УДК 53.082.2 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-80-89

Результаты многолетних наблюдений неравномерных осадок зданий, находящихся на территории Верхнекамского калийного месторождения в г. Березники

Георгий Николаевич ГУСЕВ*
Валерий Валерьевич ЕПИН**
Роман Валерьевич ЦВЕТКОВ***

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Аварийное затопление калийного рудника в г. Березники ускорило оседания земной поверхности вместе с расположенными на ней зданиями. Контроль за неравномерным оседанием зданий с помощью геодезического мониторинга и дифференциальной спутниковой интерферометрии не всегда способен обеспечить необходимую дискретность в пространстве и во времени.

Цель работы – организация мониторинга неравномерных осадок зданий, расположенных над затопленным рудником, многолетний сбор данных, анализ результатов измерений.

Методы исследования. Измерение неравномерных осадок зданий организовано с помощью систем, основанных на методе гидростатического нивелирования. Они состоят из наполненных водой сообщающихся сосудов-датчиков. Их количество может варьироваться для обеспечения нужного пространственного разрешения.

Результаты исследований. Была произведена установка гидростатических нивелиров внутри подвальных помещений более чем 35 зданий города. В результате мониторинговых наблюдений начиная с 2014 г. получены эволюции неравномерных оседаний этих зданий, которые позволяют определить как характер деформационных процессов, так и его скорость. Произведены оценки максимальной относительной разности осадок и изменения среднего наклона для зданий. Установлено, что неравномерные оседания зданий происходят практически непрерывно со скоростью, близкой к постоянной, кроме части зданий, где со временем наблюдалось увеличение скорости деформационного процесса. За время наблюдений часть зданий была снесена.

Выводы. Установленные в зданиях системы гидростатического нивелирования продемонстрировали свою работоспособность и позволили практически непрерывно контролировать происходящие процессы неравномерного оседания зданий. Возможно тиражирование подобных систем и для других осаживающихся по разным причинам сооружений.

***Ключевые слова*:** калийный рудник, мониторинг оседаний, неравномерная осадка, долговременные измерения, система гидростатического нивелирования

Введение

В мировой практике описано много случаев влияния подземных выработок на деформационное состояние земной поверхности [1, 2]. Производимые подземные работы оказывают некоторое влияние на деформационные процессы породного массива и земной поверхности вместе с расположенными на ней сооружениями. Контроль за этими процессами, как правило, носит несистемный характер, и измерения нередко инициируются только после видимых изменений или возникновения нештатных ситуаций. Такое событие произошло в 2006 г. на Верхнекамском месторождении калийных солей в результате аварийного затопления рудника [3]. Попадание воды в соляные породы приводит к их растворению и, как следствие, к усилению деформационных процессов в вышерасположенных слоях пород и земной поверхности. В зоне их действия оказалась часть города с жилыми домами и промышленными конструкциями. Поэтому после затопления рудника был запущен комплексный мониторинг [4], который включает в себя контроль за сейсмичностью [5], контроль гидрогеологических параметров [6], контроль за гравиметрией [7, 8], контроль за деформацией земной поверхности, измеряемой различными методами, в том числе геодезическими, радарно-спутниковыми [9, 10], а также контроль за деформированием зданий.

Существуют различные методы, применяемые для деформационного мониторинга зданий. Но поскольку на подрабатываемых территориях основной причиной деформирования конструкций являются процессы иска-

✉gusev.g@icmm.ru
http://orcid.org/ 0000-0002-9072-0030
**epin.v@icmm.ru
http://orcid.org/ 0000-0001-5625-2678
***flower@icmm.ru
http://orcid.org/0000-0001-9617-407X

жения и осаживания земной поверхности, то их и необходимо контролировать с достаточной дискретностью в пространстве и времени. Неравномерные осадки фундаментов – одна из основных причин возникновения деформаций и повреждений зданий над горными выработками. Применяемые методы радарно-спутниковой интерферометрии и геодезические измерения не всегда способны обеспечивать нужную дискретность в пространстве и во времени. Так, спутниковые технологии позволяют контролировать оседания на значительных территориях, но наличие снежного покрова и растительности сильно ограничивает их применимость. Кроме этого, в настоящий момент предел точности метода составляет 10–15 мм [10], что недостаточно для контроля неравномерных осадок зданий.

Наземная геодезия обеспечивает лучшую точность, но достаточно трудоемка, поэтому измерения проводятся лишь в отдельных точках, плотность которых несопоставима со спутниковой интерферометрией. В связи с этим для контроля в режиме реального времени процессов неравномерных оседаний фундаментов зданий на них установлены системы, основанные на методе гидростатического нивелирования.

В данной статье кратко рассмотрены основные принципы работы систем гидростатического нивелирования, представлены результаты многолетних измерений, полученные для разных сооружений, а также проведено сопоставление результатов с данными, которые получены другими авторами.

Метод гидростатического нивелирования

Идея контроля вертикальных смещений конструкций с помощью метода гидростатического нивелирования [11] не нова. Ее применяют в настоящее время [12, 13] в случаях, когда отсутствует прямая видимость между местами расположения датчиков. Такие системы состоят из наполненных водой сообщающихся сосудов-датчиков, соединенных трубками-шлангами. При этом можно устанавливать любое количество датчиков с нужным пространственным разрешением. По закону Паскаля уровень свободной поверхности жидкости во всех сосудах устанавливается в одной плоскости, в которой и необходимо монтировать датчики. Перемещение по вертикали от данной плоскости с течением времени фиксируется датчиками. С учетом этого обстоятельства на фундаментах зданий и устанавливаются элементы системы гидронивелирования. Если технически нет такой возможности, то осуществляется монтаж нескольких независимых контуров, например, в случае расположения секций здания на разном уровне. Так как системы гидростатического нивелирования разных зданий никак не связаны друг с другом или с неосаживающимися (неподвижными) объектами, то осуществляется контроль неравномерных осадок только внутри самого здания. Их абсолютные вертикальные перемещения при такой схеме эксперимента не отслеживаются. Однако равномерное оседание конструкции как целого не меняет ее напряженно-деформированное состояние и в связи с этим не является для нее критичным. Практически неизвестны случаи, в которых достаточно протяженная конструкция оседала бы целиком, без искажений. Также необходимо учитывать, что на здания могут воздействовать и растягивающие/сжимающие усилия от грунтового массива основания, которые в данной статье не рассматриваются.

