

О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Клишко, О.В. Шипеев
ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ ПОДГОТОВКИ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ ШАХТНОГО
СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА*

Разработан новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога для определения информативных признаков подготовки высокоэнергетических динамических явлений по данным шахтного сейсмологического мониторинга. К ним относятся время запаздывания высокоэнергетического отклика на техногенные воздействия и объем формирования очага горного удара. Полученная комплексная информация из данных сейсмологического каталога является важной для прогноза опасных явлений в рудных шахтах. Сделана рекомендация о комплексировании сейсмологического и электромагнитного мониторинга, использующего метод неразрушающего контроля.

Ключевые слова: отклик массива, сейсмический шахтный каталог, анализ натуральных данных, алгоритм обработки сейсмологической информации, время подготовки горных ударов, объем очага.

Введение

Исследования состояния массива с использованием подходов теории динамических систем [1] производились с целью выяснения критериев смены режимов диссипативности для реальных горных массивов, находящихся под сильным техногенным воздействием. Для реализации этого исследования разработаны математические алгоритмы моделирования распространения сейсмического поля в слоисто-блоковых средах с иерархически неоднородными включениями [2, 3]. Для создания динамической модели, адекватной процессам подготовки высокоэнергетических проявлений в горных массивах, находящихся под сильным техногенным воздействием, был произведен анализ данных детального сейсмического каталога Таштагольского подземного рудника за два года наблюдений с января 2006 г. по январь 2008 г. В качестве данных ис-

пользованы пространственно-временные координаты всех динамических явлений–откликов массива, происшедших за этот период внутри шахтного поля, и взрывов, произведенных для отработки массива, а также значения зафиксированной сейсмической станции энергии взрывов и откликов массива [4]. Все шахтное поле было разделено на две половины: выработки северо-западного участка, районы стволов Западная и Ново-Капитальная и выработки с 0 по 13 обозначены нами, как северный участок. Выработки с 14 по 31, южный вентиляционный и полевой штреки, ствол Южной шахты, выработки юго-восточного участка обозначены как южный участок. Были анализированы все события-отклики с горизонтов с отметками -140 м, -210 м, -280 м, -350 м. Взрывы производились на южном, юго-восточном, северо-западном и северном участках. Сейсмологический каталог был также

* Работа выполнена в рамках ГП с СО РАН 2012–2014.

разделен на две части: северную и южную, по событиям: откликам и по взрывам, происходившим в северной и южной части шахтного поля.

Фазовые портреты состояния массивов северного и южного участков построены в координатах $E_v(t)$ и $d(E_v(t))/dt$, t – время, выраженное в долях суток, E_v – выделенная массивом сейсмическая энергия в Дж. В работе [4] проанализирована морфология фазовых траекторий сейсмического отклика на взрывные воздействия в различные последовательные промежутки времени южного участка шахты. В этот период по данным о произведенных технологических и массовых взрывах большая часть энергии была закачана именно в южный участок шахты. Кроме того в конце 2007 г. именно в южном участке произошел один из самых сильных горных ударов за всю историю работы рудника. В результате анализа выделена характерная морфология фазовых траекторий отклика массива, находящегося локально во времени в устойчивом состоянии. На фазовой плоскости имеется локальная область в виде клубка переплетенных траек-

торий и небольшие выбросы от этого клубка, не превышающие по энергии значений 10^5 Дж. В некоторые промежутки времени этот выброс превышает 10^5 Дж, достигая 10^6 Дж и даже 10^9 Дж [3, 4]. Очевидно, что имеют место два взаимозависящих друг от друга процесса. Процесс накопления энергии, что отражается в области, притягивающей фазовые траектории, и процесс резонансного сброса накопленной энергии. Интересно отметить, что после этого сброса система возвращается снова в эту же притягивающую фазовые траектории область. Это подтверждается и детальным анализом фазовых траекторий сейсмического отклика массива до и после самого сильного горного удара. Однако на процесс изменения состояния массива сильно влияет процесс достаточно регулярного внешнего воздействия в виде взрывов различной мощности. За время между взрывами массив не успевает выделить полученную им энергию, что приводит к реакции запаздывания отклика и нелинейности его проявления, что затрудняет прогноз по времени силь-

