

УДК 69.058

Н. В. Дорофеев^а, О. Р. Кузичкин^б, А. В. Греченева^б, Р. В. Романов^а

^а *Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых*

^б *Белгородский государственный национальный исследовательский университет*

ПРОВЕДЕНИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Работа выполнена по гранту Минобрнауки России № 5.3606.2017/ПЧ

Рассматривается вопрос повышения качества геотехнического мониторинга на территориях с активными карстово-суффозионными процессами. Геодинамический контроль осуществляется на эквипотенциальной геоэлектрической установке, акселерометрические измерения — на основе фазометрического принципа контроля. Рассматриваемый метод позволяет повысить устойчивость системы геотехнического мониторинга к климатическим и вибрационным помехам, повысить точность измерений.

Ключевые слова: геотехнический контроль, мониторинг, карстовые процессы, осадка сооружений, акселерометр, эквипотенциальная электроустановка.

Строительство и эксплуатация зданий и сооружений в карстовых районах осложнено повышенной вероятностью техногенной активизации карстовых процессов. Характерной особенностью этих процессов является появление под объектами карстовых полостей и образования провалов. Причем это часто происходит при условии, что к моменту начала строительства геологические изыскания свидетельствуют об отсутствии карстовых полостей под сооружением, однако при эксплуатации возможны условия их появления и роста [1—2]. Техногенная активизация карстовых процессов приводит к вероятности больших деформаций грунта под сооружениями и, соответственно, к разрушению фундамента сооружения с последующими катастрофическими последствиями [3].

Выявлением начальной стадии активизации необратимых деформационных процессов в сооружениях от воздействия карста является совместная обработка данных деформационных измерений в отдельных элементах сооружений и данных геодинамического мониторинга грунта под сооружением (СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве»). На основе анализа результатов совместной геотехнической обработки данных возможно выделить особенности взаимодействия в комплексе «грунтовое основание — фундамент — сооружение» и спрогнозировать его дальнейшее поведение в условиях развития карстовых процессов. Сложность применения такого подхода заключается в необходимости разработки математической модели деформационных процессов, включающей определение контролируемых деформационных параметров сооружения и функции влияния на них геодинамических карстовых вариаций в грунтовом основании сооружения. Применение современных акселерометрических систем для регистрации деформационных параметров сооружения позволяет с высокой точностью и детальностью определить

закономерности деформационного состояния сооружения [4]. Однако в практике построения деформационного прогноза вызывает сложность определение модельных параметров влияния геодинамической активности в грунтовом основании сооружения на деформационные параметры сооружения в целом.

Организация деформационного мониторинга на основе акселерометрических измерений. Деформационный мониторинг предполагает регистрацию углов поворота несущих конструкций и просадок фундамента объекта контроля. Одним из перспективных направлений построения систем деформационного мониторинга зданий и сооружений является использование акселерометрических инклинометров [5]. Однако разрешающая способность акселерометрических инклинометров при их использовании в системах деформационного мониторинга ограничена стабильностью коэффициента чувствительности акселерометрической базы и устойчивостью к вибрационным воздействиям [6]. Проблему температурной стабильности решают применением алгоритмов температурной коррекции, для этого в акселерометры встраивают датчики температуры [7]. Кроме того, существует риск появления погрешности, обусловленной операцией деления на малую величину, в ходе тригонометрического преобразования арктангенса [8].

Одним из решений данной проблемы является применение фазометрического метода. Реализация фазометрического метода измерения угла поворота в системах инклинометрического контроля строится на алгоритме сбора динамических данных, который основан на непосредственном преобразовании сигналов с акселерометров в фазу синусоидального колебания [9], посредством умножения сигналов $a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}, b_{x2}, b_{y2}, b_{z2}$ на сигналы $\sin \cdot \omega t$ и $\cos \cdot \omega t$ квадратурного генератора (КГ) с частотой, кратной частоте опорного генератора (ОГ) (рис. 1).