Для массовой эксплуатации в условиях подвалов городских зданий применялся наиболее простой и недорогой вариант измерительной системы, описанный в [14]. Регистрация данных с датчика, состоящего из жестко закрепленного на фундаменте кронштейна со стеклянной трубкой и линейной шкалой, производилась с помощью ip-камеры с невысоким разрешением 640 × 480 точек. Извлечение данных с собранных цифровых изображений об уровне жидкости в датчике осуществлялось при помощи алгоритмов, представленных в работе [15]. Установленная система обеспечивает измерения в диапазоне до 65–70 мм с дискретностью измерения в 0,2 мм и погрешностью около 1 мм. О факторах, влияющих на погрешность измерений, подробнее изложено в [11, 14]. При превышении осадок за указанный диапазон кронштейн перемещался по вертикали на фиксированную известную величину.

Данные измерений с каждой из систем передаются по каналам связи на центральный сервер, где хранятся и представляются по запросу с помощью Web-технологий. Таким образом, контролируются практически в online-режиме данные по изменению вертикальных перемещений. На основе этих данных можно видеть процесс эволюции разности осадок на датчиках зданий и оценивать скорости их изменения.

Для оценки процессов оседания разных конструкций представляет интерес не только разность осадок между датчиками в одном здании, но и ее относительная величина, которая определяется по формуле:

$$\beta_{i,j} = \frac{|U_i - U_j|}{L_{i,j}},$$

где U_i – вертикальные перемещения i-го датчика, мм; $L_{i,j}$ – расстояние между датчиками i и j, мм.

Относительная разность осадок представляет собой локальные изменения наклона фундамента в данном месте конструкции между датчиками. В СНиП 2.02.01–83. «Основания зданий и сооружений» регламентируются ее предельные значения для разных типов зданий. Так, например, для многоэтажных бескаркасных зданий с несущими стенами из кирпича это значение составляет 0,002. Также представляет интерес изменение среднего наклона здания со временем. Его оценка производится с помощью аппроксимации плоскостью поля вертикальных перемещений датчиков. Коэффициенты данной плоскости и определят средний наклон здания и его направление. Соотношение максимальной относительной разности осадок и среднего наклона может свидетельствовать о различии в деформировании зданий. Если эти величины близки друг к другу, это означает, что здание наклоняется однородно, когда, например, размер здания мал по сравнению с мульдой оседания. При этом максимальная относительная разность осадок может быть и несколько ниже среднего наклона, так как дискретно расположенные датчики не обязательно располагаются строго по линии максимального наклона. Значительное ее превышение над средним наклоном говорит о том, что здание наклоняется неоднородно и это может представлять опасность.

Объект исследования

На рис. 1 показана схема города, на которой выделены цветом здания, где были установлены системы мониторинга и осуществлялся контроль за их неравномер-

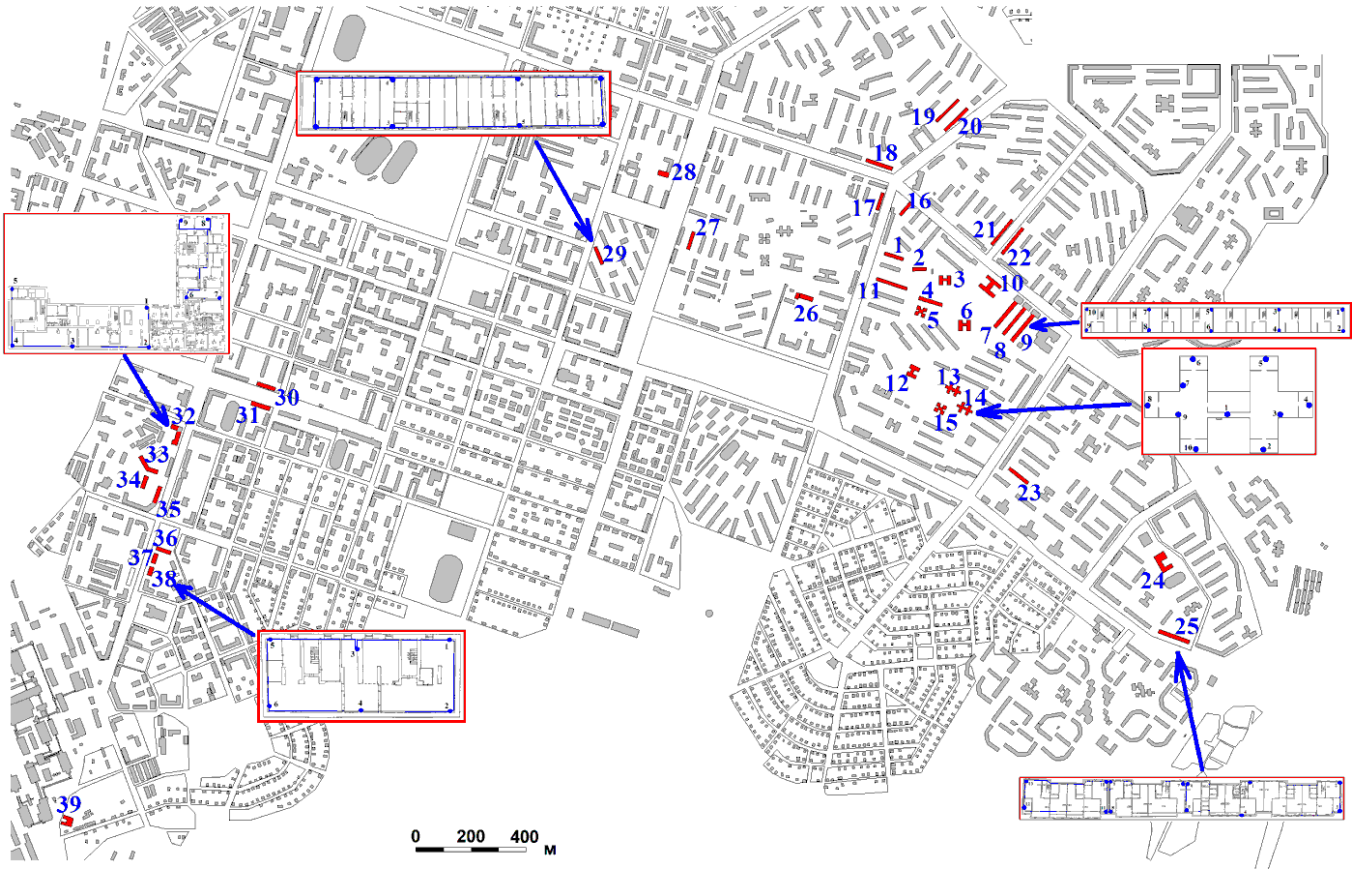

Рисунок. 1. Схема города с обозначенными зданиями, где осуществлялся контроль неравномерных осадок
Figure 1. Diagram of the city with marked buildings where uneven settlements were monitored

