

УДК 681.2

© В. И. Осика, Б. М. Кочетков, Е. И. Павлов, И. П. Качан

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В работе изложены результаты кооперации научного института с предприятиями малого бизнеса с целью разработки перспективной аппаратуры для мониторинга деформационных процессов ответственных и технически сложных объектов. Аппаратура прошла многолетние испытания на объектах гидроэнергетики, горнодобывающих предприятиях и гражданских строительных объектах. В настоящей статье приводятся краткие сведения о приборах и примеры результатов их применения.

Кл. сл.: наклономер, деформометр

ВВЕДЕНИЕ

В результате создания любого крупного объекта на этой территории происходит эволюция природно-технической системы, что связано с необходимостью соответствующего мониторинга (режимных наблюдений) на территории самого объекта и в некоторой его окрестности. Как правило, прежде всего возникает необходимость контролировать стабильность положения основных сооружений объекта и их оснований [1]. Для данных целей традиционно применяется повторная геодезическая съемка на объекте. К сожалению, только одних, как правило, редких геодезических измерений недостаточно для надежного мониторинга, и возникает необходимость комплексировать их с другими непрерывными измерениями [2]. Для контроля линейных деформаций и деформаций сдвига конструкций используются деформометры сжатия-растяжения и наклонометры для контроля углов наклона [3]. В этом случае принципиально возможно предупреждение аварийных ситуаций, которые могут возникнуть при превышении допустимых деформаций для данного сооружения, определяемых при проектировании объекта [4].

За последние десятилетия резко увеличилась вероятность возникновения техногенных аварий и катастроф, связанных с разрушением зданий или инженерных сооружений. В 2008 г. правительством Москвы было вынесено постановление № 375 ПП о том, что системами мониторинга должны быть оборудованы все технически сложные объекты (речные порты, аэропорты, мосты и тоннели, метрополитены, крупные промышленные объекты с численностью занятых более 10 тысяч человек), а также высотные и уникальные объекты, объекты с массовым пребыванием людей [5].

Установка систем мониторинга гарантирует снижение риска утраты несущей конструкцией свойств, определяющих ее надежность, благодаря своевременному обнаружению на ранней стадии негативного изменения состояния (напряженно-деформированного состояния) несущих конструкций. Соответственно предотвращает разрушения и переход сооружения в ограниченно работоспособное, аварийное состояние.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ "СМНК-СТРАЖ"

На основании разработанной в ИФЗ РАН в 90-х годах XX в. под руководством проф. Е.И. Попова технологии изготовления стабильных малогабаритных наклонометров и короткобазисных деформометров из кварцевого стекла за последние десять лет были созданы различные датчики, имеющие применение в гидроэнергетике, горной промышленности и в гражданском строительстве [6, 7]. Применение указанной технологии обеспечивает долговременную стабильность основных параметров первичных датчиков при относительной простоте их изготовления, что является главной целью при разработке аппаратуры для долговременных наблюдений. Создание кооперации с малыми предприятиями позволило организовать изготовление первичных датчиков из кварцевого стекла методом сварки и быстро перейти на современную элементную базу в части электроники, используемой для преобразования малых механических перемещений чувствительного элемента в цифровой электрический сигнал.

Система мониторинга несущих конструкций строительных сооружений "СМНК-СТРАЖ" предназначена для непрерывного или периодиче-

ского контроля состояния инженерных конструкций и оснований зданий и сооружений. Внесена в реестр средств измерений № 64409-16. Система представляет собой комплекс оборудования и пакет программного обеспечения, реализующий поддержание рабочих режимов и управляющих воздействий в заданных пределах.

Система обеспечивает предупреждение возникновения и развития аварийных, чрезвычайных ситуаций на контролируемых объектах, а также снижение потерь, размеров ущерба в случае их возникновения. Благодаря возможности удаленного доступа к контролируемым объектам система позволяет своевременно информировать соответствующие дежурно-диспетчерские, оперативно-диспетчерские, аварийно-спасательные, пожарные, надзорные и другие службы, отправляя внеочередной отчет о нарушении работоспособности критически важных для безопасности инженерных систем объектов. На объектах, оборудованных данной системой, в несколько раз сокращаются временные затраты на реагирование. Обеспечивается гарантированная устойчивость функционирования объектов мониторинга.