Таблица 1

Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 0 до 50 м от точек взрывов

В-О	dx , м	dy , м	dz , м	r , м	dt , сутки	E_v , Дж	E_o , Дж
(1)-ю1	0	-23	10	25	77	5,40E+04	2,7E+06
(1)-ю2	-18	-1	3	18	111	5,40E+04	1,48E+04
(23)-ю7	-24	-16	3	29	0,3	2,15E+07	1,56E+04
ю10-ю17	-20	17	-18	32	40	1,17E+04	1,56E+04
ю10-ю18	-21	-31	-13	40	48	1,17E+04	1,56E+04
(38)-ю17	-30	-24	-1	38	28	7,97E+03	1,56E+04
(46)-ю21	-25	11	3	27	2	9,52E+07	7,48E+04
ю31-ю32	1	-2	-3	4	0,3	1,10E+04	1,04E+04

Обозначения: В – воздействие, О – отклик, dx , dy , dz – разность декартовых координат точек воздействия и отклика, $r = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ – расстояние между точкой воздействия и отклика, dt – разность моментов воздействия и отклика, время запаздывания отклика, E_v – энергия воздействия, E_o – энергия отклика.

но энергетического разрушительного события [5].

Исходя из идей, изложенных в работах [6], анализируемая база данных была дополнена данными пространственных координат взрывов. На этой основе был разработан новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога с учетом кинематических и динамических характеристик деформационных волн, распространяющихся с разными скоростями в массиве горных пород, находящегося под интенсивным внешним воздействием в виде массовых или технологических взрывов [7]. Было установлено, что волны, распространяющиеся со скоростями от 10 до 1 м/час, являются преимущественным переносчиком энергии в массиве и способствующими ее выделению. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения меньше, чем 10^4 Дж способствуют криповой перестройке иерархических включе-

ний блоковых частей массива, которая, приводит к организации нового участка динамической неустойчивости. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения больше, чем 10^5 Дж, могут быть использованы как предвестники и которые рекомендуется принимать во внимание при корректировке производства взрывов в той или иной части массива. Полное отсутствие этих событий свидетельствует об увеличении напряженного состояния в массиве шахты в целом.

Алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога для определения информативных признаков подготовки высокоэнергетических динамических явлений, обсуждение результатов

В настоящей работе предприняты количественные оценки параметра запаздывания высокоэнергетического отклика массива на ряд техногенного

Таблица 2

Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 50 до 100 м от точек взрывов

В-О	dx, м	dy, м	dz, м	r, м	dt, сутки	E_v, Дж	E_o, Дж
(23)-ю5	-56	-34	28	71	0,03	2,15E+07	1,24E+04
(30)-ю9	55	13	-13	58	18	6,35E+06	1,65E+04
(34)-ю10	43	-49	-58	87	2	2,44E+04	1,17E+04
(38)-ю11	4	-41	41	58	15	7,97E+03	1,04E+04
(38)-ю18	-31	-72	4	78	36	7,97E+03	1,17E+04
ю11-ю16	26	62	6	67	11	1,04E+04	1,10E+04
(42)-ю13	24	-24	-59	68	0,02	1,19E+09	4,04E+04
ю15-ю19	75	60	18	98	22	2,92E+04	2,44E+04
ю23-ю28	-7	-62	-39	74	138	2,92E+04	1,16E+04
ю25-ю27	42	42	-40	72	38	3,74E+04	4,04E+04
(72)-ю34	72	54	22	93	42	1,80E+06	8,68E+04
(78)-ю35	97	18	7	99	0,1	8,68E+04	2,67E+04
Обозначения те же, что и в табл. 1.							

