

УДК 528.5

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-23-31

Исследование устойчивости прототипа малобюджетного цифрового видеоинклинометра к изменению температуры

А. В. Мареев^{1✉}, М. А. Попков¹, В. Р. Янгальшиев¹, В. И. Татаренко¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: a.v.mareev@sgugit.ru

Аннотация. В работе представлено исследование разрабатываемого в лаборатории автоматического геодезического мониторинга СГУГиТ прототипа малобюджетного высокоточного цифрового видеоинклинометра на предмет его устойчивости к изменению температуры. Цифровые высокоточные инклинометры используются в составе автоматизированных систем геодезического мониторинга для раннего предупреждения техногенных аварий. Прототип работает на основе цилиндрической ампулы, использующейся в качестве чувствительного элемента и цифровой видеокамеры. Определение углов наклона чувствительного элемента выполняется при помощи программы компьютерного зрения. В результате исследования установлено, что температурная стабильность прототипа сопоставима с соответствующим показателем прибора Leica Nivel 220 в диапазоне от +10 до +40 °С. Разрабатываемый прототип цифрового инклинометра отличается низкой стоимостью и в перспективе позволит удешевить системы наблюдений геодезического мониторинга.

Ключевые слова: высокоточный инклинометр, цифровой инклинометр, геодезический мониторинг, геотехнический мониторинг

Для цитирования:

Мареев А. В., Попков М. А., Янгальшиев В. Р., Татаренко В. И. Исследование устойчивости прототипа малобюджетного цифрового видеоинклинометра к изменению температуры // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 23–31. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-23-31

Введение

Технология геодезического мониторинга является важной составляющей безопасной эксплуатации зданий, сооружений и природной среды. К сожалению, технология не получает широкого распространения. Главная причина медленного внедрения заключается в высокой стоимости геодезического оборудования и программ обработки. Для мониторинга используются три основных прибора: ГНСС-приемник, роботизированный тахеометр и цифровой инклинометр. Для развития надежных и информативных систем наблюдений необходимо большое количество геодезических приборов. Существуют различные подходы к удешевлению ГНСС-приемников [1, 2]. В работе [3] показано, что можно

использовать малобюджетные ГНСС-модули и недорогие антенны для систем геодезического мониторинга. Развиваются открытые программные комплексы для организации систем наблюдений при помощи роботизированных тахеометров и инклинометров [4]. Однако также следует искать малобюджетные аппаратные альтернативы дорогостоящим цифровым инклинометрам и тахеометрам для дальнейшего повышения доступности систем мониторинга.

Цифровые инклинометры являются важной частью систем наблюдений за конструктивной целостностью зданий и сооружений [5]. Они используются для обеспечения строительных работ высотных зданий [6], деформационного мониторинга гидротехнических сооружений [7], мостовых сооружений [8], тоннелей [9], для

контроля структурной целостности сложных подвижных механизмов [10].

Высокоточные инклинометры могут использоваться в составе других геодезических приборов. Например, в составе зенит-телескопа. Прибор позволяет определять астрономические отклонения отвесных линий [11]. Также высокоточные цифровые инклинометры могут использоваться отдельно от других приборов для геодинамического мониторинга на объектах добычи полезных ископаемых [12–14].

Одним из наиболее востребованных цифровых инклинометров в геодезической практике является Leica Nivel 220 компании HEIGSAGON. Этот прибор использует в качестве чувствительного элемента светоотражающую жидкость. Он определяет приращения наклона по изменению угла между поверхностью жидкости и конструкцией самого прибора. Стоимость устройства начинается от 5 000 евро.