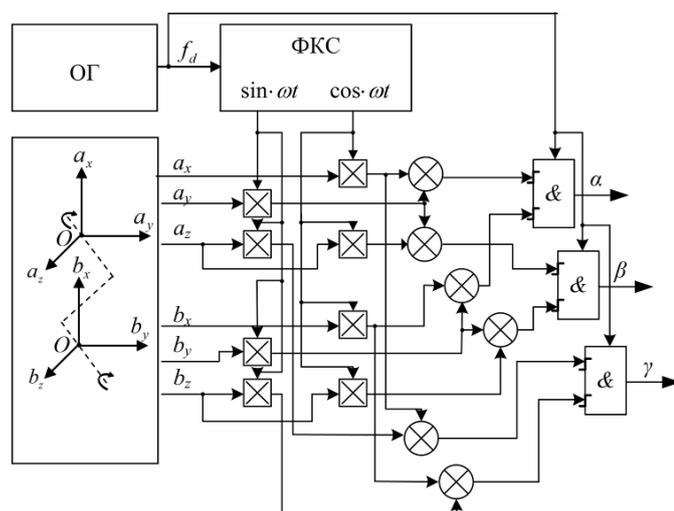


Рис. 1. Фазометрический метод гониометрического акселерометрического контроля

В соответствии с данным методом угол поворота в инклинометре определяется разностью фаз измеряемого и опорного сигнала. Следовательно, в результате суммирования полученных гармонических сигналов на выходе

формируются сигналы, пропорциональные углам α , β , γ наклона объекта контроля [10].

На рис. 2 схематично представлен принцип осуществления деформационного мониторинга фундамента здания с использованием десяти датчиков-инклинометров с применением акселерометрических преобразователей и алгоритма фазометрического метода формирования сигнала.

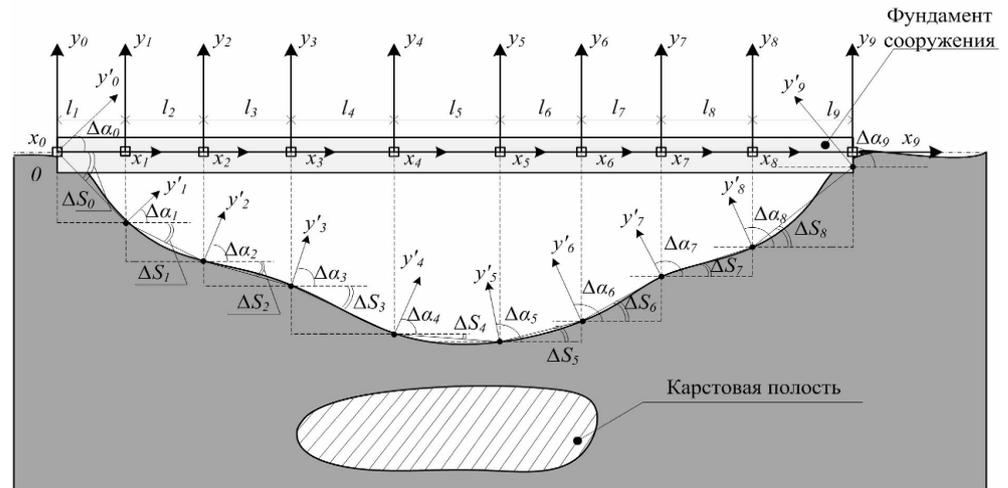


Рис. 2. Принцип деформационного мониторинга фундамента здания с применением акселерометрических преобразователей

На данном рисунке условно показано изменение просадки фундамента ΔS_i над предполагаемой карстовой полостью, которая регистрируется одновременно с изменениями угла наклона $\Delta \alpha_i$ частей фундамента $\{x_i, y_i\} \rightarrow \{x'_i, y'_i\}$ в контрольных точках. Отличительной особенностью рассматриваемого метода является то, что он позволяет регистрировать угловые девиации фундамента одновременно с его осадкой в контрольных точках. При этом:

$$S_n = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \quad \alpha_n = \alpha_0 + \Delta \alpha_n, \quad (1)$$

где α_0 — угол поворота опорного базиса, $\Delta S_i = l_i \sin \Delta \alpha_i$.

