

## Малобюджетный высокоточный цифровой инклинометр на основе системы компьютерного зрения

**А. П. Карпик**, *д. т. н., rector@ssga.ru*

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,  
Новосибирск, Российская Федерация*

**А. В. Мареев**, *к. т. н., a.v.mareev@sgugit.ru*

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,  
Новосибирск, Российская Федерация*

**М. А. Попков**, *Popkov-MA2019@sgugit.ru*

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,  
Новосибирск, Российская Федерация*

**В. Р. Янгальшев**, *yangalishев-вр2019@sgugit.ru*

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,  
Новосибирск, Российская Федерация*

**Д. С. Мамаев**, *татаев.s.d@gmail.com*

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,  
Новосибирск, Российская Федерация*

**Аннотация.** Цифровой высокоточный инклинометр является важной составляющей постоянно действующей базовой станции ГНСС. Он позволяет разделять поступательные и вращательные движения ГНСС-антенны в ходе геодезического мониторинга. Промышленные образцы высокоточных цифровых инклинометров отличаются высокой стоимостью и слабой приспособленностью к работе в условиях низких температур. В статье представлены результаты тестирования прототипа малобюджетного высокоточного цифрового видеоинклинометра (ВИМ). ВИМ — это устройство на основе цифровой видеокамеры и спиртового цилиндрического уровня. Определение углов наклона ВИМ выполняется с помощью программы компьютерного зрения путем отслеживания перемещений пузырька уровня. В работе представлен способ удешевления конструкции цифрового инклинометра и расширения диапазона его рабочих температур. Первые результаты тестирования прототипа показывают потенциальную возможность замены малобюджетными ВИМ дорогостоящих промышленных инклинометров западного производства при использовании в условиях комнатных температур.

**Ключевые слова:** цифровой инклинометр, геодезический мониторинг, структурный мониторинг, видеоинклинометр

## Cost-Effective and High-Precision Inclinometer Based on Computer Vision

**A. P. Karpik**, *Dr. Sci (Engineering), rector@ssga.ru*

*Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), Novosibirsk, Russian Federation*

**A. V. Mareev**, *Cand. Sci (Engineering), a.v.mareev@sgugit.ru*

*Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), Novosibirsk, Russian Federation*

**M. A. Popkov**, *Popkov-MA2019@sgugit.ru*

*Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), Novosibirsk, Russian Federation*

**V. R. Yangalyshev**, *yangalyshev-vr2019@sgugit.ru*

*Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), Novosibirsk, Russian Federation*

**D. S. Mamaev**, *mamaev.s.d@gmail.com*

*Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), Novosibirsk, Russian Federation*

**Abstract.** A digital high-precision inclinometer is an important component of a GNSS base station. It allows separating translational and rotational movements of the GNSS antenna during geodesic monitoring. Industrial specimen of high-precision digital inclinometers have a high cost and poor workability at low temperatures. The paper presents the testing results of a prototype of a low-cost high-precision digital video inclinometer (VIM). A VIM is a device based on a digital video camera and a spirit cylindrical level. The determination of the tilt angles of the VIM is based on a computer vision program by tracking the movements of the level bubble. The paper presents a way to reduce the cost of the design of a digital inclinometer and expand the range of operating temperatures. The first testing results of the prototype show the potential to replace expensive foreign industrial inclinometers when using at room temperatures.

**Keywords:** digital inclinometer, geodesic monitoring, structural monitoring, video inclinometer

## Введение

Геодезический мониторинг — важная составляющая безопасной эксплуатации зданий, сооружений и природной среды. Особенно актуален автоматический мониторинг в зонах повышенного геодинамического риска. Такие зоны появляются на территориях, прилегающих к регионам Крайнего Севера. За счет проявления различных экзогенных процессов (термокарст, солифлюкция, сортировка обломочного материала и т. д.) в них стремительно меняется рельеф местности. Согласно мнению специалистов [11], для России глобальное потепление несет значительный риск из-за возможных аварий на инфраструктурных объектах, в том числе на объектах нефтегазодобычи. До 75 % нефтедобычи РФ сконцентрировано на территориях с условиями вечной мерзлоты. Большая часть сооружений на этих территориях строилась без учета влияния таяния вечномерзлых грунтов на стабильность фундаментов. К 2050 г. потенциальный ущерб от глобального потепления может составить до 9 триллионов рублей [11]. Геотехнический мониторинг вечномерзлых грунтов является сложной инженерной задачей, который требует дорогостоящего оборудования. Для развития надежных систем мониторинга необходимы сотни геодезических датчиков разных типов: высокоточные ГНСС-приемники, инклинометры, тензометры, роботизированные тахеометры. В связи с этим возникает задача разработки малобюджетных и надежных методов мониторинга геодинамической обстановки в условиях Крайнего Севера.