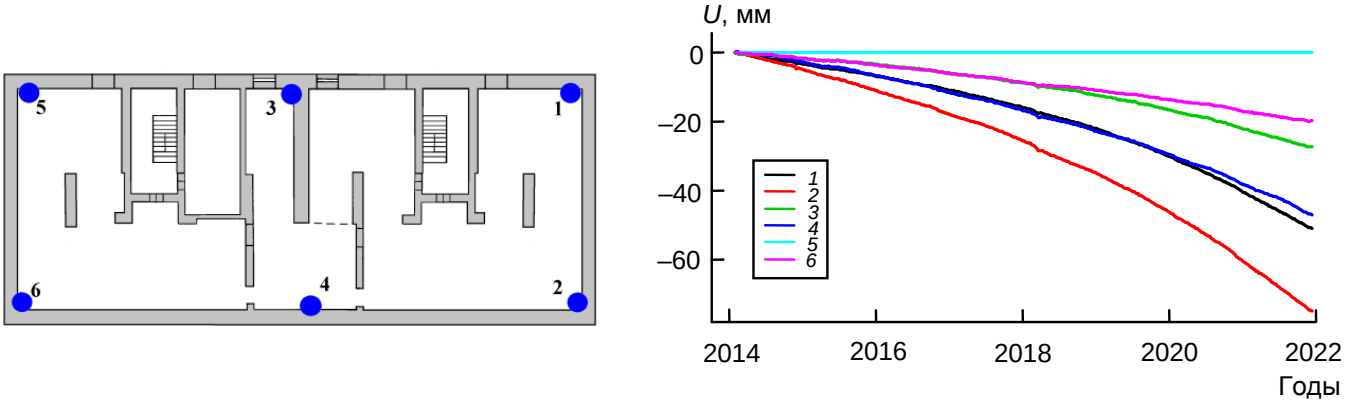

Рисунок 2. Расположение датчиков на фундаментах здания № 38 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчика *5* (справа)
Figure 2. The location of sensors on the foundations of building no. 38 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensor *5* (right)

ными оседаниями. В красных рамках показаны планы размещения датчиков на фундаментах некоторых зданий. Установка систем была начата осенью 2013 г., и весной 2014 г. большинство из них осуществляли регистрацию. К настоящему моменту времени мониторинг некоторых зданий прекращен в связи с их расселением и сносом. Отмеченные на схеме рис. 1 39 зданий расположены в разных частях города и представляют собой многоэтажные сооружения, построенные в разное время с применением различных технологий и материалов. В каждом из обозначенных зданий было установлено от 1 до 3 контуров системы гидронивелирования с количеством датчиков от 6 до 16. Выбор схем размещения датчиков был обусловлен особенностями конкретных подвальных помещений выбранных зданий.

Результаты мониторинга

В рамках одной статьи затруднительно представить данные по осаживанию всех указанных зданий, поэтому отметим главное. За 7–8 лет наблюдений практически на всех объектах наблюдались неравномерные осадки фундаментов, кроме зданий № 18, 19, 20, 23 и 28, где они были слабо выражены и поэтому в статье не приведены. Данные по неравномерным оседаниям зданий сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты неравномерного оседания зданий
Table 1. Results of uneven settlement of buildings

Номер объекта	Размеры (длина и ширина) частей здания, м	Количество датчиков (контуров)	Максимальная разность осадок, мм	Максимальная β, рад	Изменение наклона, рад	Время наблюдения, лет
1	72 x 13	6/1	18	0,00110	0,00087	8,5
2	50 x 12	8/1	26	0,00075	0,00065	8,0
3	36 x 43	11/1	27	0,00074	0,00061	8,0
4	90 x12	10/1	29	0,00048	0,00038	8,0
5	36 x 33	8/1	13	0,00033	0,00034	8,0
6	36 x 43	11/1	16	0,00046	0,00046	8,0
7	120 x 12	10/1	27	0,00038	0,00024	7,5
8	120 x 12	10/1	25	0,00035	0,00024	7,5
9	120 x 12	10/1	13	0,00025	0,00013	7,0
10	72 x 36 40 x 12	16/2	17 (контур 1) 4 (контур 2)	0,00046 0,00035	0,00032	8,0
11*	120 x 12	10/1	21	0,00040	0,00049	7,0
12	36 x 43	9/1	5	0,00010	0,00011	8,0
13	60 x 40	10/1	12	0,00021	0,00021	8,0
14	60 x 40	11/1	16	0,00029	0,00026	8,0
15	36 x 33	9/1	6	0,00020	0,00017	8,0
16*	60 x 12	6/1	15	0,00037	0,00026	6,5
17*	67 x 12	8/1	6	0,00011	0,00009	6,5
21	120 x 12	16/1	14	0,00021	0,00013	8,0
22*	120 x 12	16/1	18	0,00026	0,00017	6,5
24	67 x 42	10/1	16	0,00033	0,00022	8,0
25*	60 x 13 30 x 13 30 x 13	13/3	22 (контур 1) 14 (контур 2) 6 (контур 3)	0,00036 0,00046 0,00016	0,00040	7,5
26	55 x 15 18 x 23	13/2	15 (контур 1) 5 (контур 2)	0,00038 0,00040	0,00032	8,0
27	67 x 12	6/1	23	0,00039	0,00032	8,0
29*	67 x 12	8/1	24	0,00038	0,00037	7,0
30	72 x 13	7/1	24	0,00047	0,00040	8,5
31	60 x 13	8/1	17	0,00036	0,00031	8,0
32	46 x 19 26 x 13	9/2	24 (контур 1) 17 (контур 2)	0,00060 0,00066	0,00070	8,0
33	60 x 13 32 x 13	11/2	28 (контур 1) 19 (контур 2)	0,00055 0,00080	0,00049	1,5
34*	46 x 14	6/1	93	0,00300	0,00300	7,0
35	30 x 13 30 x 13	6/1	12	0,00025	0,00024	1,5
36	30 x 13	11/2	53 (контур 1) 50 (контур 2)	0,00150 0,00180	0,00180	8,5
37*	35 x 14	6/1	62	0,00250	0,00230	8,0
38*	35 x 14	6 /1	75	0,00270	0,00240	8,0
39	35 x 14	7/1	72	0,00500	0,00230	7,0

Примечание: *снесены к 2022 г.