Таблица 3

Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 100 до 150 м от точек взрывов

В-О	dx, м	dy, м	dz, м	r, м	dt, сутки	E_v , Дж	E_o , Дж
(16')-ю36	111	97	-22	149	575	1,24E+04	8,14E+08
(21)-ю36	117	53	-34	133	539	1,65E+04	8,14E+08
(23)-ю4	69	-82	19	109	0,01	2,15E+07	1,92E+04
(23)-ю8	-28	-121	-2	124	0,06	2,15E+07	3,74E+04
(35)-ю36	118	61	34	137	400	1,92E+04	8,14E+08
(38)-ю36	77	86	-18	117	393	7,97E+03	8,14E+08
(39)-ю36	100	45	33	114	392	2,07E+06	8,14E+08
(41)-ю36	102	74	41	132	378	3,95E+06	8,14E+08
ю4-ю5	-125	48	9	134	0,03	1,92E+04	1,24E+04
ю5-ю6	-35	-118	-13	124	0,96	1,24E+04	3,35E+05
ю7-ю8	4	-105	5	105	0,09	1,04E+04	3,74 E+04
ю20-ю21	-95	-28	-81	128	1	6,60E+04	7,48 E+04
(43)-ю18	13	-88	-46	100	7	1,55E+06	1,17 E+04
(43)-ю36	121	70	24	142	364	1,55E+06	8,14 E+08
(44)-ю18	32	-108	17	114	0,08	3,98 E+06	1,17 E+04
(68)-ю33	31	-137	-20	142	70	2,70 E+06	3,48 E+05
(68)-ю36	89	70	34	118	70	2,70 E+06	8,14 E+08
(70)-ю34	106	33	17	112	56	2,06 E+06	8,68 E+04
(71)-ю36	63	75	48	109	49	1,65 E+05	8,14 E+08
(72)-ю36	55	91	39	113	42	1,80 E+06	8,14 E+08
(78)-ю36	80	55	44	107	0,06	8,68 E+04	8,14 E+08
Обозначения те же, что и в табл. 1.							

воздействия, во время которого значительную часть времени составляло отсутствие отклика массива. Толчок (ю36) с энергией $8,14E+08$ Дж произошел 25.11.2007 г. с координатами $x = 11\ 928$ м, $y = 11\ 627$ м, $z = -264$ м (+(-450 м)). Он обозначен, как и все остальные нами изучаемые отклики, происшедшие в южной части шахты буквой ю и номером 36. Взрывы обозначены в виде (i), где i – номер взрыва за период 2006–2008 гг. Нами получены дополнительные оценки расстояний от точки взрыва до точки отклика массива. Координаты взрывов

и откликов массива взяты из сейсмического шахтного каталога Таштагольского рудника.

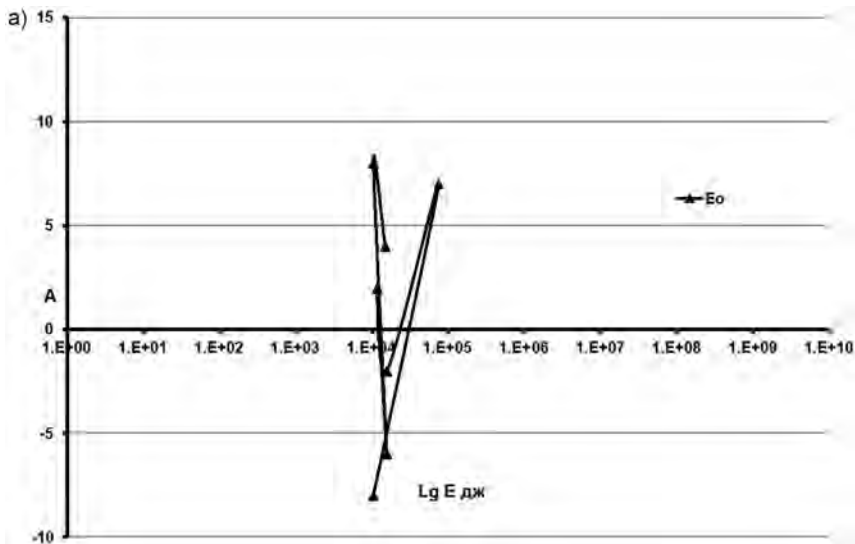
Данные, представленные в табл. 1–4, являются результатом применения разработанного алгоритма обработки данных, представленных в сейсмологическом шахтном каталоге за период с 2006 по 2008 гг. Введены градации состояния массива по расстояниям между точками взрывов и точками отклика массива: 0–50 м, 50–100 м, 100–150 м, 150–200 м. Для визуализации изменения состояния массива при подготовке высокоэнергетического яв-

