

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЯЕМЫХ НАКЛОНОВ ДЛЯ МАЛОБЮДЖЕТНОГО ЦИФРОВОГО ВИДЕОИНКЛИНОМЕТРА

В статье представлены результаты исследования, направленного на расширение диапазона рабочих наклонов малобюджетного цифрового видеоинклинометра. Видеоинклинометр представляет собой устройство для измерения малых углов наклона относительно горизонта с точностью до секунды. В приборе в качестве чувствительного элемента используются цилиндрические уровни, а в качестве детектора – цифровые видеокамеры. Установлено, что с помощью модуля ESP32-CAM, цилиндрической спиртовой ампулы уровня с ценой деления 30" и длиной 64 мм можно реализовать чувствительную систему инклинометра, характеризующуюся погрешностью единичного измерения 2,5" в диапазоне $\pm 200''$, 3" – в диапазоне $\pm 400''$ и 11" на диапазоне $\pm 600''$, что близко к характеристикам коммерческих высокоточных цифровых инклинометров, используемых в геодезии. Предложенная конструкция видеоинклинометра позволит существенно снизить стоимость систем наблюдений для геодезического мониторинга, что в свою очередь позволит повысить доступность и информативность инструментального контроля.

Ключевые слова: инклинометр, видеоинклинометр, датчик наклона, геодезический мониторинг, цилиндрический уровень

Введение

Непрерывный контроль за структурной целостностью зданий и сооружений является важным элементом обеспечения их безопасной эксплуатации. Контроль особенно важен для тех конструкций, целостность которых обеспечивает сопровождение потенциально опасных для окружающей среды производственных процессов, например, таких как добыча и транспортировка полезных ископаемых.

Мареев Артем Владимирович. Кандидат технических наук, доцент, кафедра космической и физической геодезии; старший научный сотрудник FEFS-2023-0003, Сибирский государственный университет геосистем и технологий.

Янгальшев Валентин Рамильевич. Аспирант, кафедра космической и физической геодезии; инженер FEFS-2023-0003, Сибирский государственный университет геосистем и технологий.

Макеев Александр Викторович. Старший преподаватель, кафедра специальных устройств, инноватики и метрологии; научный сотрудник FEFS-2023-0003, Сибирский государственный университет геосистем и технологий.

Мамаев Даниил Станиславович. Аспирант, кафедра космической и физической геодезии; инженер FEFS-2023-0003, Сибирский государственный университет геосистем и технологий.

Долин Сергей Владимирович. Кандидат технических наук, доцент, кафедра космической и физической геодезии, младший научный сотрудник, НИИ стратегического развития; научный сотрудник FEFS-2023-0003, Сибирский государственный университет геосистем и технологий.

Однако повсеместное применение геодезического мониторинга сдерживается высокой стоимостью необходимого оборудования и программного обеспечения. Можно выделить три типа основных средств измерений для реализации систем наблюдений – ГНСС-приемники, роботизированные тахеометры и цифровые инклинометры – все они обеспечивают высокую точность геодезических измерений, но цена их остается достаточно высокой. Расширение возможностей применения геодезического мониторинга в процессе контроля за структурной целостностью зданий и сооружений требует повышения доступности измерительных средств. Для этого необходимо, чтобы современные геодезические приборы могли интегрироваться в перспективные системы «умного дома», что возможно лишь при значительном снижении их стоимости и упрощении технологий мониторинга.

Научное сообщество уже достигло значительного прогресса в этом направлении. Так, в работах [1, 2] продемонстрирована принципиальная возможность использования малобюджетных ГНСС-приемников и антенн для слежения за деформациями зданий, сооружений и земной поверхности. Кроме того, создаются малобюджетные устройства, позволяющие увеличивать плотность сети ГНСС-станций [3]. Разрабатывается программный комплекс с открытым исходным кодом DABAMOS для выполнения мониторинга с использованием геодезического оборудования; в текущей версии имеется поддержка некоторых моделей роботизированных тахеометров, цифровых инклинометров, датчиков температуры и влажности [4]. Среди перспективных направлений – использование фотограмметрических методов и технологий компьютерного зрения для создания доступных и эффективных систем геодезического мониторинга [4, 5]. Отметим при этом, что фотограмметрические технические и программные средства обладают большой гибкостью: они позволяют отслеживать пространственные перемещения объектов контроля на коротких расстояниях, измерять наклоны объектов мониторинга, отслеживать их поверхностные деформации, а также колебания с малыми амплитудами. При этом использование промышленных цифровых камер, которые значительно дешевле профессионального геодезического оборудования, делает эти технологии доступными для массовой реализации. В то же время постоянно совершенствуются и алгоритмы обработки изображений машинного зрения, способствуя повышению эффективности разрабатываемых систем автоматизированного мониторинга.