Методика оценки устойчивости на основе обработки геодинамических данных. Для получения качественной прогнозной оценки поведения фундамента сооружения при наличии карстовой полости под объектом деформационного контроля необходим совместный анализ данных о текущих геодинамических изменениях карстового процесса и динамики параметров контроля деформационного мониторинга [11]. При этом в качестве геодинамических данных могут использоваться данные режимных геоэлектрических наблюдений на основе эквипотенциальных электроразведочных методов [12]. Обычно процесс провалообразования, вызванный обрушением дисперсных пород, происходит над суффозионными полостями в результате их роста и является результатом подземной эрозии. Однако в случае наличия полости

под фундаментом сооружения ситуация осложнена дополнительной нагрузкой на грунт и возможными дополнительными техногенными воздействиями [13]. В этом случае при отсутствии в дисперсных породах водоносных слоев критическая величина полуширины суффозионной полости R_z может быть определена в соответствии со следующим соотношением [14]:

$$R_z = zB_z(\varphi_z) + 2c_z/(\gamma_z + \gamma_F(s)), \quad (2)$$

где z — глубина верхней точки суффозионной полости; φ_z — угол внутреннего трения; c_z — удельное сцепление; γ_z — удельный вес пород; γ_F — удельный вес фундамента с учетом осадки s ; $B_z(\varphi_z)$ — функция, определяющая боковое давление. Для радиальной суффозионной полости:

$$B_z(\varphi_z) = \frac{1 - \sin \varphi_z}{1 + \sin \varphi_z} \operatorname{tg} \varphi_z.$$

С точки зрения использования геоэлектрических методов контроля в мониторинговых исследованиях необходимо установить соответствие между пространственными функциями в уравнении для передаточной функции геоэлектрического разреза и геомеханическими условиями локального провалообразования (2). Данное соответствие может быть установлено из рассмотрения задачи о распределении геоэлектрического поля точечного источника поля в присутствии сферической неоднородности, которую в первом приближении можно представить как суффозионный процесс [15].

Общее уравнение для потенциалов электрического поля в присутствии приповерхностной неоднородности в виде шара может быть сведено к уравнению *Лежандра*, и его решение имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}(r, \theta) &= \frac{\dot{I}\dot{\rho}_1}{4\pi d} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{d}\right)^n P_n(\cos \theta) + \sum_{n=0}^{\infty} A_n r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta), \\ A_n &= \frac{\dot{I}\dot{\rho}_1}{4\pi} \dot{K}(j\omega) \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_n(\cos \theta)$ — полином Лежандра.

Коэффициент A_n определяется граничными условиями и пространственными параметрами приповерхностной неоднородности: расстоянием от точки зондирования до центра неоднородности d , дирекционным углом θ и радиусом шара a .

Соотношения (3) позволяют решить задачу определения характеристик залегания шара по наблюдаемым искажениям, вносимым им в пространственное распределение потенциала геоэлектрического поля. С учетом удвоения аномальной составляющей поля передаточная функция, определяющая пространственное смещение эквипотенциальных линий i -го источника для j -пары наблюдений, может быть записана в следующем виде:

$$\Delta H_{ij}(p, a, h) = K(p)\Psi_{ij}(a, h) = 2K(p) \frac{a^3 r_{ij}}{(r_{ij}^2 + h^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где $h = z + a$ — глубина залегания шара под поверхностью земли; $p = j\omega$ — оператор Лапласа.

На основании соотношения (4) можно провести оценку изменения глубины залегания и размеров карстовой полости на основании оценки смещения эквипотенциальных линий:

$$R_z^* = \sqrt[3]{\frac{3\sqrt{3}\Delta\hat{H}h^2}{2\|K(p)\|}}, \quad (5)$$

где $\Delta\hat{H}$ — максимальное оценочное значение смещения эквипотенциальной линии.