Таблица 4

Воздействие и отклик массива южной части шахты в пределах расстояния от 150 до 200 м от точек взрывов

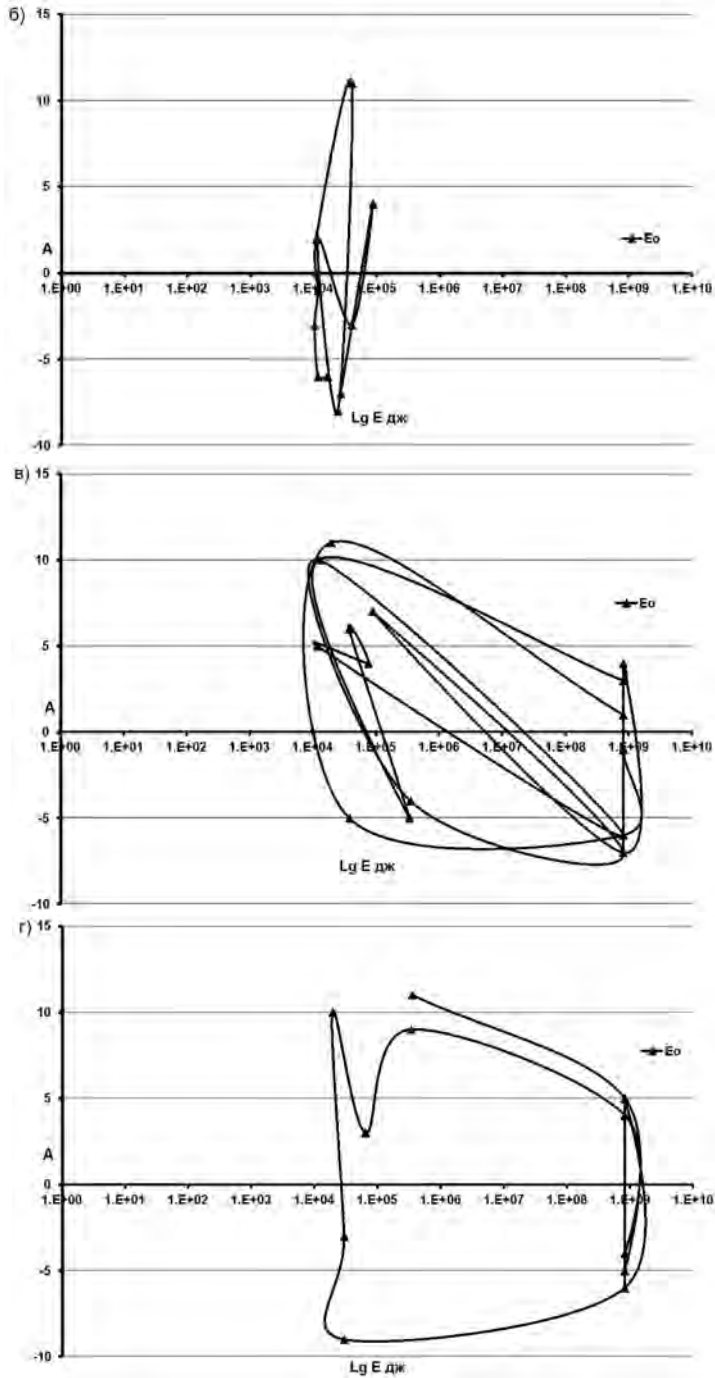
В-О	dx, м	dy, м	dz, м	r, м	dt, сутки	E_b , Дж	E_o , Дж
(23)-ю6	-91	-152	15	178	1	2,154E+07	3,35E+05
(29)-ю36	170	91	-23	194	434	2,07E+06	8,14E+08
(30)-ю36	174	76	2	190	427	6,35E+06	8,14E+08
(34)-ю36	130	78	23	153	407	2,44E+04	8,14E+08
(40)-ю36	140	63	17	154	385	2,70E+06	8,14E+08
ю4-ю6	-160	-70	4	175	0,99	1,92E+04	3,35E+05
ю20-ю37	38	-146	14	152	336	3,35E+05	6,39E+04
(42)-ю14	-78	-180	26	198	0,06	1,19E+09	1,92E+04
(42)-ю15	163	-38	-31	170	2	1,19E+09	2,92E+04
ю13-ю15	187	-14	-28	190	2	1,48E+04	2,92E+04
(44)-ю36	140	50	50	157	357	3,98E+06	8,14 E+08
(46)-ю36	140	64	-17	155	336	9,52E+07	8,14 E+08
(59)-ю36	115	117	1	164	197	1,10E+04	8,14 E+08
(74)-ю36	98	111	-54	158	35	2,93 E+06	8,14 E+08
(78)-ю33	1	-168	58	178	0,01	8,68 E+04	3,48 E+05