Геодезический мониторинг стабильности также играет важную роль в развитии систем координат и навигационного пространства в условиях интенсивно меняющегося климата. Постоянно действующие базовые станции ГНСС, использующиеся в качестве элемента систем контроля за навигационным пространством, рекомендуется комплектовать чувствительными датчиками малых наклонов (инклинометрами). Инклинометры позволяют разделять поступательные и вращательные степени свободы в движениях ГНСС-станций. Это, в свою очередь, позволяет повышать качество прогноза движения наземных пунктов и моделирования динамики литосферных плит, так как наклоны пилонных

геодезических пунктов часто возникают из-за таяния вечной мерзлоты вблизи фундамента центра.

*Типы инклинометров.* В геодезии используются несколько типов высокоточных инклинометров. Одним из них является прибор с электролитическим чувствительным элементом [4]. Он используется в тахеометрах для горизонтирования прибора и мониторинга отклонения от горизонтальности в процессе работы. Стоимость только чувствительного элемента с разрешающей способностью 1" начинается от 620 долларов [7] (без АЦП, контроллеров и датчиков температуры). Чувствительный элемент обладает малыми размерами, низкими показателями дрейфа нуля и изменения разрешающей способности при изменении температуры. Однако минимальный порог рабочего диапазона таких инклинометров начинается от  $-20^{\circ}\text{C}$ . Стоимость высокоточных цифровых инклинометров на электролитических уровнях начинается от 2500 долларов.

Один из наиболее распространенных в геодезической практике высокоточных инклинометров Leica Nivel 220 использует в качестве чувствительного элемента светоотражающую жидкость. Фотоприемник, который является детектором прибора, фиксирует изменения малых углов наклона по отраженному от поверхности жидкости изображению [1]. Стоимость таких приборов начинается от 5000 долларов за единицу. Диапазон их рабочих температур также начинается от  $-20^{\circ}\text{C}$  [8].

В 2022 г. коллективом авторов предложен способ высокоточного определения углов наклона контролируемого объекта при геодезическом мониторинге посредством технологии компьютерного зрения. Для его реализации предложен малобюджетный цифровой видеоклинометр (ВИМ) [6]. Оптико-электронный измерительный блок устройства состоит из следующих элементов:

- парные цилиндрические спиртовые уровни, расположенные под прямым углом по отношению друг к другу (чувствительные элементы);
- малобюджетная цифровая видеокамера (детектор);
- светодиоды для освещения уровней.

В ВИМ определение малых углов наклона выполняется на основе анализа потока видеоизображения спиртовых уровней. Видеоизображения спиртовых уровней передаются на сервер, в котором