Комплекс технических средств, входящих в "СМНК-СТРАЖ", позволяет создавать следующие подсистемы мониторинга, отличающиеся по функциональному назначению.

- Подсистема мониторинга напряженно-деформированного состояния.
- Подсистема измерений угловых перемещений несущих конструкций строительных сооружений.
- Подсистема мониторинга вибрационных воздействий.

ПОДСИСТЕМА МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ "СМНК-СТРАЖ"

Подсистема обеспечивает контроль напряжений в строительных конструкциях, в частности измерение раскрытия трещин, измерение деформаций металла с помощью накладных или привариваемых датчиков, измерение деформации бетона с помощью накладных и закладных деформометров. В качестве измерительного оборудования используются: устройства сбора данных USD-A8, двухосновные тензодатчики ТД120, тензометрические щелемеры ТЩ120, накладные кварцевые деформометры ДК200, закладные композитные датчики деформаций КД120.

Композитный датчик деформации КД120 (рис. 1) закладывается в тело бетона при бетонировании конструкции и применяется для измерения деформаций как в процессе твердения бетона, так и в течение жизненного цикла конструкции. В отличие от аналогов создает в несколько раз



Рис. 1. Композитный датчик деформации КД120

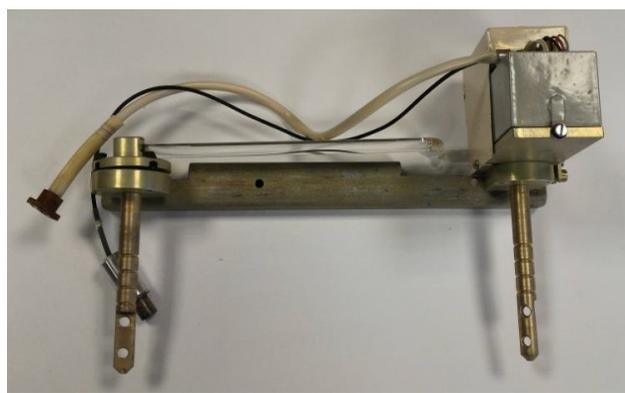


Рис. 2. Накладные кварцевые деформометры ДК200

меньшие концентрации напряжений. Датчик деформации представляет собой стержень композитной арматуры, оборудованный тензорезистивным делителем напряжения и кабелем. Используется совместно с устройством сбора данных USD-A8-1.

Для измерения микродеформаций используются накладные кварцевые деформометры ДК200 (рис. 2). Деформометры предназначены для режимных наблюдений микродеформаций ответственных сооружений. Имеется двойная гальваническая развязка — по питанию и по интерфейсу.

Технические характеристики кварцевого деформометра

Диапазон измерений перемещений	± 0.2 мм
Разрешающая способность	0.1–0.01 мкм
Габаритные размеры	292×120×72 мм

ПОДСИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ "СМНК-СТРАЖ"

Подсистема осуществляет непрерывный мониторинг углов наклона при долговременном мони-



Рис. 3. Угломер ИН120

торинге строительных сооружений, горных выработок, оползневых склонов и др., и состоит из угломеров ИН120 (рис. 3). Чувствительная часть прибора изготовлена из плавленного кварцевого стекла. Интерфейс цифровой RS485. Для подключения используется кабель "витая пара", через который также подается питание. Имеется двойная гальваническая развязка — по питанию и по интерфейсу.

Характеристики ИН120

Измерительный диапазон	-10800" ... +10800"
Разрешение	0.1"
Габариты: диаметр, высота	90, 130 мм

ПОДСИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Состоит из акселерометра трехосевого АК002 (рис. 4). Подсистема предназначена для регистрации механических колебаний строительных сооружений. Имеет синхронизацию относительно опорной шкалы времени нескольких устройств, подключенных к одному контроллеру, что необходимо для идентификации собственных частот