Обозначения те же, что и в табл. 1.



Фазовые диаграммы динамического состояния массива южной части шахтного

массива за период 2006–2008 гг.: а) $r = 0-50$ м; вертикальная ось: $A = aLgf$, $f = \left| \frac{\partial E_v}{\partial t} \right|$,
 $a = \text{sign} \partial E_o$, $E_v = E_b - E_o$, горизонтальная ось: $LgE = LgE_o$



Фазовые диаграммы динамического состояния массива южной части шахтного массива за период 2006-2008 гг.: б) $r = 50-100$ м; в) $r = 100-150$ м; г) $r = 150-$

200 м; вертикальная ось: $A = aLgf$, $f = \left| \frac{\partial E_v}{\partial t} \right|$, $a = \text{sign} \partial E_v$, $E_v = E_b - E_o$, горизонтальная ось: $LgE = LgE_o$

ления в рамках этих градаций используется метод фазовых диаграмм [9].

Выводы

Как следует из анализа данных табл. 1–4 и рисунка отклик массива ю36 в виде высокоэнергетического отклика проявляется только, начиная с расстояний между точкой воздействия и отклика от 100 м до 200 м. При этом время запаздывания реакции массива на оказанное в виде взрыва воздействие составляет десятки и даже сотни суток. Поэтому, несмотря на то, что от взрыва (78) (табл. 3) отклик ю36 произошел практически мгновенно,

ему предшествовал длинный процесс подготовки резонансного выброса энергии [9], который необходимо сопровождать электромагнитным мониторингом возникновения и скопления дезинтеграционных зон в объеме массива: $dx = 100\text{--}180$ м, $dy = 33\text{--}180$ м, $z = (-210\text{--}(-300))\text{--}(-450)$ м.

Разработанный новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога позволяет извлечь дополнительную важную информацию для прогноза опасных явлений в рудных шахтах и для развития теории динамических явлений в природных геолого-геофизических средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 424 с.

2. Хачай О.А., Хачай А.Ю. Моделирование сейсмического и электромагнитного поля в иерархически неоднородных средах // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2014. – Т. 3. – № 1. – С. 33–43.

3. Khachay O.A., Khachay A.Yu., Khachay O.Yu. Dynamical model for evolution of Rock Massive State as a Response on a Changing of Stress-Deformed State // Fractal analysis and Chaos in Geosciences, chapter 5 / Edited by Sid-Ali Quadfeul. – In Tech, Croatia. 2012. – 174 p.

4. Хачай О.А. Изучение и контроль состояния горных массивов с позиции теории открытых динамических систем. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 7. – С. 145–151.

5. Хачай О.А., Хачай А.Ю. Изучение напряженно-деформированного состояния иерархических сред / Третья тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Матери-

алы докладов конференции 8–12 октября 2012 г. – М.: ИФЗ РАН. – 2012. – С. 114–117.