В работе 2015 г. [15] представлен прототип, позволяющий выявлять поступательные и вращательные степени свободы пункта геодезического мониторинга. В составе прибора используется недорогой ГНСС-приемник и малобюджетный цифровой видеоинклинометр (ВИМ). Чувствительным элементом является спиртовой цилиндрический уровень. В качестве детектора малых углов наклона используется цифровая видеокамера. Углы наклона прибора определяются по движению пузырька уровня вдоль ампулы. В исследовании показано, что при помощи недорогих цилиндрических ампул с ценой деления в 60" и цифровой видеокамеры с разрешением 5 Мп можно обеспечить измерения с чувствительностью в 7". Спиртовые цилиндрические уровни широко распространены на массовом рынке. Они представлены большим разнообразием форм, диапазонами чувствительности и рабочих температур. Стоимость ампул спиртовых уровней с ценой деления 4" составляет около 2 000 руб. Модули цифровых видеокамер, которые способны работать в широком диапазоне рабочих температур, можно найти на рынке стоимостью менее 1 000 руб. Таким образом, можно изготовить высокочувствительный цифровой инклинометр с использова-

нием недорогих цилиндрических ампул и камер, а также системы компьютерного зрения, позволяющей отслеживать перемещение пузырька уровня. Суммарная стоимость компонентов будет ниже 5 000 руб.

При изготовлении таких приборов можно варьировать различные технические характеристики инклинометра. Например, изготовить чувствительный цифровой инклинометр, который будет способен работать при температурах ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с помощью компенсированных или камерных ампул), или увеличивать чувствительность прибора за счет использования ампул большей длины и цифровых камер с большим угловым разрешением.

Совместное использование малобюджетных цифровых инклинометров с лазерными модулями позволяет изготавливать недорогие высокоточные датчики малых перемещений в вертикальной плоскости – лазерные нивелиры. В некоторых случаях они позволяют заменить дорогостоящий роботизированный тахеометр. Благодаря этому, можно снизить стоимость оборудования для геодезического мониторинга и расширить сферу его применения.

В работе [15] не было представлено подробного исследования прототипа ВИМ. Практический интерес составляет вопрос о том, насколько прибор соотносится по техническим характеристикам с промышленными образцами. Одной из таких характеристик является устойчивость прибора к изменению температуры и величина дрейфа нулевой точки.

Объектом исследования является малобюджетный цифровой видеоинклинометр, выполненный на основе чувствительной спиртовой цилиндрической ампулы и цифровой камеры. Предметом исследования является определение температурной устойчивости прототипа видеоинклинометра. Конечной целью исследования является повышение доступности высокоточного цифрового инклинометра, который может использоваться для развития систем наблюдений геодезического мониторинга.

Алгоритмы, используемые для преобразования движения пузырьков цилиндрического уровня в малые углы наклона, публикуются под открытым исходным кодом. Разработано два модуля обработки видеоизображений пу-

зырьковых уровней. Первый модуль позволяет обрабатывать видеопоток в режиме реального времени, второй – в постобработке. Алгоритм определения перемещений мениска пузырькового уровня представлен в работе [16].

Методика исследования

Исследование выполнено путем экспериментального сравнения прототипа цифрового видеоинклинометра с эталонным прибором. Проводилась синхронная запись показаний углов наклона в режиме статических наблюдений (без движения). Приборы размещались в изоляционном кожухе с возможностью изменения в нем температуры. Изменения значения температуры фиксировались во время всего эксперимента. Оценка температурной стабильности выполнялась путем сравнения среднего квадратического отклонения (СКО), среднего, максимального и минимального значений, вычисленных по временным рядам синхронных изменений угла наклона эталона и прототипа. Также вычислялись коэффициенты корреляции временных рядов углов наклона с температурой.

Известно, что под влиянием изменения температуры значения измеряемых углов наклона при помощи чувствительных инклинометров подвержены систематическим смещениям. Поэтому выполнена оценка коэффициента смещения нулевой точки инклинометра при помощи линейной регрессии:

$$\hat{C}_t = (A^T A)^{-1} A^T L; \quad (1)$$

$$L = [a_0, a_1, \dots, a_n]; \quad (2)$$

$$A = [t_0, t_1, \dots, t_n]; \quad (3)$$

$$\hat{C}_t = [\Delta\hat{a}, \hat{c}_t], \quad (4)$$

где $[a_0, a_1, \dots, a_n]$ – временной ряд показателя угла наклона исследуемого инклинометра;

n – количество наблюдений во временном ряду;

$[t_0, t_1, \dots, t_n]$ – временной ряд значений температуры в моменты измерения угла наклона изучаемым инклинометром;

$\Delta\hat{a}$ – МНК оценка калибровочного коэффициента между временным рядом температуры и значениями угла наклона;

\hat{c}_t – МНК-оценка температурного смещения нулевой точки инклинометра.