Особый интерес представляют системы наблюдений, использующие лазерный луч для отслеживания перемещений. Они позволяют измерять величины поступательных и колебательных перемещений объектов контроля с миллиметровой точностью [6–8]. Основные компоненты этих систем – недорогие лазерные указатели и цифровые камеры. Перемещение лазерного луча фиксируется на экране (или матрице) и интерпретируется как изменение положения объекта контроля. Такая комбинация позволяет разрабатывать датчики перемещений, которые могут заменить дорогостоящий роботизированный тахеометр в отдельных задачах контроля за деформациями. Однако для этого требуются установка на референсной точке высокочувствительных датчиков наклона – инклинометров.

Современные инклинометры подразделяются на несколько типов. Приборы с чувствительными элементами типа сервоакселерометр (force balanced servo) [9], обладающие высокой точностью и стабильностью к температурным изменениям, но отличаются высокой стоимостью. Более доступные по цене модели основаны на применении ампул разнообразных форм и наполнений: цилиндрические

уровни, заполненные ртутью; цилиндрические и круглые уровни, залитые электролитом (электролитические уровни). Цифровые электролитические уровни достигают разрешающей способности порядка 1" и обладают низкой чувствительностью к воздействию внешних условий, однако стоимость чувствительного элемента для электролитического уровня 1" с диапазоном рабочих температур от -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$ составляет около 700 евро. В то же время стоимость калиброванного двухосевого цифрового электролитического инклинометра, позволяющего выявлять долгопериодические колебания начинается от 2 000 евро.

Наиболее востребованным цифровым инклинометром в геодезической практике является Leica Nivel 220 от компании Hegsagon [10]. В приборе чувствительным элементом выступает светоотражающая жидкость, что позволяет определять малые углы наклона по изменению угла между поверхностью светоотражающей жидкости и конструкцией прибора. Стоимость устройства начинается от 5000 евро.

В работе [11] представлена конструкция устройства, позволяющего отслеживать поступательные и вращательные перемещения объекта в процессе геодезического мониторинга. В составе прибора используется малобюджетный ГНСС-приемник и малобюджетный цифровой инклинометр, использующий в качестве чувствительного элемента цилиндрический спиртовой уровень. В качестве детектора для регистрации малых углов наклона используется цифровая видеокамера, с помощью которой отслеживается перемещение воздушного пузырька вдоль ампулы уровня. В исследовании [11] показано, что при помощи цилиндрической ампулы уровня с ценой деления 60" и цифровой видеокамеры с разрешением 5 МП можно отслеживать наклоны относительно линии горизонта с погрешностью 7". В работе не было представлено подробного исследования технических характеристик разработанного цифрового инклинометра. С практической точки зрения наибольший интерес представляют диапазоны измеряемых углов наклона и рабочих температур. Известно, что цилиндрические ампулы могут иметь не выявленные дефекты изготовления, проявляющиеся в виде неравномерной выдержки радиуса кривизны на разных участках ампулы, а также шлифовки внутренней поверхности ампулы. Это в свою очередь приводит к тому, что на разных участках ампулы ошибки при измерениях угла наклона могут отличаться. Цилиндрические спиртовые уровни достаточно широко распространены и представлены большим разнообразием форм и технических характеристик. Отметим при этом, что стоимость высокочувствительных ампул (с ценой деления 4") спиртовых уровней составляет около 20 евро. Модули цифровых видеокамер, которые способны работать в широком диапазоне рабочих температур, также можно подобрать со стоимостью порядка 20 евро. Таким образом, принципиально возможно разработать конструкцию малобюджетного прибора с использованием цилиндрического спиртового уровня, цифровых камер, программ компьютерного зрения – видеоинклинометр, позволяющего измерять малые углы наклона с высокой точностью. Гипотеза исследования заключается в том, что малобюджетный видеоинклинометр по рабочему диапазону измеряемых углов наклонов и точности не уступает промышленному образцу цифрового инклинометра, используемого в настоящее время для геодезического мониторинга.