В качестве оценочного параметра может быть использована относительная величина по запасу устойчивости карстовой полости к расчетному предельному значению ее размера:

$$\Delta_R = \frac{1,21\sqrt[3]{\Delta\hat{H}h^2 / \|K(j\omega)\|}}{zB_z(\varphi_z) + 2c_z / (\gamma_z + \gamma_F(s))}. \quad (6)$$

В соответствии с вышеизложенной методикой вероятность образования провала может быть определена на основании анализа временных рядов геодеформационного мониторинга здания и электроразведочных данных геодинамического контроля.

Описание объекта геотехнического мониторинга. Объектом исследований с применением вышеизложенной методики являлась конструкция отдельно стоящего двухэтажного трехсекционного здания жилого кирпичного дома. Рельеф участка застройки спокойный, планировка приближается к горизонтальной. Здание двухэтажное, прямоугольное в плане, с подвальным этажом и с чердачным помещением. Высота подвального этажа (от пола до потолка) — 1500 м. Высота первого и второго этажей (от пола до потолка) — 2700 м. Генеральные размеры здания — 46 900 × 12 000 м (рис. 3). Максимальная высота здания от уровня планировки — 9700 м. По конструктивной системе здание данного жилого дома относится к стеновым зданиям. Конструктивная схема здания — бескаркасная продольно-стеновая. Вертикальные несущие конструкции — кирпичные стены (от отм. -0,800 до отм. +6300); горизонтальные несущие конструкции — сборные железобетонные плиты перекрытия (перекрытие подвального, первого и второго этажей).



Рис. 3. Общий вид исследуемого здания

Выбор объекта применения деформационного мониторинга связано в связи с образованием в грунтовом основании дома двух карстовых воронок (рис. 4), проявившихся в подвальном помещении.



Рис. 4. Карстовые провалы в подвале дома

Естественным основанием под фундаменты, по результатам визуального обследования, служит суглинок серовато-коричневый, желтовато-коричневый, твердый — тугопластичный. В момент обследования в помещениях подвального этажа обнаружены скопления воды и воронки в грунтовом основании глубиной до 750 мм и площадью до 16 м² с вероятным образованием в результате суффозионно-карстового провала.

В результате начального визуального осмотра выявлено, что стена здания имеет просадку до 103 мм. Просадка фундаментов неравномерная. Относительная разность осадок превышает предельно допустимое значение (коэффициент использования — 1,25) по приложению 4 СНиП 2.02.01-83* «Основания зданий и сооружений».

Таблица 1

Фактические деформации грунтов основания и фундаментов

Здание, сооружение, участок	Вид деформации	Деформации оснований, мм		Коэффициент использования
		Фактические	Предельно допустимые	
Стена	Относительная разность осадок $\frac{\Delta s}{L}$	$\frac{103}{40990} = 0,0025$	0,0020	1,25

Кроме того, были обнаружены визуально определяемые деформационные разрушения здания, расположенные в середине здания (рис. 5).

Методика регистрации и результаты экспериментальных исследований. Для определения деформационных прогнозных оценок была развернута система геотехнического мониторинга, включающая десятикомпонентную измерительную систему деформационного контроля на основе акселерометрических инклинометров. Достоинствами этой измерительной системы являются: простота применения и возможность обеспечения требуемой точ-

ности измерений. В данном случае для рассматриваемого жилого дома оценка погрешности акселерометрического инклинометра составила ($\pm 0,01^\circ$), и, соответственно, точность регистрации осадки фундамента — ($\pm 0,1$ мм). Геоэлектрический контроль осуществлялся двухполюсной эквипотенциальной электроустановкой с частотой зондирования 78 Гц и базой 20 м, расположенной вдоль расположения акселерометрических датчиков. На рис. 6 представлена схема размещения акселерометрических датчиков и эквипотенциальной электроустановки в подвале здания.