В эксперименте отдельно выполнялась оценка коэффициентов смещения для фазы нагрева и охлаждения. Временные ряды значений углов наклона калибровались по полученным оценкам коэффициентов смещения нулевой точки. Для калиброванных временных рядов также вычислены СКО, среднее, минимальное и максимальное значения.

Эксперимент

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов. Прототип – одноосевой инклинометр ВИМ с цилиндрической ампулой, которая имеет цену деления 4" и диапазон измеряемых значений наклонов $\pm 25''$. В прототипе используется цифровая USB-камера Logitech C525. Разрешение матрицы камеры 2 Мп, максимальная частота записи 30 Гц, разрешение 1 280 x 720 точек. В качестве эталона использовался цифровой двухосевой инклинометр Leica Nivel 220. Эталон и прототип одновременно закреплялись на экзаменаторе нивелиров. Устройства помещались в изоляционный кожух, который состоял из деревянной остекленной рамы и теплоизоляционного материала – пенополистирола. Установка размещалась в подвальном помещении гравиметрической лаборатории СГУГиТ. Экзаменатор уровня устанавливался на постамент, который имеет отдельный фундамент от здания (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка

Выбор постаментов обусловлен необходимостью исключения колебаний, которые могут передаваться через фундамент здания.

Эксперимент проводился в две фазы: охлаждение и нагрев. График изменения температуры в течение эксперимента представлен на рис. 2. Изменения температуры фиксировались при помощи внутреннего датчика температуры, установленного в инклинометр Leica Nivel 220.

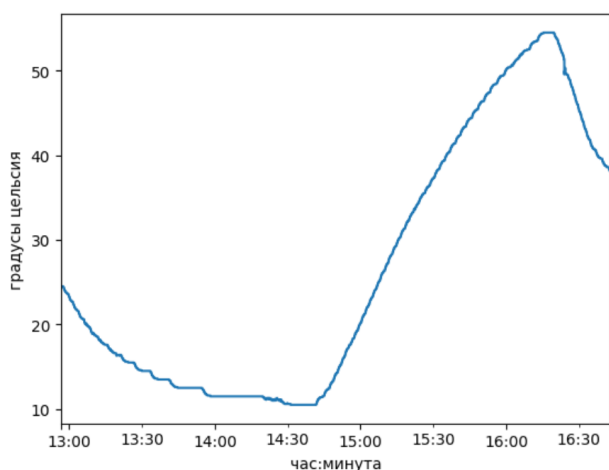


Рис. 2. График изменения температуры во время эксперимента

В обработке использовались только периоды наблюдений: с 13:00–14:20 (фаза охлаждения) и 14:45–16:00 (фаза нагрева). В перерыве выполнялась перенастройка оборудования для обеспечения нагрева приборов. В 16:00 зафиксирована потеря отслеживания пузырька.

Результаты исследования

В результате эксперимента установлено, что величина смещения температурной точки \hat{c}_t прототипа ВИМ в температурном диапазоне от +10 до +20 °С составляет $-0,753$ "/°С. В диапазоне от +10 до +50 °С величина \hat{c}_t ВИМ составляет $0,138$ "/°С. Если ограничить диапазон рабочих температур значениями от +10 до +40 °С, то коэффициент \hat{c}_t составит $-0,008$ "/°С. Оценки коэффициентов смещения нулевой точки для прототипа и эталона представлены в табл. 1. Основные показатели временных рядов исследованного прототипа ВИМ представлены в таблице 2. Графики временных рядов показателей углов наклона прототипа и эталона представлены на рис. 3.