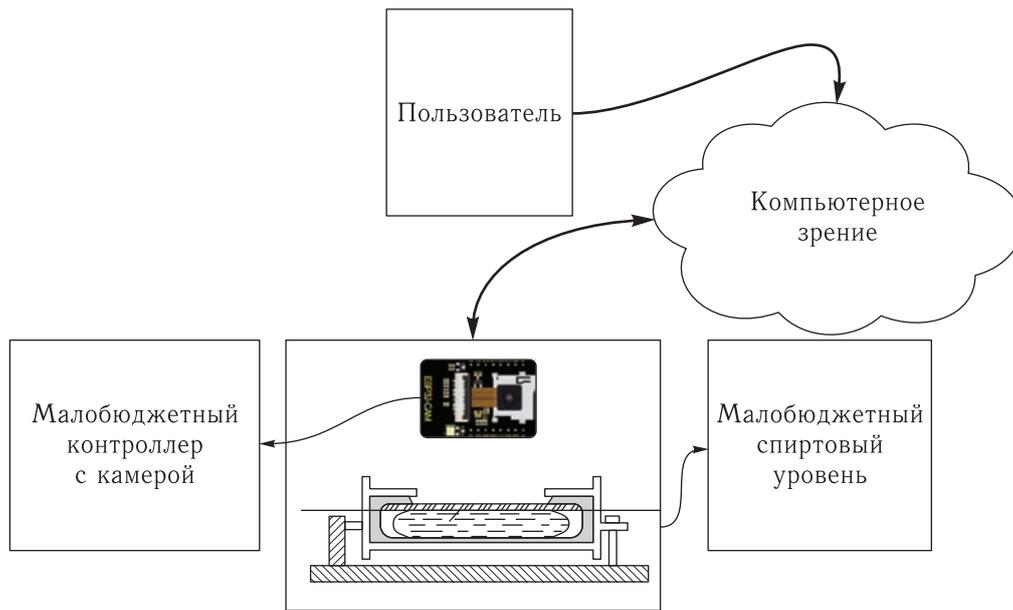


Рис. 1. Условная схема устройства малобюджетного цифрового видеоинклинометра

при помощи программы компьютерного зрения оцениваются малые углы наклона. Выполняется это путем оценки величин движения пузырьков уровня с помощью последовательной обработки видеоизображений. Условная схема устройства ВИМ представлена на рис. 1.

Алгоритм работы программы определения углов наклона по изображениям цилиндрических уровней построен на основе открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV [5]. В алгоритме для идентификации пузырька используется метод findContours [13]. При помощи этого метода видимый пузырек уровня описывается прямоугольником, координаты  $(X^1, X^2)$  которого можно получить в системе координат снимка (рис. 2). Место нуля прибора определяется левым краем обрезаемого пользователем поля зрения камеры.

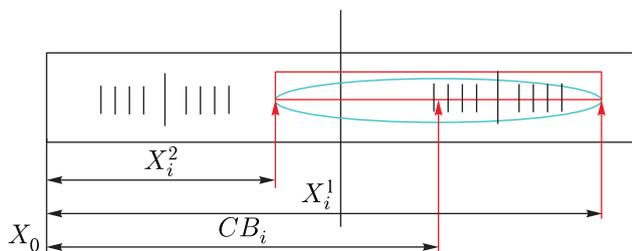


Рис. 2. Схема определения центра детектируемого пузырька в ВИМ

Из полуразности координат  $(X^1, X^2)$  вычисляются координаты положения центра пузырька уровня (Center Buble,  $CB$ ) в пикселях. Движение пузырька регистрируются по изменению координат центра  $CB$ :

$$CB_i = \frac{X_i^2 - X_i^1}{2} - \frac{X_0^2 - X_0^1}{2}, \quad (1)$$

где  $X_i^2, X_i^1$  — координаты детектируемых концов пузырька на момент наблюдения;

$X_0^2 - X_0^1$  — координаты концов пузырька на начальный момент наблюдений.

Такой способ определения положения центра пузырька уровня позволяет компенсировать изменение его длины по мере изменения температуры. Обобщенный алгоритм преобразования видеоизображений пузырька цилиндрического уровня в малый угол наклона представлен на рис. 3.

Известно, что по мере понижения температуры изменяется длина пузырька цилиндрического уровня. Цилиндрические уровни в основном рассчитаны на работу при комнатных температурах. Следовательно, при значительном понижении температуры пузырек может увеличиться в размерах настолько, что его детектирование окажется невозможным.



Рис. 3. Алгоритм определения углов наклона при помощи ВИМ

Существуют специальные типы ампул для цилиндрических уровней с широким диапазоном рабочих температур. Это ампулы цилиндрические компенсированные (АЦК) и ампулы цилиндрические с регулируемой длиной пузырька (АЦР). Такие ампулы имеют рабочий диапазон температур от  $-50$  до  $50^\circ$  и обозначены литерой «Н» (нормальный диапазон) [10]. Также существуют малобюджетные камеры на основе матрицы DIS, способные работать в условиях низких температур (до  $-40^\circ$ ). Эти камеры используются в системах уличного видеонаблюдения. Таким образом, путем объединения технологии компьютерного зрения с малобюджетными камерами и термокомпенсированными уровнями можно изготавливать высокоточные малобюджетные цифровые инклинометры для геодезического мониторинга в условиях Крайнего Севера.