Рис. 5. Визуальные деформационные разрушения здания: *а* — вертикальные, горизонтальные и наклонные сквозные трещины в наружных кирпичных стенах здания с шириной раскрытия до 18 мм; *б, в* — деформации и просадки фундаментов здания в результате образования пустот (глубиной до 250 мм) в грунтовом основании под сборными железобетонными плитами ленточного фундамента; *г* — вертикальные и наклонные сквозные трещины во внутренних кирпичных стенах здания с шириной раскрытия до 16 мм

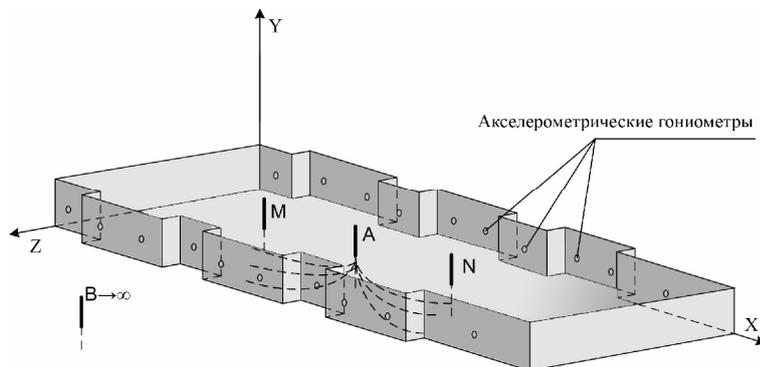


Рис. 6. Схема размещения системы измерения неравномерности осадок фундамента

На рис. 7 представлены распределения величин осадок вдоль периметра фундаментов в момент начала мониторинговых наблюдений.

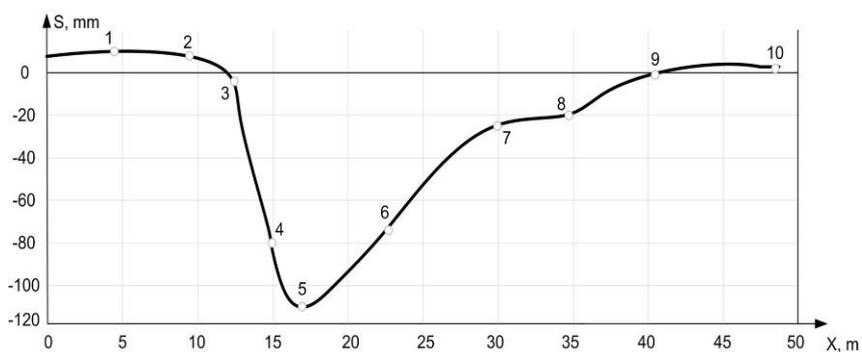


Рис. 7. Начальное распределение осадок вдоль периметра фундамента

Наблюдения велись на протяжении 7 месяцев в период с 12.03.2015 по 26.11.2015, данные по контрольным точкам приведены на рис. 8.