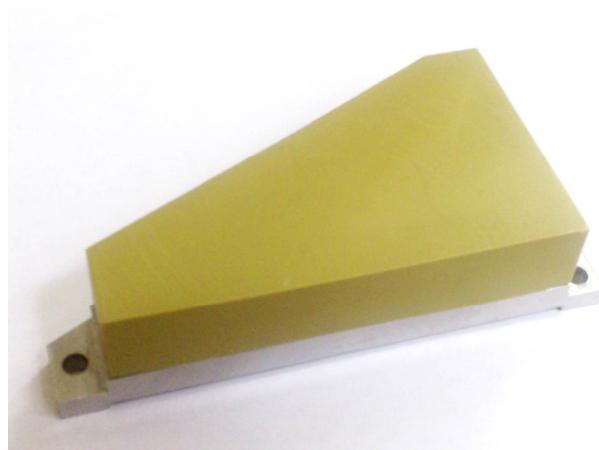


Рис. 4. Акселерометр трехосевой АК002

и форм колебаний строительных сооружений, а также для выполнения комплекса работ по разделению вибраций. Акселерометр трехосевой АК002 соответствует требованиям ГОСТ 53963.1-2010 [8] в части регистрации вибраций строительных сооружений. Акселерометр имеет коэффициент гармонических искажений менее 1 %. Линейный рабочий диапазон на опорной частоте 16 Гц не менее 80 дБ, предельное значение уровня нечувствительности по входу — 0.05 мм/с.

АВТОНОМНЫЙ ПУНКТ СБОРА ДАННЫХ

В качестве устройств регистрации, управления и передачи данных используются адаптеры ОИС024, ОИС024м, ОИС015, контроллер MS4812.

Контроллер MS4812

Предназначен для автономной регистрации углов наклона, вибраций и деформаций строительных сооружений. Осуществляет подачу питания на измерительные устройства "СМНК-СТРАЖ", их опрос и сохранение результатов на карту памяти микро SD (рис. 5).

Характеристики MS4812

Максимальное время непрерывной работы от аккумулятора 7 А/ч, 12 В	более 365 суток
Длина кабеля "витая пара"	до 2000 м
Количество опрашиваемых устройств	от 1 до 32 шт
Емкость карты микро SD	от 4 до 32 Гбайт



Рис. 5. Автономный пункт сбора данных

Устройство сбора данных USD-A8

Позволяет собирать данные с 8 тензOMETрических датчиков, включенных по схеме полумостов.

Адаптеры ОИС024, ОИС024м

Позволяют подключать измерительные устройства "СМНК-СТРАЖ" к компьютеру через интерфейс USB.

Адаптер ОИС015

Предназначен для гальванической развязки и согласования линии передачи данных, в частности, когда требуется передавать данные на длину более 2000 м.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

Общие сведения

Все устройства системы "СМНК-СТРАЖ" рассчитаны на круглосуточную эксплуатацию и прошли многолетние испытания на объектах гидроэнергетики, горнодобывающих предприятиях и других гражданских объектах.

Устройства поставляются с необходимым программным обеспечением (драйверами), разработанным для конкретных измерительных задач, и осуществляют измерительные функции, функции индикации и передачи измерительной информации.