Можно условно разделить объекты на группы по категориям оседаний: наиболее активные, средней и малой активности. Наиболее активное неравномерное оседание наблюдалось у зданий № 33–39, расположенных в левой части схемы на рис. 1. Средняя активность наблюдалась у зданий № 1–8, 9–11, 13–14, 16, 21–32. Далее приведем данные по неравномерному оседанию некоторых объектов.

Кирпичные трехэтажные здания № 38 и 37 имели размеры 35 на 14 м в плане. Расположение датчиков и эволюция неравномерного оседания датчиков относительно датчика № 5 показана на рис. 2. За 8 лет мониторинга наибольшее значение оседания зафиксировано между датчиками *2* и *5* (при расстоянии между ними 33 м) и составило 75 мм. При этом происходило постепенное увеличение скорости с 6 до 15 мм в год. В здании № 37 за 8 лет максимальная разность осадок между аналогичными датчиками составила 62 мм, также наблюдалось нарастание скорости неравномерного оседания. Максимальное значение относительной разности осадок у данных зданий близко к среднему наклону, что свидетельствовало об их однородном наклоне. В конце 2021 г. оба дома были расселены и снесены.

Здание № 34 представляет 5-этажную 4-подъездную панельную конструкцию длиной 60 м и шириной 13 м. Оно состоит из 2 секций по 30 м длиной в разных уровнях, в связи с этим были установлены 2 контура гидроуровня. Расположение датчиков показано на рис. 3 слева. За 8 лет наблюдений в здании были зафиксированы разности осадок, представленные на рис. 3. Для первого контура на датчиках *1–6* относительно датчика *6* наблюдается подъем,

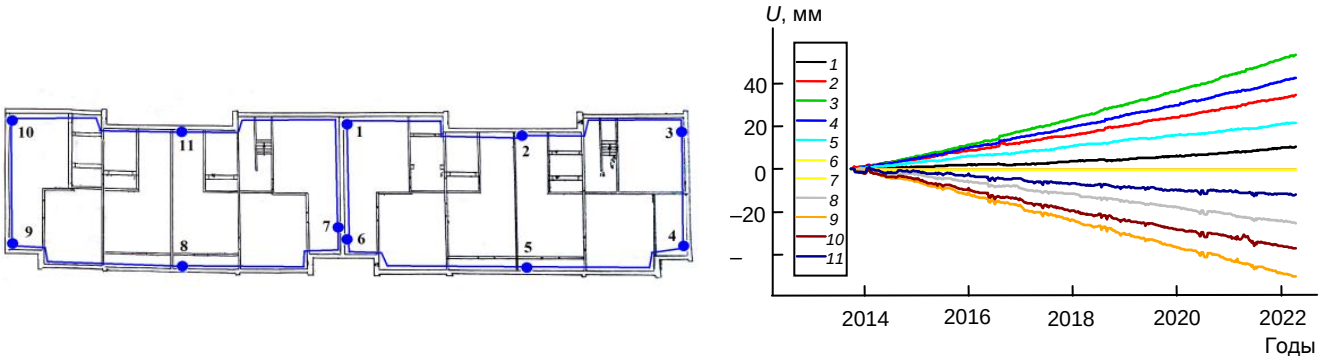

Рисунок 3. Расположение датчиков на фундаментах здания № 36 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчиков *6* и *7* (справа)
Figure 3. The location of the sensors on the foundations of building no. 36 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensors *6* and *7* (right)

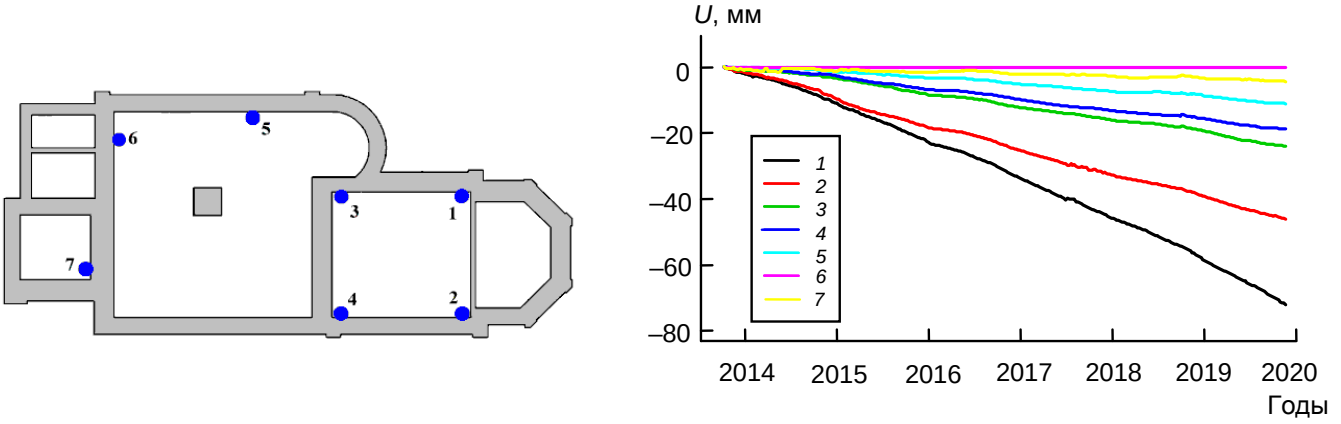

Рисунок 4. Расположение датчиков в здании № 39 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчика *6* (справа)
Figure 4. The location of the sensors in building no. 39 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensor *6* (right)

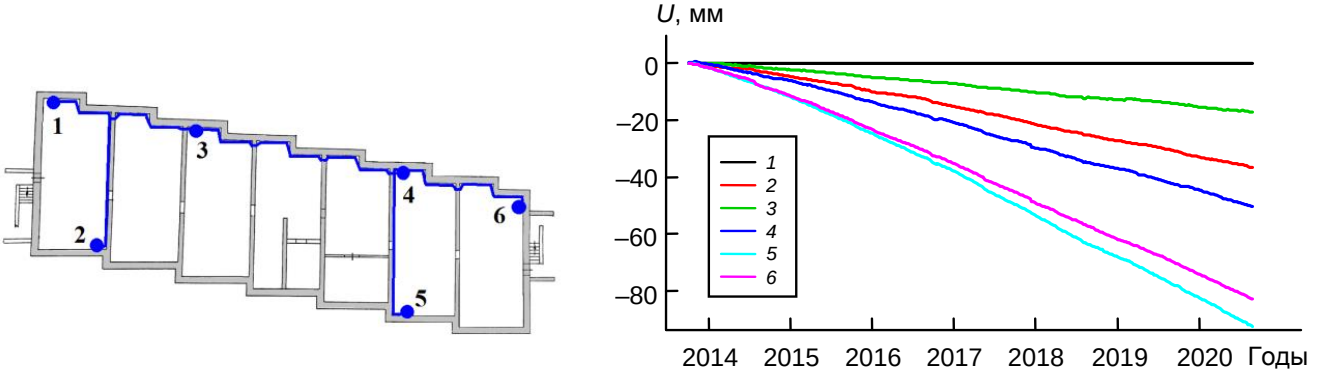

Рисунок 5. Расположение датчиков в здании № 34 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчика *1* (справа)
Figure 5. The location of the sensors in building no. 34 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensor *1* (right)