6. Опарин В.Н., Востриков В.Н., Тапсиев А.П. и др. Об одном кинематическом критерии прогнозирования предельного состояния массивов горных пород по шахтным сейсмологическим данным // ФТПРПИ. – 2006. – № 6. – С. 3–10.

7. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Алгоритм построения сценария подготовки горных ударов в породных массивах под воздействием взрывов по данным сейсмического каталога // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 4. – С. 239–246.

8. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики. – М.: Физматлит, 2003. – 294 с.

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. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хачай Ольга Александровна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: olgakhachay@yandex.ru, Институт геофизики УрО РАН,
Хачай Олег Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: khachay@yandex.ru,
Уральский Федеральный Университет, Институт математики и компьютерных наук;
Климко Валерий Константинович – e-mail: klimko_vk@nkmk.ru,
Шипеев Олег Васильевич – кандидат технических наук, e-mail: shipeev_ov@nkmk.ru,
Таштагольский подземный рудник.

**INFORMATIVE ATTRIBUTES OF PREPARING
HIGH ENERGETIC DYNAMICAL EVENTS ACCORDING TO DATA
FROM THE MINING SEISMOLOGICAL MONITORING**

Khachay O.A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher, e-mail: olgakhachay@yandex.ru,
Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia,
Khachay O.Yu., Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: khachay@yandex.ru,
Ural Federal University, Institute of Mathematics and Computer Science,
Ekaterinburg, Russia,
Klimko V.K., e-mail: klimko_vk@nkmk.ru, Таштагольский подземный рудник,
Shipeev O.V., Candidate of Technical Sciences, e-mail: shipeev_ov@nkmk.ru,
Tashtagol mine.

A new algorithm of seismological information processing of detailed mines catalogue for defining informative attributes of high energetic dynamical events preparing according to data from the mining seismological monitoring. They are the lag of response on man-made influence and the volume of the rock burst focus forming. The received joined information from the seismic catalogue is very significant for forecasting of dangerous events in the rock mines. It is suggested a joined seismological and electromagnetic monitoring, which is based on the method of non destroying control.

Key words: massif response, seismological mining catalogue, analyze of observed data, algorithm of seismological information processing, informative attributes, time of preparing rock bursts, focus volume.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work has been supported by the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in the framework of prioritized programs for 2012–2014.

REFERENCES

1. Naimark Yu.I., Landa P.S. *Stokhasticheskie i khaoticheskie kolebaniya* (Stochastic and chaotic oscillations), Moscow, Knizhnyi dom «LIBROKOM», 2009, 424 p.
2. Khachai O.A., Khachai A.Yu. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya «Vychislitel'naya matematika i informatika»*. 2014, vol. 3, no 1, pp. 33–43.
3. Khachay O.A., Khachay A.Yu., Khachay O.Yu. Dynamical model for evolution of Rock Massive State as a Response on a Changing of Stress-Deformed State. *Fractal analysis and Chaos in Geosciences*, chapter 5. Edited by Sid-Ali Quadfeul. In Tech, Croatia. 2012, 174 p.
4. Khachai O.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2013, no 7, pp. 145–151.
5. Khachai O.A., Khachai A.Yu. *Tret'ya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN. Materialy dokladov konferentsii*, 8–12 oktyabrya 2012 g. (III Conference on Tectonophysics, Institute of Physics of the Earth, RAS. Conference proceedings, 8–12 October 2012), Moscow, IFZ RAN, 2012, pp. 114–117.
6. Oparin V.N., Vostrikov V.N., Tapsiev A.P. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2006, no 6, pp. 3–10.
7. Khachai O.A., Khachai O.Yu. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014, no 4, pp. 239–246.
8. Chulichkov A.I. *Matematicheskie modeli nelineinoi dinamiki* (Mathematical models of nonlinear dynamics), Moscow, Fizmatlit, 2003, 294 p.
9. Khachai O.A., Khachai O.Yu. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2014, no 3, pp. 50–55.