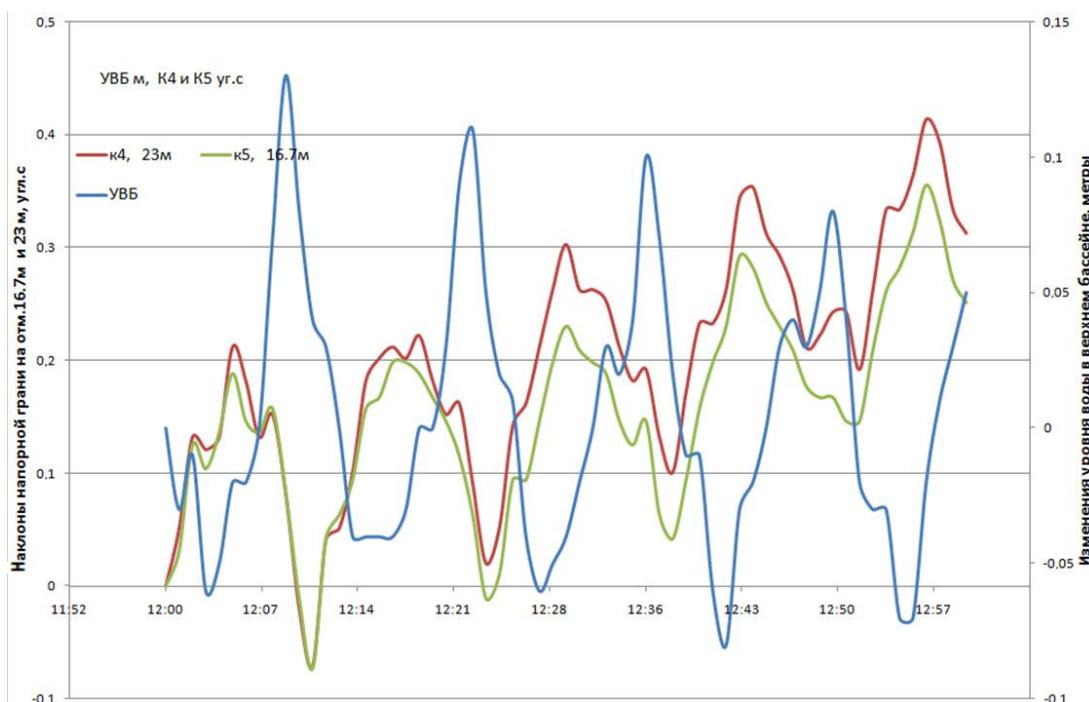


Рис. 6. Загорская ГАЭС-филиал. Свободные колебания воды (сейши) в ВБ и вызываемые ими наклоны напорной грани водоприемника. Все гидроагрегаты отключены

В случае фиксации системами предельных (критических) отклонений конструкции, выдается внеочередное сообщение (внеплановый отчет), содержащее сведения об отклонениях и необходимые рекомендации для предотвращения опасной ситуации. Сообщение незамедлительно отправляется "Заказчику", а также в другие адреса по его требованию.

Применение наклономерно-деформометрического комплекса

Наклономерно-деформометрический комплекс применялся:

- при изучении короткопериодных угловых и линейных деформаций сооружений, вызываемых суточными вариациями нагрузок и колебаниями объема воды в водохранилищах в случае ГАЭС и ГЭС (рис. 6);
- при изучении долговременных изменений

прочности горных выработок и железобетонных конструкций сооружений;

- при контроле сдвиговых процессов по имеющимся в конструкциях трещинам;
- для отслеживания динамики раскрытия трещин и холодных швов;
- при комплексном компьютерном моделировании сооружений, используя прецизионные данные о наклонах и деформациях конструкций;
- при мониторинге Государственного исторического музея, гостиниц "Москва", "Националь", "Метрополь"; в 2004–2008 гг. в контроле ТРК и подземного паркинга на Манежной площади и площади Революции г. Москвы;
- при мониторинге водоприемника Загорской гидроаккумулирующей электростанции;
- в горнодобывающей промышленности в службе прогноза и предупреждения горных ударов (СПГУ) на Кировском руднике ОАО "Апатит" Мурманской области.