Прототип видеоинклинометра

Прототип малобюджетного цифрового видеоинклинометра (ВИМ) состоит из следующих элементов (рис. 1, 2):

- цилиндрическая спиртовая ампула с ценой деления 30" (0,15 мрад); длина ампулы – 64 мм; мениск ампулы при температуре окружающего воздуха 20 °С имеет длину 20 мм; рабочий температурный диапазон ± 50 °С [14];
- микроконтроллер ESP32-CAM с камерой OV2640; разрешение камеры 1600x1200 пикселей; максимальная скорость передачи данных через преобразование в формат JPEG – 8 кадров/сек [15];
- монтажная шпилька формата 5/8 дюйма;
- фиксатор ампулы из гипсоволокнистого листа, скрепленный с ампулой гипсовым раствором. Ампула размещается относительно камеры таким образом, что пузырек наблюдается в боковой проекции и образует фигуру похожую на параболу (рис. 2, б). Ампула заливается гипсом таким образом, чтобы обеспечить полный обзор краев ампулы;
- датчик температуры DS18B20 (ky-001), погрешность измерения 0,5 °С;
- светодиодная лента (144 диода/м) с акриловым рассеивателем;
- прозрачную пластину из оргстекла, для теплоизоляции уровней.

Выбор взаимного размещения камеры и ампулы обусловлен стремлением расширить диапазон измеряемых углов наклона, а также повысить устойчивость к изменению температуры. Как известно, при понижении температуры объем пузырька увеличивается, что приводит к уменьшению диапазона измеряемых углов наклона.