*Цель исследования* заключается в разработке малобюджетного инклинометра, способного работать в условиях Крайнего Севера. Задачей текущего этапа исследования является определение пригодности разработанного алгоритма ВИМ к измере-

нию малых углов наклона по чувствительным цилиндрическим уровням.

## Методика исследования

Для определения пригодности предложенного алгоритма и программы измерения малых углов наклона с помощью малобюджетного цифрового видеоинклинометра выполнен эксперимент, в котором проводилось сравнение технических характеристик прототипа ВИМ и эталонного цифрового инклинометра промышленного образца.

В ходе эксперимента установлена разрешающая способность исследуемого прототипа ВИМ, среднеквадратическая погрешность измерения (СКП) малых углов наклона. Исследование выполнено в движении, то есть путем задания наклона экспериментальной установке. Критерием пригодности предложенного метода определения малых углов наклона является сопоставимость разрешающей способности и СКП прототипа с ценой деления используемого цилиндрического уровня. При этом средняя

квадратическая погрешность измерения углов наклона ВИМ должна оставаться стабильной на всем диапазоне измерений.

Оценка разрешающей способности прототипа выполнена путем регрессионного анализа. Для этого установлен тип математической зависимости между временными рядами измеряемых значений наклонов прототипом ВИМ и эталонным инклинометром. Это достигнуто с помощью методов корреляционного анализа. По полученной регрессионной модели выполнена калибровка прототипа ВИМ.

Оценка точности прототипа ВИМ выполнена по разностям

$$\Delta_i = CB_i \cdot c + \delta X - X_i^{Nivel}, \quad (2)$$

где  $c$  — цена деления ВИМ, "/пиксель;

$\delta X$  — величина начального угла наклона между эталонным инклинометром и исследуемым;

$X_i^{Nivel}$  — величина измеренного угла наклона с помощью эталонного инклинометра.

Для адекватной оценки СКП измерения углов наклона при помощи прототипа ВИМ для временного ряда  $\Delta$ , составленного из разностей (2), проведена проверка гипотезы о нормальном распределении. Проверка выполнена при помощи статистического теста Шапиро–Уилка [3]:

$$W = \frac{\left(\sum_{j=1}^n a_j \Delta_j\right)^2}{\sum_{j=1}^n (\Delta_j - \bar{\Delta})^2}, \quad (3)$$

где  $W$  — значение статистики теста;

$a = \frac{m^T Q}{C}$  — ряд нормированных взвешенных коэффициентов от ожидаемых величин порядковой статистики нормального распределения;

$Q$  — ковариационная матрица ряда  $m$ ;

$m = (m_1 \dots m_n)$  — ряд из ожидаемых значений порядковой статистики, вычисленных для нормального распределения;

$\Delta_j$  — элемент временного ряда разностей (1), сгруппированных в ряд из неубывающих чисел;

$\bar{\Delta}$  — среднее арифметическое временного ряда  $\Delta$ ;

$n$  — количество элементов в ряде  $\Delta$ .

Средняя квадратическая погрешность оценивалась по известной формуле Бесселя:

$$m_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}. \quad (4)$$

Отсутствие систематических погрешностей во временном ряду  $\Delta$  проверено с помощью однопараметрического теста Стьюдента:

$$H_0: E(\Delta) = 0; \quad t = \frac{\bar{\Delta}}{m_{\Delta}/\sqrt{n}}. \quad (5)$$

## Эксперимент

Для проведения экспериментов разработан прототип ВИМ. В прототипе используется цифровая USB-камера Logitech C525. Разрешение матрицы камеры 2 МП, максимальная частота записи 30 Гц, разрешение 1280 × 720 точек. В качестве чувствительного элемента используется цилиндрический уровень с ценой деления 4". Для освещения уровней используется светодиодная лента. Элементы прибора смонтированы в алюминиевом корпусе.