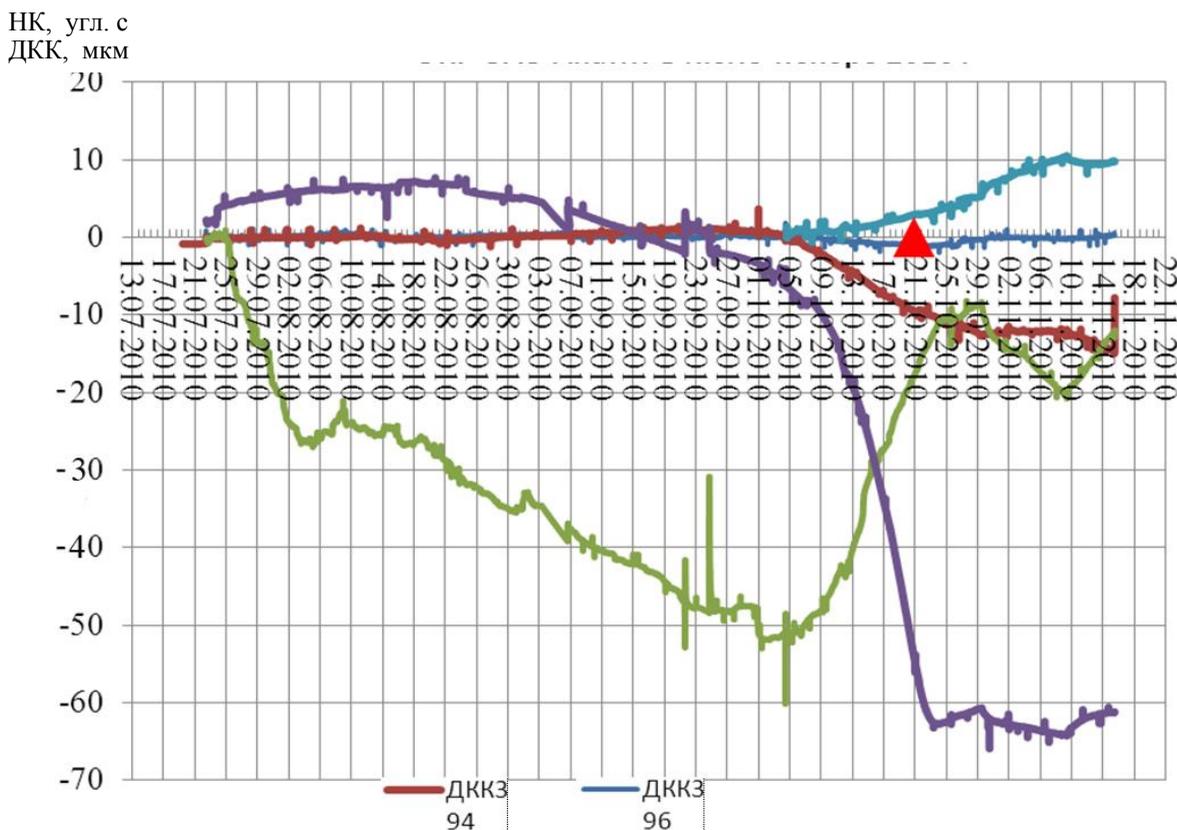


Рис. 7. Данные по геофизическому полигону Юкспорского крыла ОКР ОАО "Апатит" в июле–ноябре 2010 г.

Таким образом, оснащение объектов системами "СМНК-СТРАЖ" позволяет предупредить возникновение и развитие аварийных, чрезвычайных ситуаций; своевременно информировать соответствующие дежурно-диспетчерские, оперативно-диспетчерские, аварийно-спасательные, пожарные, надзорные и другие службы; обеспечить гарантированную устойчивость функционирования объектов мониторинга.

Пример предвестника техногенного землетрясения магнитудой 3.5 был зафиксирован наклономерно-деформометрическим комплексом разработанным ИФЗ РАН и смонтированным сотрудниками Горного института Кольского научного центра на руднике "Кировский" объединения "Апатит" в 2010 г. (рис. 7) [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкин Е.М., Багмет А.Л., Осика В.И., Новак Ю.В., Сухов А.А. Мониторинг деформаций как основа безопасной эксплуатации зданий и сооружений // Инженерная геология. М., 2008. № 3. С. 40–50.
2. Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Осика В.И., Передерин В.П., Розенберг Н.К. Деформационный мониторинг как индикатор техногенного влияния на геолого-экологическую среду // Мониторинг. Наука и технологии. 2015. № 2. С. 15–24.
3. Кочетков Б.М., Молоденский С.М., Осика В.И., Осика И.В. Наклономерно-деформометрический мониторинг на гидроаккумулирующих электростанциях // Геориск. 2009. № 1. С. 22–28.
4. Ловчиков А.В., Захаров В.В., Ивахно В.Я. Контроль состояния подработанных толщ пород высокоточными деформационными методами // Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния массива шахт и рудников. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. С. 142–146.
5. Постановление Правительства Москвы от 6 мая 2008 г. № 375-ПП "О мерах по обеспечению инженерной безопасности зданий и сооружений и предупреждению чрезвычайных ситуаций на территории города Москвы".
6. Попов Е.И., Ребров В.И. АС № 1721438 Наклономер // Бюл. изобр. 1992. № 11.
7. Ловчиков А.В., Осика В.И. АС № 2008699 "Способ регистрации линейных деформаций массива скальных пород". Бюл. изобр. Опубликовано: 28.02.1994.
8. ГОСТ 53963.1-2010 Вибрация. Измерения вибрации сооружений. Требования к средствам измерений.
9. Козырев А.А., Каган М.М., Константинов К.Н., Жиров Д.В. Деформационные предвестники техногенного землетрясения на объединенном Кировском руднике ОАО "Апатит" // Труды Всероссийской конф. "Геодинамика и напряженное состояние недр Земли", посв. 80-летию акад. М.В. Курлени. Т. II. ИГД СО РАН, 2011. С. 228–234.

**Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Москва (Осика В.И.)**

ООО "Петрол спринг", г. Тула (Кочетков Б.М.)

Технопарк МГУ, г. Москва (Павлов Е.И., Качан И.П.)

Контакты: Качан Ирина Петровна,
i.p.kachan@gmail.com

Материал поступил в редакцию: 13.01.2017

FACILITY DEFORMATION MONITORING

V. I. Osika¹, B. M. Kochetkov², E. I. Pavlov³, I. P. Kachan³

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia*

²*Limited liability company "Petrol-spring", Tula, Russia*

³*Science Park MSU, Limited liability company "Optical measuring systems", Moscow, Russia*

The paper presents the results of scientific cooperation with the Institute and small businesses in order to develop a perspective instrument for facility deformation monitoring. The equipment has passed long-term tests for hydropower facilities, mining enterprises and civil construction projects. The report provides a description of the devices and examples of their application results.

Keywords: inclinometer, deformometer

REFERENCES

1. Pashkin E.M., Bagmet A.L., Osika V.I., Novak Yu.V., Suchov A.A. [Monitoring of deformations as basis of safe operation of buildings and constructions]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], Moscow, 2008, no. 3, pp. 40–50. (In Russ.).
2. Galaganov O.N., Guseva T.V., Krupennikova I.S., Mokrova A.N., Osika V.I., Perederin V.P., Rozenberg N.K. [Straining monitoring as indicator of technogenic influence on the geological and ecological environment]. *Monitoring. Nauka i tehnologii* [Monitoring. Science and technologies], 2015, no. 2, pp. 15–24. (In Russ.).
3. Kochetkov B.M., Molodenskiy S.M., Osika V.I., Osika I.V. [Inclination measuring and straining monitoring on pumped storage power plants]. *Georisk* [Geological risk], 2009, no. 1, pp. 22–28. (In Russ.).
4. Lovchikov A.V., Zacharov V.V., Ivachno V.Ya. [Monitoring of a condition of the earned additionally thicknesses of breeds by high-precision straining methods]. *Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva shacht i rudnikov* [The pilot studies of an intense strained state of the massif of shafts and mines]. Novosibirsk, IGD SO AS USSR, 1991, pp. 142–146. (In Russ.).
5. *Postanovlenie Pravitel'stva Moskvy ot 6 maya 2008 g. № 375-PP "O merach po obespecheniyu inzhenernoy bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy i preduprezhdeniyu chrezvychaynykh situaziy na territorii goroda Moskvy"* [The resolution of the government of Moscow of May 6, 2008 No. 375-PP "About measures for ensuring engineering safety of buildings and constructions and a the prevention of emergency situations in the territory of the city of Moscow"]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/289804/>. (In Russ.).
6. Popov E.I., Rebrov V.I. *Naklonomer* [Dipmeter]. Copyright certificate No. 1721438, Bulletin of inventions, 1992, no. 11. (In Russ.).
7. Lovchikov A.V., Osika V.I. *Sposob registratsii lineynykh deformatsiy massiva skal'nykh porod* [Way of filing of the linear deformations of the massif of rocky breeds]. Copyright certificate No. 2008699, 28.02.1994. (In Russ.).
8. GOST 53963.1-2010. Vibration. Measurements of vibration of constructions. Requirements to measuring instruments. URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/50477/>. (In Russ.).
9. Kozyrev A.A., Kagan M.M., Konstantinov K.N., Zhirov D.V. [Straining harbingers of a technogenic earthquake on the integrated Kirov mine of JSC Apatit]. *Trudy Vserossiyskoy konf. "Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli"*, posv. 80-letiyu akad. M.V. Kurleni [Proc. of the All-Russian conference "Geodynamics and Stressed State of a Subsoil of Earth" devoted to the 80 anniversary of the acad. M.V. Kurleni], IGD SO RAS, 2011, vol. II, pp. 228–234. (In Russ.).

Contacts: *Kachan Irina Petrovna*,
i.p.kachan@gmail.com

Article received in edition: 13.01.2017