а на датчиках *7–11* второго контура наблюдается оседание относительно датчика *7*. Для удобства представления разности осадок значения соседних датчиков *6* и *7* были взяты за ноль. В реальности же происходит оседание всех датчиков, просто датчики *8–11* оседают сильнее, чем *7*, а датчик *6* оседает сильнее, чем *1–5*. Наибольшее значение разности осадок первого контура между датчиками *3* и *6* (при расстоянии между ними 32 м) за 8 лет составило 53 мм. При этом наблюдается увеличение скорости изменения данной величины с 5 до 8 мм в год. Во втором контуре наибольшее значение разности осадок составило 50 мм между датчиками *9* и *7* (при расстоянии между ними 30 м) при незначительном увеличении скорости с 5 до 6 мм в год. Наибольшая относительная разность осадок, достигшая значения 0,0018 за 8 лет, наблюдалась между датчиками *7–8*.

Здание, обозначенное на схеме номером 39, являлось храмом постройки XVIII в. длиной 35 м и шириной от 10 до 15 м. В здании установлен один контур системы гидронивелирования с 7 датчиками, расположение которых показано на рис. 4. За 6 лет наблюдений наибольшее значение разности осадок между датчиками *1* и *6* (при расстоянии между ними 23 м) составило 72 мм, при этом наблюдалось постепенное увеличение скорости неравномерного осаживания с 11 до 15 мм в год. Правая часть здания в районе датчиков *1* и *2* оседала значительно быстрее, чем его средняя и левая части, в связи с чем между датчиками *1–3* и *2–4* появлялись и росли многочисленные

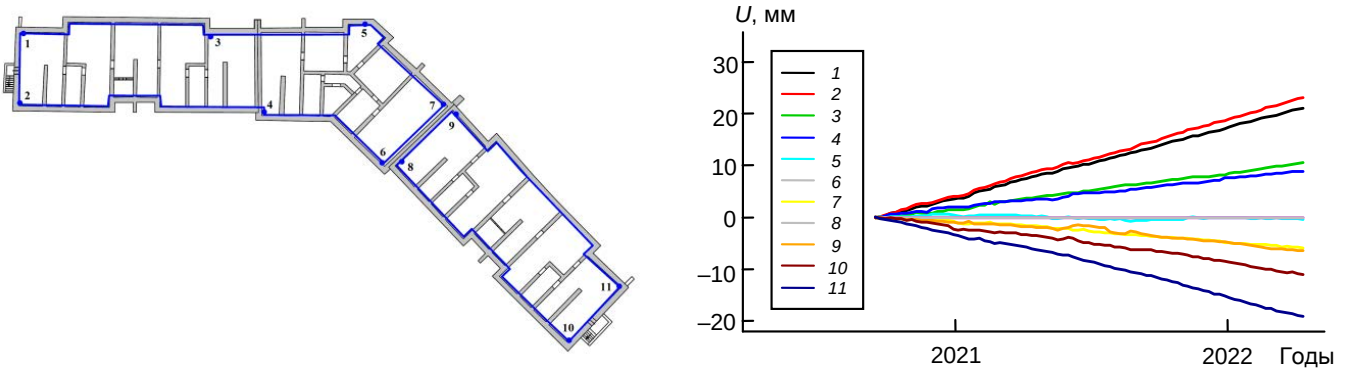

Рисунок 6. Расположение датчиков на фундаментах здания № 33 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчиков *6* и *8* (справа)
Figure 6. The location of the sensors on the foundations of building no. 33 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensors *6* and *8* (right)

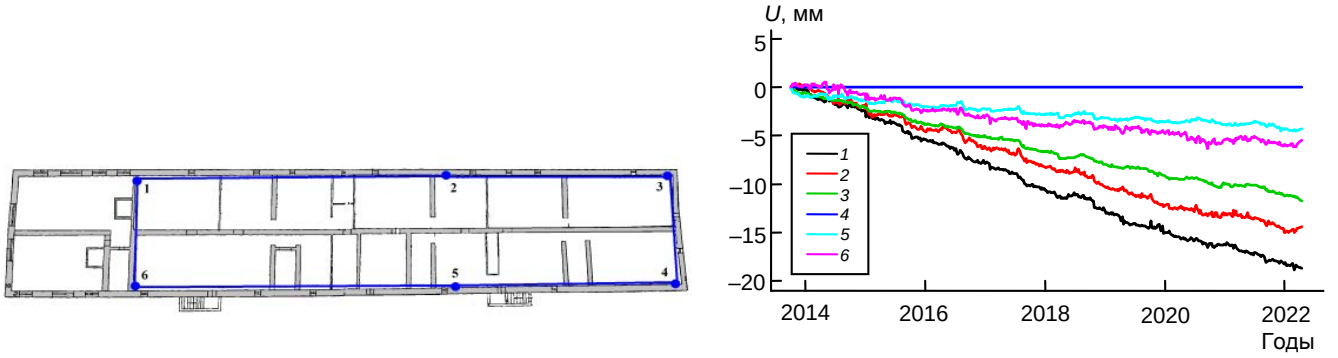

Рисунок 7. Расположение датчиков на фундаментах здания № 1 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчика *4* (справа)
Figure 7. The location of the sensors on the foundations of building no. 1 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensor *4* (right)