Температурная стабильность нулевой точки эталонного инклинометра Leica Nivel 220 оценивается величиной $2,5''$ (значение средней квадратической ошибки временного ряда измерений наклона за весь период эксперимента, после калибровки, см. табл. 1). Коэффициенты смещения нулевой точки от изменения температуры составили $0,930$ и $0,615$ "/°С для фазы охлаждения и нагрева соответственно. Согласно паспорту прибора, величина стабильности нулевой точки составляет ± 1 "/°С. Таким образом, оценки коэффициентов линейного смещения нулевой точки эталонного прибора согласуются с характеристиками, заявленными в паспорте [17]. Программа обработки измерений, полученных в результате эксперимента, доступна по ссылке [18]. Исходные данные эксперимента доступны в репозитории OSF [19].

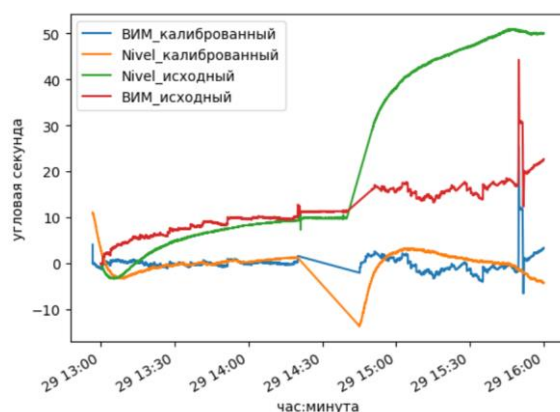


Рис. 3. Графики временных рядов исследованных инклинометров

Таблица 1

Оценки значений коэффициентов смещения нулевой точки прототипов ВИМ и эталона Leica Nivel 220

Инклинометр, фаза эксперимента	Коэффициент смещения нулевой точки, $''/^\circ\text{C}$	Ошибка коэффициента смещения нулевой точки, $''/^\circ\text{C}$	Корреляция показателя угла наклона с температурой, б/р
ВИМ, фаза охлаждения	-0,753	0,002	-0,988
Nivel, фаза охлаждения	-0,930	0,007	-0,869
ВИМ, фаза нагрева	0,138	0,003	0,517
Nivel, фаза нагрева	0,615	0,004	0,916
ВИМ, фаза нагрева (до $+40^\circ\text{C}$)	-0,008	0,002	-0,060
Nivel, фаза нагрева (до $+40^\circ\text{C}$)	0,812	0,007	0,915

Таблица 2

Основные показатели временных рядов, полученных при помощи прототипа ВИМ и эталона Leica Nivel 220

Инклинометр, температурная компенсация	СКО, $''$	Среднее значение, $''$	Максимальное значение, $''$	Минимальное значение, $''$
Nivel до температурной компенсации	19,7	22,0	51,0	-3,3
ВИМ до температурной компенсации	5,1	11,9	44,3	-0,2
Nivel после температурной компенсации	2,5	$1,9 \cdot 10^{-15}$	11,1	-13,7
ВИМ после температурной компенсации	1,8	$8,6 \cdot 10^{-16}$	25,5	-6,5
Nivel после температурной компенсации (до $+40^\circ\text{C}$)	2,4	$-9,1 \cdot 10^{-16}$	11,1	-11,4
ВИМ после температурной компенсации (до $+40^\circ\text{C}$)	0,739	$4,277 \cdot 10^{-16}$	4,077	-3,717

Заключение

По результатам исследования прототипа малобюджетного высокоточного видеоинклинометра сформулированы следующие выводы:

1) значение систематического ухода нулевой точки прототипа ВИМ по мере изменения температуры в фазе охлаждения сопоставимо по величине с коммерческим прибором Leica Nivel 220, 0,7 против 0,9 $''/^\circ\text{C}$;

2) ВИМ имеет низкое значение систематического ухода нулевой точки по мере увеличения температуры в диапазоне от $+20$ до $+40^\circ\text{C}$, равное 0,1 $''/^\circ\text{C}$;

3) ВИМ устойчивее к резким изменениям температуры по сравнению с инклинометром Leica Nivel 220. В начальных моментах фазы охлаждения и нагрева можно заметить дрейф величиной 10'', который не удастся устранить путем линейной калибровки по температуре.