В качестве эталонного прибора использовался цифровой инклинометр Leica Nivel 220. Прибор имеет среднеквадратическую погрешность измерения малых углов наклона в 1" в диапазоне измерений от –300 до 300" (диапазон «А»), 3" в диапазоне от –500 до 500" (диапазон «Б») и 10" в диапазоне от –600 до 600" (диапазон «В»).

В качестве устройства, позволяющего задавать малые углы наклона, использовался экзаменатор цилиндрических уровней [12]. Прототип и эталон совместно устанавливались на рабочей площадке экзаменатора уровней. Экспериментальная установка помещалась на пилон гравиметрического пункта, расположенного в подвальном помещении. Пилон пункта имеет отдельный фундамент от фундамента здания. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 4.

Эксперимент проводился при средней температуре окружающего воздуха 25,5°. Запись измерений с двух инклинометров в движении проводилась синхронно. Выполнено три сеанса записи по 5 минут. В процессе записи установке придавались наклоны таким образом, чтобы пузырек уровня ВИМ достигал крайних положений диапазона

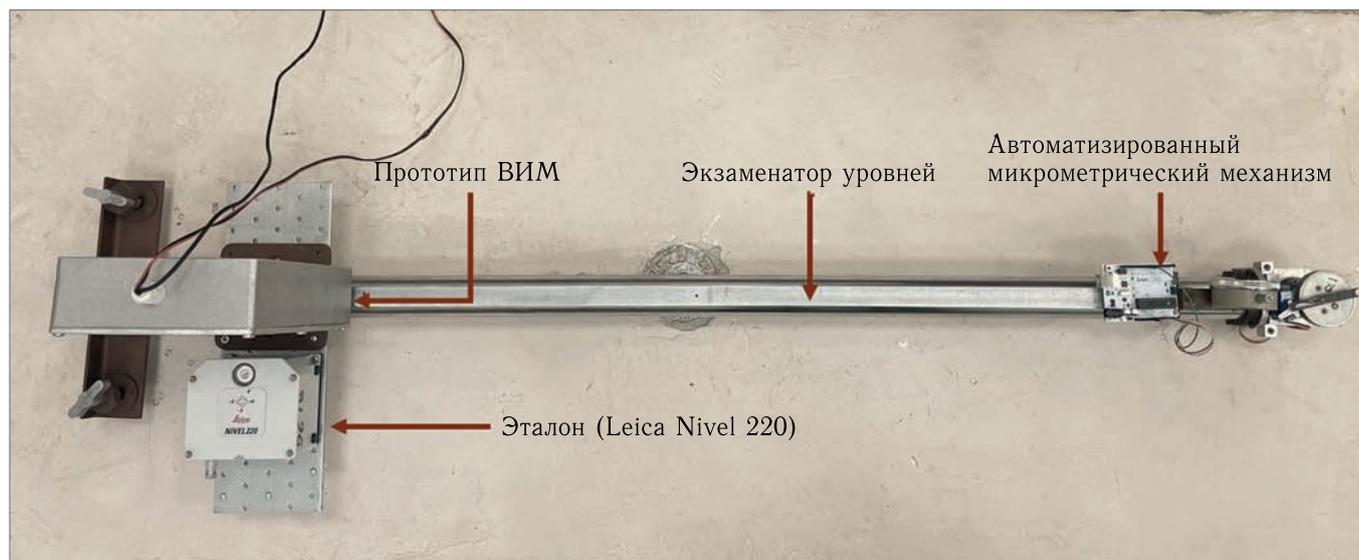


Рис. 4. Экспериментальная установка (вид сверху)

работы. Диапазон измерений углов наклона ВИМ составил  $48''$ . Скорость наклонов задавалась равной  $1; 3; 9''/с$ . Исходные файлы записи наблюдений доступны по ссылке [2]. Эталонный инклинометр работал в диапазоне «В».

## Результаты исследования

Коэффициент корреляции Пирсона между временными рядами ВИМ и Nivel составил 0,9925. Это отражает линейный характер связи между измерением малых углов наклона прототипом и эталоном. Нормированные временные ряды инклинометров представлены на рис. 5.

