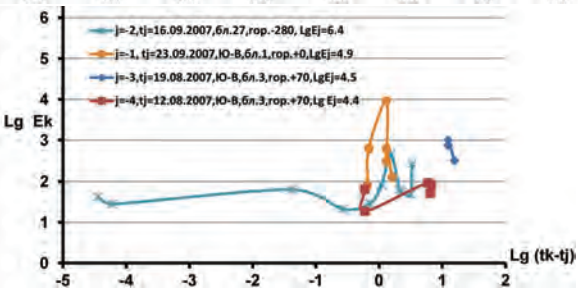
и)


j=-10,tj=20.05.2007,бл.8,гор.-280,-210,LgEj=6.2
j=-9,tj=27.05.2007,бл.8,гор.-280,-210,LgEj=6.3
j=-11,tj=13.05.2007,бл.27,8,гор. -280,210,LgEj=6.2
j=-12,tj=06.05.2007,бл.8,гор.-280,-210,LgEj=6.4
Lg Ek
Lg(tk-tj)

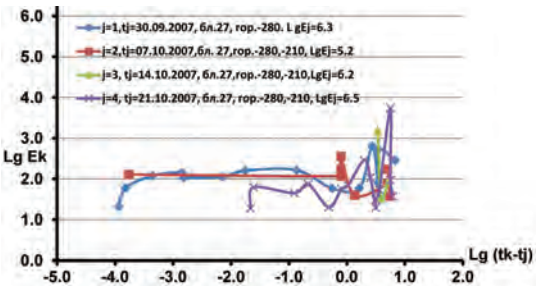
к)



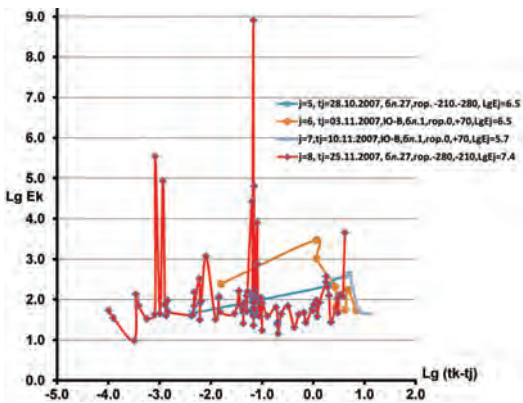
л)



м)



н)



Морфология зависимости энергии Ek (Дж) отклика массива на взрывное воздействие во времени (а-н) с 4 июня 2006 г. по 25 ноября 2007 г.: tk – время откликов массива; *tj* – дата и время воздействия (в сутках); *Ej* – энергия воздействия (Дж)