Скорость изменения температуры на данных отрезках составляет около $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

При оценке систематического дрейфа и СКО устойчивости нулевой точки в диапазоне от $+20$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно сделать вывод, что ВИМ стабильнее Leica Nivel 220. Однако здесь важно сделать замечание. В эксперименте запись значений температуры велась по датчику, установленному внутри Leica Nivel 220. Неизвестно, как менялась температура внутри прототипа. В нем не использовалась какая-либо температурная изоляция. Если предположить, что внутри Leica Nivel 220 изоляция используется, то значение температуры внутри прототипа была выше, чем в Leica Nivel 220. Таким образом, возможно, что ВИМ может использоваться в полосе температур от $+40$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но для определения этого факта требуется повтор эксперимента с установкой датчика температуры внутри прототипа.

Известно, что по мере роста температуры повышается вязкость жидкости, заполняющей цилиндрическую ампулу. В результате уменьшается видимая величина мениска уровня. Таким образом, следует ожидать увеличение погрешности измерения углов наклона при помощи ВИМ на пределе диапазона рабочих температур.

По итогу исследования можно сделать вывод о том, что исследуемый прототип ВИМ не уступает по показателю температурного устойчивости коммерческому инклинометру Leica Nivel 220 в диапазоне рабочих температур от $+10$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследование выполнено при поддержке госбюджетной НИР «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Huang, K. Y. Efficient FPGA Implementation of a Dual-Frequency GNSS Receiver with Robust Inter-Frequency Aiding // *Sensors*. – 2021. – Т. 21, № 14. – Р. 4634.
2. Fernández-Prades C. GNSS-SDR [Electronic resource] // GNSS-SDR. – URL: <https://gnss-sdr.org/>.
3. Zhang L., Stange M., Schwieger V. automatic low-cost GPS monitoring system using WLAN communication // *FIG Working Week*. – 2012. – Р. 17.
4. Engel P. Deformation monitoring in the internet of things. Implementation of a multi-platform software package for modern sensor networks in engineering geodesy. – 2017. – Р. 8.
5. Хиллер Б. Цифровые инклинометры в системах автоматизированного геодезического мониторинга деформаций // *Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2015. – № 6. – Р. 23–30.
6. Жидков А. А., Васютинский И. Ю., Васютинская С. И. Современные технологии геодезического обеспечения высотного строительства // *Геодезия и картография*. – 2021. – Т. 82, № 6. – С. 10–16. – DOI 10.22389/0016-7126-2021-972-6-10-16.
7. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.
8. Васильчук Л. А., Чаплин И. В. Методы обнаружения размывов опор мостов // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2023. – № 1. – С. 83–92. – DOI 10.15593/24111678/2023.01.10.
9. Парамонов С. С., Аммон Е. В. Мониторинг деформаций при строительстве тоннелей под ответственными зданиями и сооружениями // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № S41. – С. 3–15. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-11-41-3-15.
10. Осадчий Г. В., Белый А. А., Ефанов Д. В., Шестовицкий Д. А. Мониторинг технического состояния раздвижной крыши стадиона «Санкт-Петербург Арена» // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2018. – № 6 (69). – С. 10–24. – DOI 10.18720/CUBS.69.2.
11. Morozova K., Jäger R., Balodis J., Silabriedis G., Kaminskis J., Kalinka M., Balodis K., Mitrofanovs I. Preliminary Results on Quasi-Geoid for Western Part of Latvia Using Digital-Zenith Camera and DFHRS V.4.3 Software // *Geophysica* – 2019. – Vol. 54., No. 1. – Р. 61–68.

12. Furst S., Chéry J., Peyret M. [и др.] Tiltmeter data inversion to characterize a strain tensor source at depth: application to reservoir monitoring // *Journal of Geodesy*. – 2020. – Vol. 94. – No. 5. – P. 48.