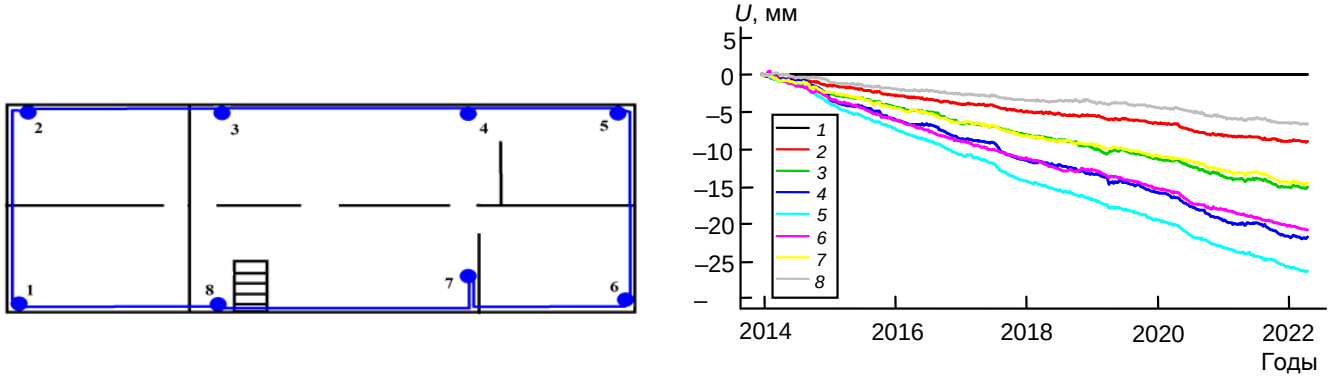

Рисунок 8. Расположение датчиков на фундаментах здания № 2 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчика *1* (справа)
Figure 8. The location of sensors on the foundations of building no. 2 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensor *1* (right)

трещины. Наибольшая относительная разность осадок, достигшая значения 0,005, наблюдалась как раз между датчиками *1–3*. С 2015 г. здание не эксплуатируется и находится в закрытой зоне, в начале 2020 г. оборудование было снято.

Здание, обозначенное на схеме номером 34, представляло собой пятиэтажную кирпичную конструкцию длиной 46 м и шириной секции 14 м. На фундаментах здания были установлены 6 датчиков, расположение которых показано на рис. 5. За 7 лет наблюдений в здании было зафиксировано самое высокое значение разности осадок из наблюдаемых зданий. Оно составило 93 мм между датчиками *1* и *5* (при расстоянии между ними 40 м). При этом наблюдалось постепенное увеличение скорости с 10 до 15 мм в год. Наибольшая относительная разность осадок между датчиками *4* и *5* достигла значения 0,003, что близко к оценке среднего наклона. Осенью 2020 г. здание было расселено и снесено, в связи с чем был организован мониторинг соседнего здания, обозначенного на схеме № 33.

Здание, обозначенное на схеме номером 33, представляет собой пятиэтажную кирпичную конструкцию, состоящую из нескольких секций, соединенных под углом. В подвале здания установлено 2 контура гидроуровня с 7 и 4 датчиками соответственно, расположение которых

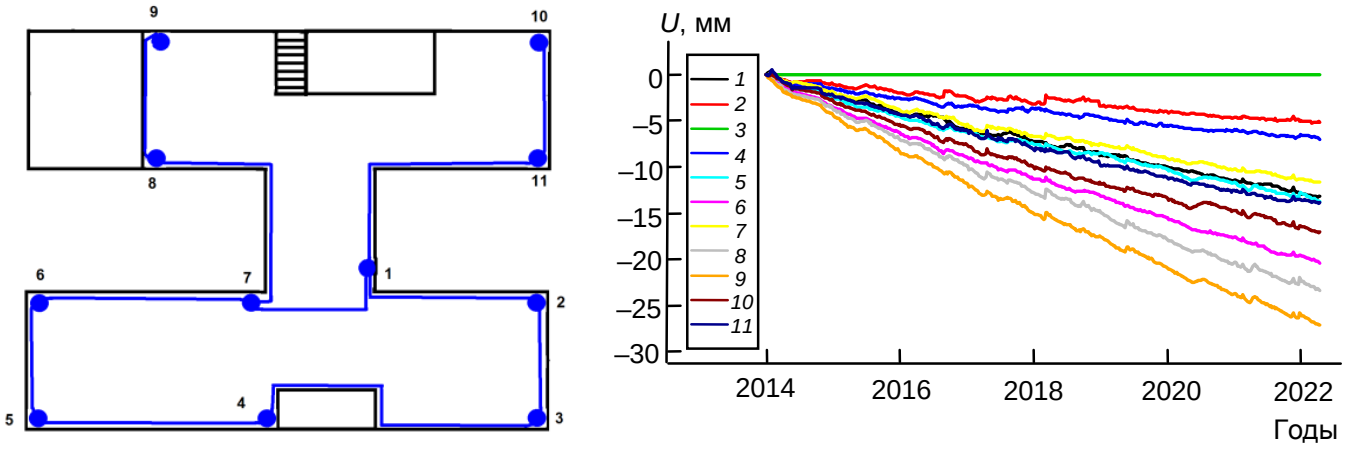

Рисунок 9. Расположение датчиков на фундаментах здания № 2 (слева) и эволюция разности осадок относительно датчика *1* (справа)
Figure 9. The location of sensors on the foundations of building no. 2 (left) and the evolution of the difference in settlement relative to sensor *1* (right)

показано на рис. 6 (слева). За полтора года наблюдений в здании были зафиксированы разности осадок, представленные на рис. 6 справа. В первом контуре наибольшее значение разности осадок между датчиками *2* и *7* (расстояние между ними 55 м) составило 28 мм при скорости 18–19 мм в год. Во втором контуре – 19 мм при скорости 12 мм в год между датчиками *8* и *11* (расстояние между ними 31 м). Наибольшая относительная разность осадок, зафиксированная в первом контуре между датчиками *6–7*, достигла значения 0,00055, во втором контуре между датчиками *10–11* – 0,00080. Это свидетельствует о том, что правая часть здания (согласно схеме) оседает более неравномерно и, по всей видимости, быстрее.

На соседних зданиях № 35 и 32 также фиксируются оседания с несколько меньшими значениями относительной разности осадок: 0,00025 за полтора года и 0,00066 за 8 лет наблюдений соответственно. Расположенные дальше здания № 30 и 31 демонстрируют еще меньшие значения относительной разности осадок – 0,00047 и 0,00036 за 8 лет наблюдений. При этом наблюдается тенденция к небольшому снижению скорости неравномерной осадки со временем.

Приведем еще результаты по оседанию зданий из средней категории активности, расположенных в других частях города.