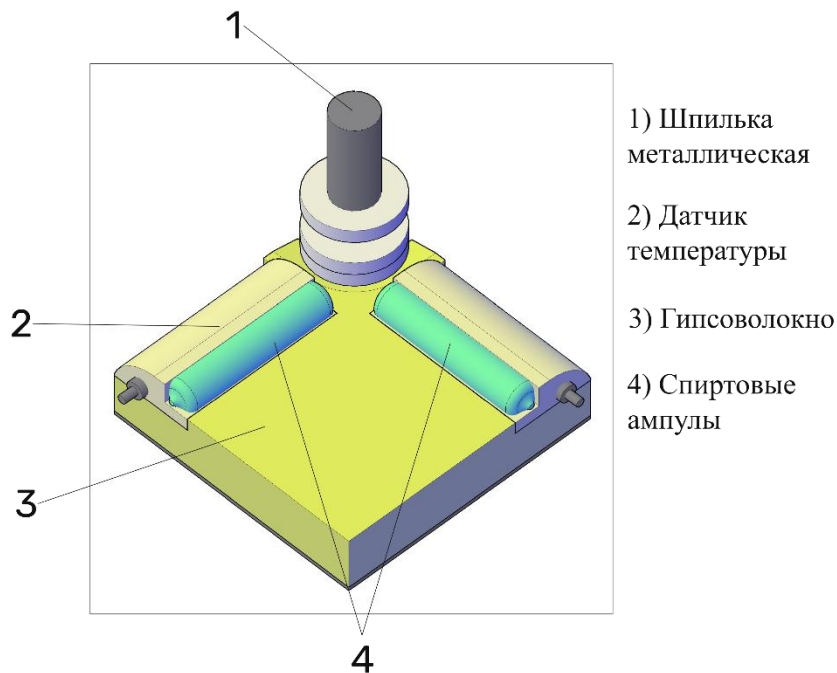


Рис.1 Размещение спиртовых цилиндрических ампул в прототипе ВИМ

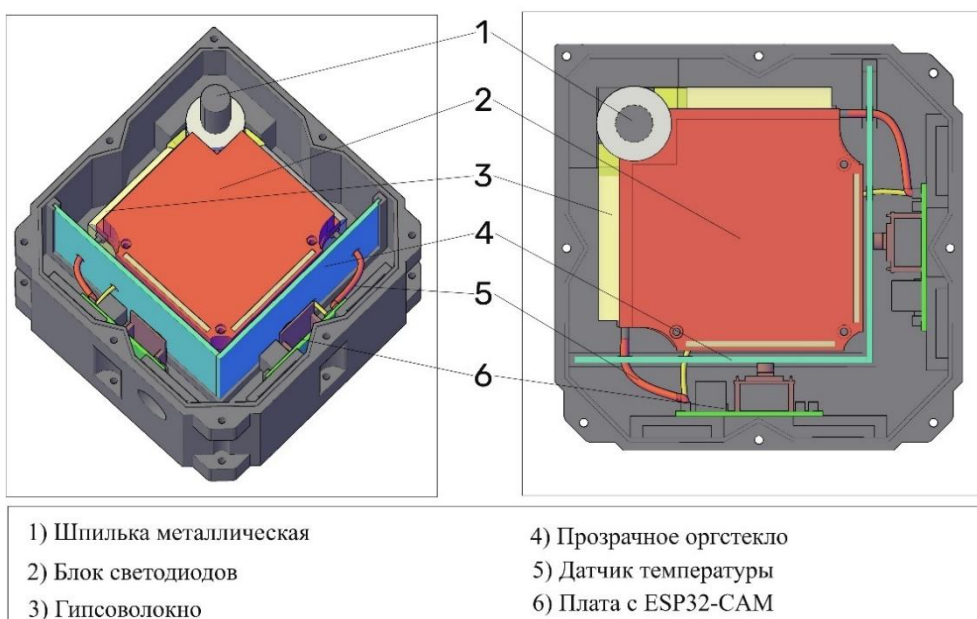


Рис. 2. Схема внутреннего устройства прототипа

Камеры размещаются напротив ампул на расстоянии 7 см. В результате на 1 мм ампулы приходится около 26 пикселей, что соответствует наклону в 0,075 мрад. Следовательно, для калиброванной камеры, потенциальная чувствительность прототипа составляет 5 мкрад (0,6") без учета шумов и внешних воздействий. Корпус прототипа, фиксаторы освещения выполнены при помощи 3D-печати из пластика типа PETG.

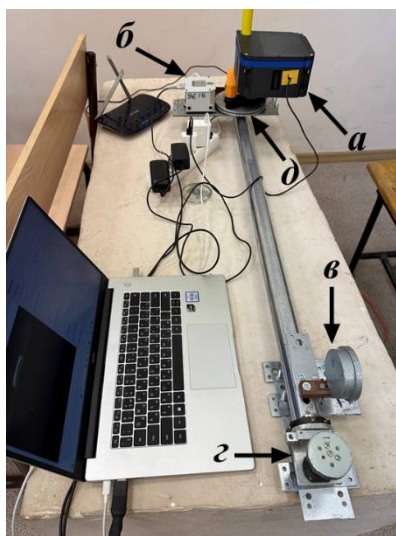


Рис. 3. Экспериментальная установка

Для исследования видеоинклинометра использовался стенд следующей конструкции (рис. 3):

- пилон с независимым фундаментом;
- прототип ВИМ (рис. 3, а);
- цифровой инклинометр Leica Nivel 220, эталон (рис. 3, б);
- индикатор часового типа с ценой деления 0,001 мм и диапазоном измерений 1 мм (рис. 3, в);
- экзаменатор нивелиров с микрометрическим винтом, базой 1 м, позволяющий задавать смещения величиной 10 мкрад (рис. 4, г). При использовании индикатора линейных перемещений чувствительностью 0,001 мм погрешность установки составляет 1 мкрад (0,2");
- трегер с подъемными винтами, шаг которых равен 25 мкрад (5") (рис. 3, д).

В ходе сеансов наблюдений кадры с ВИМ передаются на персональный компьютер. Специальная программа синхронно записывает: величину углов наклона по данным Leica Nivel 220, значения температуры, положение центроиды пузырька (по координатам контура), показания датчика температуры внутри

корпуса прототипа, а также вводимое вручную показание с индикатора часового типа.

Методика исследования

Методика исследования основана на сравнении прототипа малобюджетного видеоинклинометра (ВИМ) с инклинометром промышленного образца, в качестве которого выбран Leica Nivel 220. Согласно технической документации данный прибор обеспечивает погрешность измерения угла наклона – 5 мкрад (1") в диапазоне $\pm 1,5$ мрад (300"), 15 мкрад (3") в диапазоне ± 2 мрад (400") и 50 мкрад (10") в диапазоне ± 3 мрад (600"), а также линейный дрейф нулевой точки $1''/^{\circ}\text{C}$ [9]. Предметом исследования являются: определение рабочего диапазона и точности измерения углов наклона с помощью разработанного прототипа ВИМ.

Оценка точности прототипа выполнялась на основе обработки разностей измеряемых углов наклона Δ_i , определяемых ВИМ и эталонным инклинометром:

$$\Delta_i = C([f(\mathbf{X}_i)]) + c_t^{vim}(t_i^{vim} - t_0^{vim}) - (\alpha_i^{eth} + c_t^{eth}(t_i^{eth} - t_0^{eth})), \quad (1)$$