Таким образом, для оценки разрешающей способности ВИМ достаточно использовать линейную регрессию. При помощи линейной регрессии методом наименьших квадратов оценена разрешающая способность разработанного прототипа, которая составила  $0,3''/\text{пиксель}$ .

Для оценки средней квадратической погрешности измерения углов наклона с помощью ВИМ вычислен массив разностей  $\Delta$  между калиброванным временным рядом ВИМ и временным рядом эталона. Статистика теста Шапиро–Уилка для массива разности составила 0,9925, P-value: 0,3613. Таким образом, нельзя отвергнуть нулевую гипотезу о соответствии функции распределения массива раз-

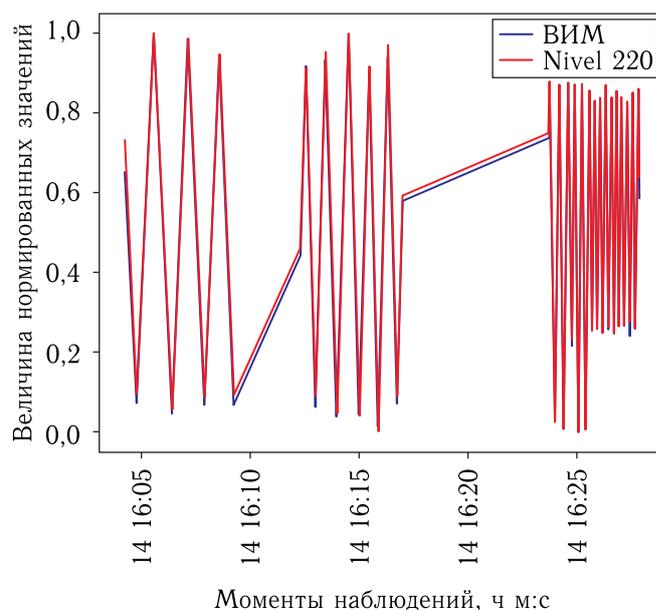


Рис. 5. Нормированные временные ряды измерений малых углов наклона прототипом ВИМ и Leica Nivel 220

ностей  $\Delta$  нормальному. Гистограмма распределения разностей представлена на рис. 6. СКП разности на всем протяжении временного ряда составила  $1,52''$ . Гипотеза о равенстве нулю математического ожидания для ряда  $\Delta$  не отвергается. Значение статистики —  $1,7 \cdot 10^{-14}$ , P-value: 0,9999. Python-скрипт с результатами представленных расчетов можно найти по ссылке [9].

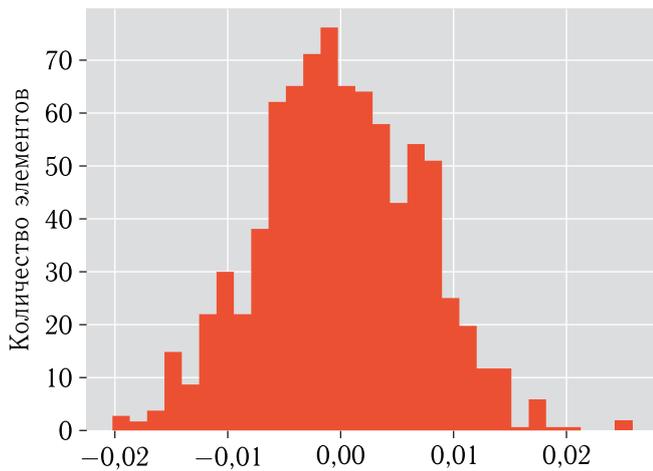


Рис. 6. Гистограмма распределения разностей  $\Delta$

## Обсуждение

По результатам проведенного эксперимента можно сделать заключение, что разработанная методика определения малых углов наклона при помощи видеоинклинометра работоспособна. Оценка разрешающей способности устройства выше цены деления уровня ( $0,3''$  против  $4''$ ). Средняя квадратическая погрешность ВИМ стабильна на всем протяжении диапазона измеряемых наклонов. На это указывает то, что разность калиброванного временного ряда ВИМ и Nivel имеет функцию распределения, близкую к нормальной, а математическое ожидание близко к нулю. Оценка средней квадратической погрешности прототипа ВИМ близка к СКП эталона Nivel 220 и составляет  $1,5''$  при температуре воздуха  $25,5^\circ$ .