13. Малмыгин Я. С., Гусева А. Е., Гриднев С. О. Высокоточные цифровые инклинометры маркшейдерско-геодезической сети для контроля подземных сдвижений и деформаций бортов карьера // *Перспективы развития горно-металлургической отрасли : Материалы XXIII Всероссийской научно-практической конференции «Игошинские чтения», Иркутск, 30 ноября – 01 2023 года. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 120–123.*

14. Кузьмин Ю. О., Дещеревский А. В., Фаттахов Е. А. и др. Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 95–110. – DOI 10.21455/gpb2018.2-6.

15. Artese G., Perrelli M., Artese S. и др. POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15. – No. 5. – С. 10806–10824.

16. Карпик А. П., Мареев А. В., Попков М. А. и др. Малобюджетный высокоточный цифровой инклинометр на основе системы компьютерного зрения // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. – 2023. – Т. 10. – № 3. – С. 51–59.

17. Leica Nivel210/220 Inclinometer [Electronic resource] // *Leica Geosystems* – URL: https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/systems/geotechnical-sensors/leica-nivel-210_220.

18. Mareev A. V. CV_VIM_temperature_stability_test / [Electronic resource] // *Gist* – URL: <https://gist.github.com/ArtemMareev/180e924d7c1c997f3f0f22e6398cd52d>.

19. Mareev A.V. Digital Buble-level [Electronic resource] // *OSF* – URL: <https://osf.io/pd9kj/>.

Об авторах

Артем Владимирович Мареев – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Максим Андреевич Попков – магистрант кафедры прикладной информатики и информационных систем.

Валентин Рамильевич Янгальшев – магистрант кафедры космической и физической геодезии.

Валерий Иванович Татаренко – доктор экономических наук, профессор, зав. кафедрой технологической безопасности.

Получено 24.05.2024

© А. В. Мареев, М. А. Попков,
В. Р. Янгальшев, В. И. Татаренко, 2024

Study of the stability of a low-budget digital video inclinometer prototype to temperature changes

A. V. Mareev¹✉, M. A. Popkov¹, V. R. Yangalishev¹, V. I. Tatarenko¹

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: a.v.mareev@sgugit.ru

Abstract. The paper presents a study of a low-budget high-precision digital video inclinometer prototype being developed in the automatic geodetic monitoring laboratory of SGUGiT for its resistance to temperature changes. Digital high-precision inclinometers are used in automated geodetic monitoring systems for early warning of man-made accidents. The prototype operates on the basis of a

cylindrical ampoule used as a sensitive element and a digital video camera. The angles of inclination of the sensitive element are determined using a computer vision program. The study found that the temperature stability of the prototype is comparable to the corresponding indicator of the Leica Nivel 220 device in the range of +10 – +40 °C. The developed prototype of the digital inclinometer is distinguished by its low cost and, in the future, will make it possible to reduce the cost of geodetic monitoring observation systems.

Keywords: high-precision inclinometer, digital inclinometer, geodetic monitoring, geotechnical monitoring