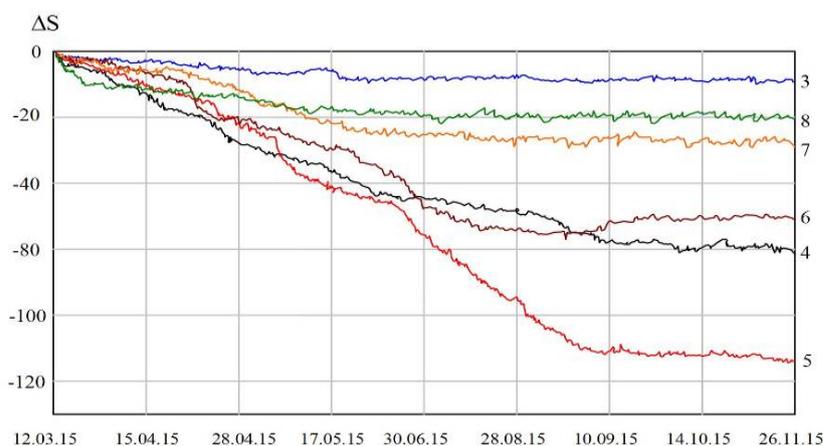


Рис. 8. График изменения осадок в местах установки датчиков

Для формирования прогнозных оценок была применена прогнозная модель влияния геомеханических параметров карстового процесса на геотехнические характеристики объекта, такие как просадка здания и угловые изменения основных несущих конструкций объекта контроля — в данном случае фундамента. Применялась методика, предполагающая при расчете принимать модель основания в виде линейно-деформируемого слоя с воронкой у поверхности, имеющей форму шарового сегмента, с зоной разрыхленного грунта под воронкой. Обработка поступающей информации выполнялась с помощью разработанного программного комплекса GEOTECH (рис. 9) в аналитическом блоке системы мониторинга, в результате чего были получены зависимости, которые характеризуют деформационные процессы, происходящие в наблюдаемом объекте «грунтовое основание — фундамент — сооружение» в условиях наличия карстовых проявлений.

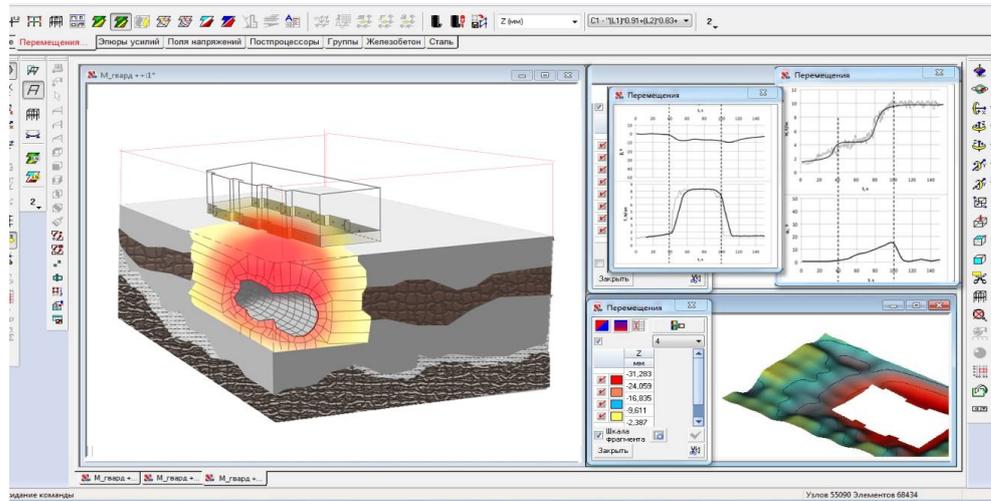


Рис. 9. Пример работы программы GEOTEX

На рис. 10 приведены обработанные в соответствии с рассмотренной методикой данные деформационного и геодинамического контроля.