Разработанный ВИМ может использоваться в качестве замены промышленному образцу Leica Nivel 220 в условиях комнатных температур. При этом разрешающую способность ВИМ можно увеличивать за счет использования камер с большим угловым разрешением. Диапазон измерения углов наклона можно увеличивать за счет увеличения длины колбы или использования изогнутых цилиндрических колб.

Внедрение промышленных образцов высокочувствительных цифровых инклинометров на основе ВИМ в перспективе позволит снизить стоимость оборудования для выполнения геодезического мониторинга.

На следующих этапах исследований планируется изучить возможность использования ВИМ в условиях низких температур с компенсированными ампулами (АЦК) и устойчивыми к низким температурам малобюджетными камерами. Также планируется изучить возможность использования ВИМ в качестве датчика низкочастотных колебаний инженерных сооружений.

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

## Список литературы

1. Хиллер Б. Цифровые инклинометры в системах автоматизированного геодезического мониторинга деформаций // Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка, 2015, № 6.
2. Digital Buble-level A. Mareev — Hosted on the Open Science Framework. <https://osf.io/pd9kj/> (Дата обращения 25.06.2023.).
3. Razali N. M., Wah Y. B. Power comparisons of some selected normality tests. Text: direct // Proceedings of the Regional Conference on Statistical Sciences 2010. 2010.
4. AN 1000: Electrolytic Tilt Sensor Excitation. <https://www.frederickscompany.com/application-notes/application-note-1000-electrolytic-tilt-sensor-excitation/> (Дата обращения 25.06.2023.)
5. OpenCV.Homepage — OpenCV provides a real-time optimized Computer Vision library, tools, and hardware. It also supports model execution for Machine Learning (ML) and Artificial Intelligence (AI). <https://opencv.org/> (Дата обращения 25.06.2023.)
6. Карпик А. П. и др. Способ высокоточного определения углов наклона контролируемого объекта, инженерного или природного, при геодезическом мониторинге посредством технологии компьютерного зрения в режиме реального времени в условиях экстремально низких температур окружающей среды и устройство для его осуществления: № 2022132087; заявлено: 08.12.2022; опубликовано: 2022, заявитель СГУГиТ.

7. 0719-3705-99  $\pm 10^\circ$  Single-Axis Electrolytic Tilt Sensor Fredericks. <https://www.frederickscompany.com/products/encapsulated-0719-3705-99/#ordering-information/> (Дата обращения 25.06.2023.)
8. Датчик угла наклона Leica Nivel210/220 Leica Geosystems. [https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/systems/geotechnical-sensors/leica-nivel210\\_220](https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/systems/geotechnical-sensors/leica-nivel210_220) (Дата обращения 25.06.2023.)
9. Скрипт тестирования видеоинклинометра А. Марева. <https://gist.github.com/ArtemMareev/4460b9bd5d082bf7fdb30f5883b80096> (Дата обращения 25.06.2023.)
10. ГОСТ 2386-73. Ампулы уровней. Технические условия (с изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). 23 с.
11. Как дорого обойдется экономике повышение температур и таяние льдов в Арктике. <https://rg.ru/2021/11/07/kak-dorogo-obojdetsia-ekonomike-povyshenie-temperatur-i-taianie-ldov-v-arktike.html> (Дата обращения 25.06.2023.)
12. МИ БГЕИ 07-90 Методика института. Нивелиры. Методика поверки / 07 90. 54 с.
13. OpenCV: Structural Analysis and Shape Descriptors. findContours. [https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group\\_\\_imgproc\\_\\_shape.html#ga17ed9f5d79ae97bd4c7cf18403e1689a](https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga17ed9f5d79ae97bd4c7cf18403e1689a) (Дата обращения 25.06.2023.)

Дата поступления рукописи  
в редакцию 07.04.2023

Дата принятия рукописи  
в печать 01.08.2023