REFERENCE

1. Huang, K. Y. (2021) Efficient FPGA Implementation of a Dual-Frequency GNSS Receiver with Robust Inter-Frequency Aiding. *Sensors*. 21., 14, 4634.
2. Fernández-Prades C. GNSS-SDR. *GNSS-SDR* Retrieved from <https://gnss-sdr.org/>.
3. Zhang L., Stange M., & Schwieger V. (2012) automatic low-cost GPS monitoring system using WLAN communication *FIG Working Week 2012*, 17.
4. Engel, P. (2017). Deformation monitoring in the internet of things. Implementation of a multi-platform software package for modern sensor networks in engineering geodesy, 8.
5. Hiller, B. (2015). Digital inclinometers in automated geodetic deformation monitoring systems. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos'emka. [Geodesy and aerial photography]*. 6, 23–30 [in Russian].
6. Zhidkov, A. A., Vasyutinsky, I. Yu., & Vasyutinskaya, S. I. (2021). Modern technologies of geodetic support of tower construction. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*. 82, 6, 10–16. DOI 10.22389/0016-7126-2021-972-6-10-16 [in Russian].
7. Hille, B., & Yambaev, H. K. (2016). Development and field testing of an automated deformation monitoring system *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. 1 (33), 48–61 [in Russian].
8. Vasil'chuk, L. A., & Chaplin, I. V. (2023). Scour detection methods for bridge piers *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya. [Transport. Transport facilities. Ecology]*. 1, 83–92. DOI 10.15593/24111678/2023.01.10 [in Russian].
9. Paramonov, S. S., & Ammon, E. V. (2020). Deformation monitoring during tunnel construction under critical buildings and structures *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]*. S41, 3–15. DOI 10.25018/0236-1493-2020-11-41-3-15 [in Russian].
10. Osadchij, G. V., Belyj, A. A., Efanov, D. V., & Shestovickij, D. A. (2018). Monitoring of the technical condition of the sliding roof of the St. Petersburg Arena stadium *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij [Construction of unique buildings and structures]*. 6 (69), 10–24. DOI 10.18720/CUBS.69.2 [in Russian].
11. Morozova, K., Jäger, R., Balodis, J., Silabriedis, G., Kaminskis, J., Kalinka, M., Balodis, K., & Mitrofanovs, I. (2019). Preliminary Results on Quasi-Geoid for Western Part of Latvia Using Digital-Zenith Camera and DFHRS V.4.3 Software *Geophysica*, 54 (1), 61–68.
12. Furst, S., Chéry, J., Peyret, M. & et. al. (2020). Tiltmeter data inversion to characterize a strain tensor source at depth: application to reservoir monitoring *Journal of Geodesy*, 94 (5), 48. DOI 10.1007/s00190-020-01377-5.
13. Malmygin, Ya. S., Guseva, A. E., & Gridnev, S. O. (2023). High-precision digital inclinometers of the surveyor-geodetic network for control of underground shifts and deformations of quarry sides *Perspektivy razvitiya gorno-metallurgicheskoy otrasli [Proc of the XXIII RSPC 'Igoshinskie readings', 30 November - 01 December 2023] Irkutsk, INITU*, 120–123 [in Russian].
14. Kuz'min, Yu. O., Deshcherevskij, A. V., & Fattahov E. A. (2018). Inclinometric observations at the Yu. Geofizicheskie processy i biosfera Korchagin [Geophysical processes and the biosphere]. 17 (2), 95–110. DOI 10.21455/gpb2018.2-6 [in Russian].

15. Artese, G., Perrelli, M., Artese, S. & et. al. (2015). POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests *Sensors*, 15 (5), 10806–10824. DOI 10.3390/s150510806.
16. Karpik, A. P., Mareev, A. V., & Popkov, M. A. (2023). Low-budget high-precision digital inclinometer based on computer vision system. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy [Rocket and space instrumentation and information systems]*, 10(3), 51–59 [in Russian].
17. Leica Nivel210/220 Inclination Sensor. *Leica Geosystems*. Retrieved from https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/systems/geotechnical-sensors/leica-nivel210_220.
18. Mareev A. V. CV_VIM_temperature_stability_test. *Gist*. Retrieved from <https://gist.github.com/ArtemMareev/180e924d7c1c997f3f0f22e6398cd52d>.
19. Mareev A.V. Digital Buble-level OSF. Retrieved from <https://osf.io/pd9kj/>.

Author details

Artem V. Mareev – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Maxim A. Popkov – Graduate, Department of Applied Informatics and Information Systems.

Valentin R. Yangalyshev – Graduate, Department of Space and Physical Geodesy.

Valery I. Tatarenko – D. Sc., Professor, Head of Department of Technosphere Safety.

Received 24.05.2024

© *A. V. Mareev, M. A. Popkov,
V. R. Yangalyshev, V. I. Tatarenko, 2024*