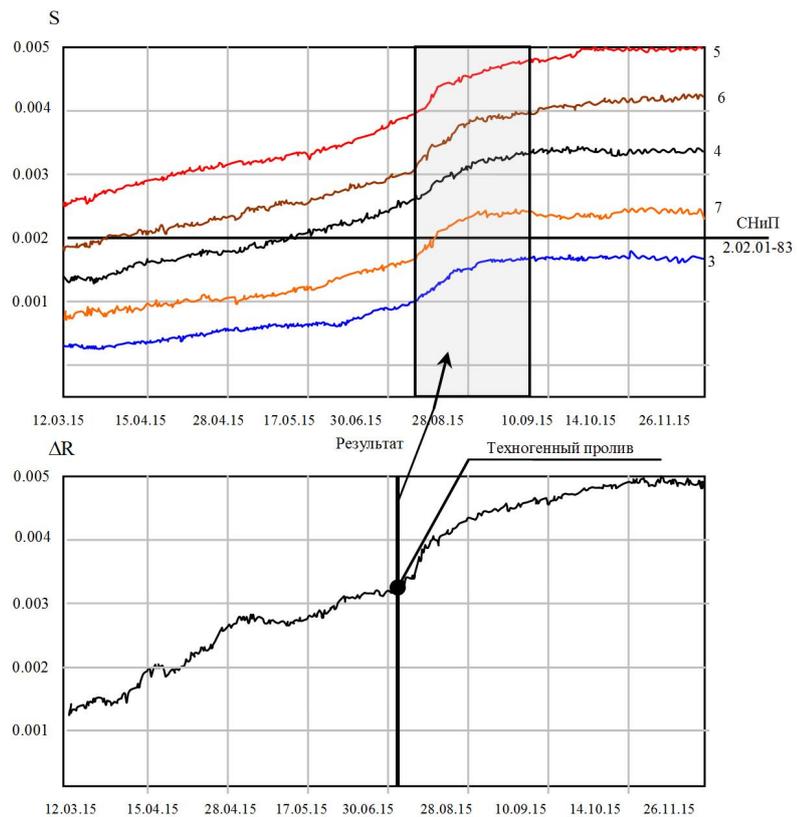


Рис. 10. Результаты обработки данных деформационного и геодинамического контроля

Приведенные зависимости позволяют оценить скорости изменения нормативного деформационного параметра — относительной разности осадок с привязкой к геодинамическим изменениям карстовой полости под зданием. Проведенные наблюдения деформационных процессов продемонстрировали рост относительной разности осадок между датчиками 3—7, расположенными близко к карстовым проявлениям в фундаменте здания.

Выводы. Таким образом, применение разработанных алгоритмов позволило повысить устойчивость системы геотехнического мониторинга к климатическим и вибрационным помехам, повысить точность измерений за счет применения фазометрического принципа контроля. Описанный принцип проведения геотехнического мониторинга фундамента здания и методика контроля осадок здания с применением акселерометрических датчиков расширяет теоретическую и практическую базу геотехнического мониторинга в целом.

Приведенная схема размещения акселерометрических датчиков на ключевых точках фундамента реального объекта контроля обеспечивает оптимальное наблюдение за динамикой деформаций.

Эффективность предложенного подхода составления прогнозных оценок на базе расчетной прогнозной модели влияния геомеханических параметров карстового процесса (просадка, угловые изменения) фундамента сооружения, модель которого представляется в виде линейно-деформируемого слоя с воронкой у поверхности, имеющей форму шарового сегмента, с зоной разрыхленного грунта под воронкой, подтверждается в результате экспериментальных исследований. Полученные зависимости позволяют с высокой степенью надежности оценить скорости изменения нормативного деформационного параметра — относительной разности осадок и оценить временной интервал безопасной эксплуатации сооружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толмачев В. В. Принципы устойчивого развития территорий в карстовых районах и примеры из практики их реализации // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 1. С 3—9.
2. Таранов Р. А. Природно-техногенные источники чрезвычайных ситуаций объектов инфраструктуры нефтегазового комплекса // Экологическое образование и охрана окружающей среды. Технические университеты в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ. Москва, 2014. С. 155—166.
3. Лодыгина Н. Д. Расчет ленточного фундамента на сплошном упругом основании с учетом карстового провала // Фундаментальные исследования. 2016. № 7—2. С. 247—251.
4. Хиллер Б. Цифровые инклинометры в системах автоматизированного геодезического мониторинга деформаций // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 6. С. 23—30.
5. Информационная система мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе интернет-технологий и микроконтроллеров / В. Е. Марлей и др. // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3. № 1. С. 54—68.
6. Andrejašič Matej. MEMS accelerometers. University of Ljubljana. 2008.
7. Осипов А. Б. Коррекция температурной погрешности MEMS-датчиков ускорения // Датчики и системы. 2016. № 7(205). С. 41—46.
8. Dorofeev N., Kuzichkin O., Grecheneva A. / Analysis of mistakes and errors application of the accelerometric phase method of biomechanical control // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. 2016, Book6. Vol. 1. Pp. 383—390.
9. Применение акселерометрических датчиков в измерительных гониометрических системах / А. В. Греченева и др. // Информационные системы и технологии. 2015. № 4(90). С. 5—10.