Здание, обозначенное на схеме номером 1, представляло собой пятиэтажную кирпичную конструкцию длиной 70 м и шириной 13 м. Схема размещения датчиков показана слева на рис. 7. За восемь с половиной лет наблюдений в здании были зафиксированы неравномерные осадки, представленные на рис. 7 справа. Наибольшая разность осадок между датчиками *1* и *4* (при расстоянии между ними 59 м) составила 18 мм при скорости около 2–2,5 мм в год. Наибольшая относительная разность осадок между датчиками *1–6* достигла значения 0,0011, что несколько выше оценки изменения среднего наклона.

Здание, обозначенное на схеме номером 2, представляет собой двухэтажную кирпичную конструкцию длиной 49 м и шириной 12 м. В подвале здания установлены 8 датчиков, расположение которых показано на рис. 8 слева. За восемь лет наблюдений в здании были зафиксированы неравномерные осадки, представленные справа на рис. 8. Наибольшее значение разности осадок между датчиками *1* и *5* (при расстоянии между ними 51 м), происходивших со средней скоростью около 3 мм в год, за восемь лет составило 26 мм. Наибольшая относительная разность осадок между датчиками *1–2* достигла значения 0,00075.

Здание, обозначенное на схеме номером 3, представляет собой двухэтажную панельную конструкцию Н-образной формы, состоящую из 2 одинаковых секций и перемычки между ними. Длина секции составляет 35 м, ширина – 13 м, длина перемычки 15 м. В подвале здания установлены 11 датчиков, расположение которых показано на рис. 9 слева. За 8 лет наблюдений в здании были зафиксированы неравномерные осадки. Наибольшее значение разности осадок между датчиками *3* и *9* (при расстоянии между ними 51 м), происходивших со средней скоростью около 3–3,5 мм/год с тенденцией к небольшому снижению, составило 27 мм. Наибольшая относительная разность осадок между датчиками *1–2* достигла значения 0,00074.

Анализируя представленные ранее эволюционные зависимости, можно отметить, что процессы неравномерного оседания зданий в активной зоне происходят практически непрерывным образом. На ряде объектов (№ 33, 37–39) со временем наблюдалось увеличение скорости неравномерного оседания. Но на большинстве зданий скорость неравномерного оседания (если считать за год) за время мониторинга несильно изменялась. Наблюдаемая в некоторых случаях негладкость эволюционных кривых обусловлена измерительной погрешностью, вызванной резкими температурными перепадами, высыханием и подливанием жидкости, локальным промерзанием трубки, намеренными порывами трубки и другими несанкционированными воздействиями на измерительную систему. Принимая во внимание тот факт, что компоненты системы находятся не в лабораторных условиях, восьмилетний опыт работы можно считать положительным. С учетом доступности комплектующих возможно широкое тиражирование подобных систем и для других осаживающихся по разным причинам сооружений.

Результаты, представленные в работе, согласуются с данными измерений, полученными другими авторами и с помощью других методик. Так, например, в работе [8]

представлены карты изменений высот измерительных пунктов в квартале около зданий № 32–36 с 2016 по 2020 г. В работе [9] на основе спутниковой интерферометрии приведены результаты оседаний наиболее активной зоны, в которой расположены в том числе здания № 30–39, за период с 2011 по 2014 г. и в 2016–2020 гг. А в работе [10] приведены годовые (за 2020 г.) скорости оседаний поверхности в основных районах города. Поскольку точность методик, используемых в статьях [9, 10], ниже, то эффективные сравнения можно проводить при высоком уровне оседаний, происходящих, как правило, на большом временном интервале.

Заключение

Для контроля неравномерных оседаний земной поверхности и конструкций, происходящих в результате затопления калийного рудника, были установлены специально адаптированные для этого системы гидростатического нивелирования на более чем 35 зданиях. Происходящие неравномерные осадки фундаментов в автоматическом режиме регистрировались на протяжении 8 лет. Анализ эволюционных кривых неравномерного оседания позволяет определить как характер деформационных процессов, так и его скорость, замедление которой практически не наблюдается. Это позволяет прогнозировать развитие процессов оседаний на краткосрочный период.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер темы АААА-А19-19012290100-8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ma F. S., Zhao H. J., Yuan R. M., Guo J. Ground movement resulting from underground back fill mining in a nickel mine (Gansu Province, China) // Natural Hazards. 2015. Vol. 77. P. 1475–1490. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1513-9
2. Tajdus K., Sroka A., Misa R., Hager S., Rusek J., Dudek M., Wollnik F. Analysis of Mining-Induced Delayed Surface Subsidence // Minerals. 2021. Vol. 11. Article number 1187. https://doi.org/10.3390/min11111187
3. Барях А. А., Красноштейн А. Е., Санфиров И. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2009. № 2. С. 40–49.
4. Барях А. А., Санфиров И. А., Дягилев Р. А. Мониторинг последствий затопления калийного рудника // Горный журнал. 2013. № 6. С. 34–39.
5. Шулаков Д. Ю., Бутырин П. Г., Верхоланцев А. В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горный журнал. 2018. № 6. С. 25–29. https://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.05
6. Никифоров В. В. Результаты мониторинга гидрогеологических параметров контролируемой территории г. Березники // Горное эхо. 2019. № 4 (77). С. 78–85. https://doi.org/10.7242/echo.2019.4.18
7. Бычков С. Г., Простолупов Г. В., Щербинина Г. П. Выявление потенциально опасных участков на Верхнекамском месторождении калийных солей по гравиметрическим данным // Геофизика. 2021. № 5. С. 29–35.
8. Симанов А. А. Мониторинговые наблюдения на гравиметрическом полигоне в г. Березники // Горное эхо. 2021. № 1 (82). С. 95–99. https://doi.org/10.7242/echo.2021.1.17
9. Samsonov S., Baryakh A. Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Article number 3215. https://doi.org/10.3390/rs12193215
10. Бабаянц И. П., Барях А. А., Волкова М. С., Михайлов В. О., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А. Мониторинг оседаний на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии. I. Дифференциальная интерферометрия // Геофизические исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 73–89. https://doi.org/10.21455/gr2021.4-5
11. Pellissier P. F. Hydrostatic Leveling Systems // IEEE Transactions. 1965. Vol. 12(3). P. 19–20. https://doi.org/10.1109/TNS.1965.4323587
12. Medvedev G. M., Khoteev E. A. Experience in effective changing of the tunneling parameters according to the data of automated hydrostatic levels to minimize the impact on the operating section of the Moscow Metro (from the experience of the organization) // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1928. Article number 012048. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012048
13. Yi Z., Jinshen G., Xu W. Intelligent settlement monitoring system of high-speed railway bridge // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2019. Vol. 9. P. 307–323. https://doi.org/10.1007/s13349-019-00334-x
14. Епин В. В., Цветков Р. В., Шардаков И. Н. Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 3. С. 21–28. https://doi.org/10.5862/MCE.55.3
15. Epin V. V., Tsvetkov R. V., Shestakov A. P. Application of feature recognition to hydrostatic leveling systems // Measurement Techniques. Vol. 59(4). 2016. P. 405–409. https://doi.org/10.1007/s11018-016-0980-7