10. Dorofeev N. V., Bykov A. A., Kuzichkin O. R. The use of the accelerometer sensor to control of the angles of rotation radar antenna // The 26th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology». 2016. Pp. 2011—2017.

11. Высокоский В. Л., Наумова Н. И., Соломин В. И. Метод и алгоритм расчета фундаментных плит зданий каркасно-связевого типа с учетом сложных грунтовых условий. Пермь, 1982.

12. Методы и средства автоматизированного геодинамического контроля и геоэкологического мониторинга / О. Р. Кузичкин и др. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1(13). С. 63—72.

13. Устойчивость грунтового массива при подработке или ослаблении некоторой его области / А. Н. Богомолов и др. // Вестн. ВолГАСУ. Сер. : Стр-во и арх. 2016. № 43(62). С. 14—24.

14. Fredlund D. G., Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York: Wiley, 1993.

15. Адушкин В. В., Спивак А. А. Физические поля в приповерхностной геофизике // ГЕОС. Москва, 2014. 360 с.

© Дорощеев Н. В., Кузичкин О. Р., Греченева А. В., Романов Р. В., 2018

Поступила в редакцию
в сентябре 2018 г.

Ссылка для цитирования:

Проведение геотехнического мониторинга в карстовых районах на основе совместных геоэлектрических и акселерометрических измерений / Н. В. Дорощеев, О. Р. Кузичкин, А. В. Греченева, Р. В. Романов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Вып. 54(73). С. 20—31.

Об авторах:

Дорощеев Николай Викторович — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой управления и контроля в технических системах, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, DorofeevNV@yandex.ru

Кузичкин Олег Рудольфович — д-р техн. наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Российская Федерация, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, oldolkuz@yandex.ru

Греченева Анастасия Владимировна — аспирант кафедры математического и программного обеспечения информационных систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, 1155464@bsu.edu.ru

Романов Роман Вячеславович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления и контроля в технических системах, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, romanov.roman.5@yandex.ru

Nikolay V. Dorofeev^a, Oleg R. Kuzichkin^b, Anastasia V. Grecheneva^b, Roman V. Romanov^a

^a Vladimir State University name after Alexander and Nikolai Stoletovs

^b Belgorod State National Research University

GEOTECHNICAL MONITORING IN KARST AREAS BASED ON JOINT GEOELECTRICAL AND ACCELEROMETRIC MEASUREMENTS

The question of the improving of the quality of the geotechnical monitoring is considered in areas with active karst-suffusion processes. Geodynamic control is carried out on an equipotential geoelectric installation, accelerometric measurements are based on the phase-measuring principle of control. The considered method allows to increase the stability of the geotechnical monitoring system to climatic and vibration disturbances, to improve the measurement accuracy.

Key words: geotechnical monitoring, monitoring, karstic processes, sediment structures, accelerometer, equipotential electrical installation.

For citation:

Dorofeev N. V., Kuzichkin O. R., Grecheneva A. V., Romanov R. V. [Geotechnical monitoring in karst areas based on joint geoelectrical and accelerometric measurements]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2018, iss. 54(73), pp. 20—31.

About authors:

Nikolay V. Dorofeev — Candidate of Engineering Sciences, the Head of the Department of Management and Control in Technical Systems, Vladimir State University. 87, Gorkogo St., Vladimir, Russian Federation, DorofeevNV@yandex.ru

Oleg R. Kuzichkin — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Belgorod State National Research University. 85, Pobedy St., Belgorod, 308015, Russian Federation; oldolkuz@yandex.ru

Anastasia V. Grecheneva — Postgraduate student of Mathematical and Software Information Systems Department, Belgorod State National Research University. 85, Pobedy St., Belgorod, 308015, Russian Federation; 1155464@bsu.edu.ru

Roman V. Romanov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Docent of Management and Control in Technical Systems Department, Vladimir State University. 87, Gorkogo St., Vladimir, Russian Federation; romanov.roman.5@yandex.ru