Статья поступила в редакцию 05 мая 2022 года

УДК 53.082.2 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-80-89

The results of long-term observations of uneven settlements of buildings located on the territory of the Verkhnekamskoye potash deposit in Berezniki

Georgiy Nikolaevich GUSEV*
Valeriy Valer'evich EPIN**
Roman Valer'evich TSVETKOV***

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of RAS, Perm, Russia

Abstract

The relevance of the work. The accidental flooding of the potash mine in Berezniki accelerated the settlement of the earth's surface, along with the buildings located on it. Control over the uneven settlement of buildings with the help of geodetic monitoring and differential satellite interferometry is not always able to provide the necessary discreteness in space and time.

The purpose of the work – organization of monitoring of uneven settlements of buildings located above a flooded mine, long-term data collection, analysis of measurement results.

Research methods. The measurement of uneven settlements of buildings is organized using systems based on the hydrostatic leveling method. They consist of water-filled communicating sensor vessels. Their number may vary to provide the desired spatial resolution.

Research results. Hydrostatic levels were installed inside the basements of more than 35 city buildings. As a result of monitoring observations since 2014, evolutions of uneven settlements of these buildings have been obtained, which make it possible to determine both the nature of deformation processes and their speed. Estimates of the maximum relative difference in settlements and changes in the average slope for buildings were made. It has been established that uneven settlements of buildings occur almost continuously at a rate close to constant, except for a part of the buildings, where an increase in the rate of the deformation process was observed over time. During the observation period, some of the buildings were demolished.

Conclusions. The hydrostatic leveling systems installed in the buildings have demonstrated their operability and have made it possible to almost continuously control the ongoing processes of uneven settlement of buildings. It is possible to replicate such systems for other structures that are settling down for various reasons.

Keywords: potash mine, settlement monitoring, uneven settlement, long-term measurements, hydrostatic leveling system

The work was carried out within the framework of the state assignment (subject number AAAA-A19-19012290100-8).

REFERENCES

1. Ma F. S., Zhao H. J., Yuan R. M., Guo J. 2015, Ground movement resulting from underground back fill mining in a nickel mine (Gansu Province, China). *Natural Hazards*, vol. 77, pp. 1475–1490. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1513-9
2. Tajdus K., Sroka A., Misa R., Hager S., Rusek J., Dudek M., Wollnik F. 2021, Analysis of Mining-Induced Delayed Surface Subsidence. *Minerals*, vol. 11, article number 1187. https://doi.org/10.3390/min11111187
3. Baryakh A. A., Krasnoshtein A. E., Sanfirov I. A. 2009, Mining-caused accidents: Berezniki Potash Mine-1 flooding. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra*, no. 2, pp. 40–49. (*In Russ.*)
4. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Dyagilev R. N. 2013, Monitoring the consequences of flooding a potash mine. *Gorniy Zhurnal* [Mining Journal], no. 6, pp. 34–39. (*In Russ.*)
5. Shulakov D. Yu, Butyrin P. G., Verkholantsev A. V. 2018, Seismological monitoring at the Upper Kama Potash Deposit: Objectives, problems, solutions. *Gorniy Zhurnal* [Mining Journal], no. 6, pp. 25–29. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.05
6. Nikiforov V. V. 2019, Monitoring results of hydrogeological parameters of the controlled territory of Berezniki city. *Gornoe echo*, no. 4 (77). pp. 78–85. (*In Russ.*) https://doi.org/10.7242/echo.2019.4.18
7. Bychkov S. G., Prostolupov G. V., Sherbinina G. P. 2021, Identification of potentially hazardous areas at the Upper Kama Potash salt deposit according to gravimetric data. *Geofizika* [Geophysics], no 5. pp. 29–35. (*In Russ.*)
8. Simanov A. A. 2021, Monitoring observations at gravimetric polygon in Berezniki city. *Gornoe echo*, no. 1 (82). pp. 95–99. (*In Russ.*) https://doi.org/10.7242/echo.2021.1.17
9. Samsonov S., Baryakh A. 2020, Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry. *Remote Sensing*, vol. 12, article number 3215. https://doi.org/10.3390/rs12193215

✉gusev.g@icmm.ru
http://orcid.org/ 0000-0002-9072-0030
**epin.v@icmm.ru
http://orcid.org/ 0000-0001-5625-2678
***flower@icmm.ru
http://orcid.org/0000-0001-9617-407X

10. Babayantz I. P., Baryakh A. A, Volkova M. S., Mikhailov V. O., Timoshkina E. P., Khairetdinov S. A. 2021, Monitoring of subsidence in Berezniki (Perm region) by SAR interferometry. I. Differential interferometry. *Geofizicheskie issledovania*, vol. 22, no. 4, pp. 73–89. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21455/gr2021.4-5
11. Pellissier P. F. 1965, Hydrostatic Leveling Systems. *IEEE Transactions*, vol. 12(3), pp. 19–20. https://doi.org/10.1109/TNS.1965.4323587
12. Medvedev G. M., Khoteev E. A. 2021, Experience in effective changing of the tunneling parameters according to the data of automated hydrostatic levels to minimize the impact on the operating section of the Moscow Metro (from the experience of the organization). *Journal of Physics: Conference Series*, vol.1928, article number 012048. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012048
13. Yi Z., Jinshen G., Xu W. 2019, Intelligent settlement monitoring system of high-speed railway bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 9, pp. 307–323. https://doi.org/10.1007/s13349-019-00334-x
14. Epin V. V., Tsvetkov R. V., Shardakov I. N. 2015, Deformation monitoring of building foundations by hydrostatic leveling. *Magazine of Civil Engineering*, no. 3, pp. 21–28. https://doi.org/10.5862/MCE.55.3
15. Epin V. V., Tsvetkov R. V., Shestakov A. P. 2016, Application of feature recognition to hydrostatic leveling systems. *Measurement Techniques*, vol. 59(4), pp. 405–409. https://doi.org/10.1007/s11018-016-0980-7

The article was received on May 05, 2022