где $\mathbf{X}_i = \left[[x_i^0, y_i^0, b_i^0], \dots, [x_i^n, y_i^n, b_i^n] \right]$ – массив координат точек, описывающих контур пузырька уровня и яркость отраженного света на границе «воздух-спирт» b_i^0 в момент наблюдения i , n – количество точек в массиве, нотация $[\bullet]$ используется для обозначения массива; $f(\mathbf{X}_i)$ – функция преобразования массива координат точек и яркости контура в группу параметров слежения (предикторов); t_i^{vim}, t_0^{vim} – температура вблизи ампулы на текущий i и начальный моменты соответственно; $C([f(\mathbf{X}_i)])$ – калибровочная функция видеоинклинометра, предназначенная для вычисления угла наклона по изменению параметров движения пузырька и температуры ампулы; α_i^{eth} – угол наклона, зафиксированный в момент наблюдения эталонным инклинометром; c_t^{vim}, c_t^{eth} – коэффициенты линейного дрейфа угла наклона ВИМ и эталонного инклинометра вследствие изменения температуры; t_i^{eth}, t_0^{eth} – температуры, измеренные собственным датчиком эталонного инклинометра в текущий и начальный моменты наблюдений.

В качестве метрик исследования использовались среднеквадратическая погрешность (СКП), средняя погрешность и межквартильный размах (IQR) для массива разностей $[\Delta_i]$ соответственно:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}, \quad IQR = Q_3 - Q_1, \quad (2)$$

где Q_1, Q_3 – первый и третий квартили выборки $[\Delta_i]$.

Показателем соответствия полученной выборки разностей $[\Delta_i]$ нормальному закону распределения послужил статистический тест Шапиро-Уилка. Для краткости индекс текущего момента наблюдений i для вектора $\mathbf{X}$ и его компонент опущен в последующих формулах.

Алгоритм слежения за перемещениями пузырька цилиндрического уровня. Алгоритм слежения за перемещениями пузырька цилиндрического уровня был

реализован на основе библиотеки компьютерного зрения OpenCV [11]. Применялась следующая последовательность шагов: преобразование полученного от цифровой камеры изображения в оттенки серого; пороговая бинаризация (превращает изображение в оттенках серого в бинарное, устанавливается пороговое значение); определение всех контуров бинарного изображения и удаление мелких объектов (задается минимальная площадь объекта); определение наибольшего по площади объекта на изображении; определение координат контура пузырька уровня и запись полученных координат в файл. Схема слежения за пузырьком представлена на рис. 4. Программа определения контура пузырька уровня доступна по следующей ссылке [12].

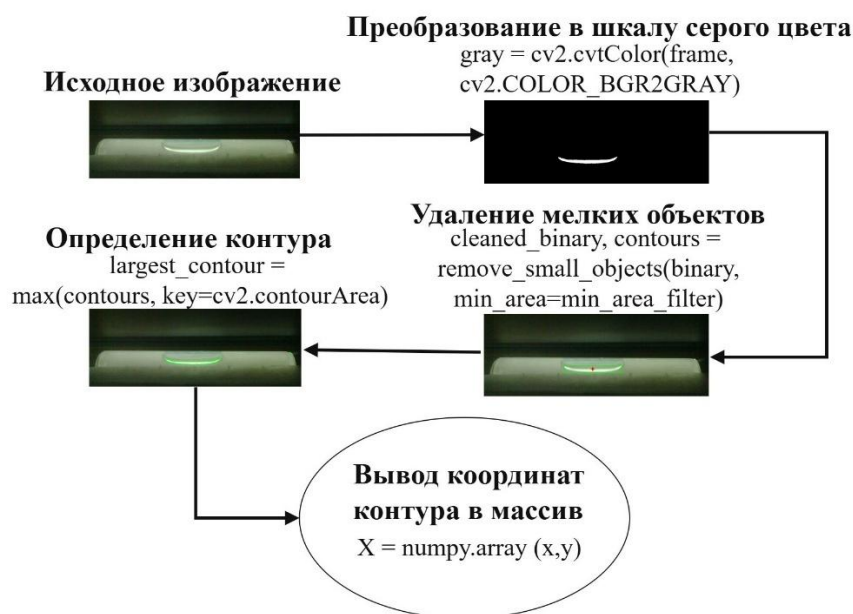


Рис. 4. Условная схема слежения за пузырьком уровня

Для определения угла наклона по изменению мениска пузырька уровня использовался вектор предикторов, вычисляемых через интегральные характеристики координат контура и яркости детектируемого пузырька уровня. Для каждого момента i наблюдений формировался вектор предикторов:

$$[f(\mathbf{X})] = [n(\mathbf{X}), \bar{b}(\mathbf{X}), \bar{x}(\mathbf{X}), \bar{y}(\mathbf{X}), \bar{x}_b(\mathbf{X}), \bar{y}_b(\mathbf{X}) \dots], \quad (3)$$

где каждый элемент – скалярный признак. Всего в исследовании использовалось 26 интегральных предиктора, формулы для каждого из которых приведены в табл. 2 (аппендикс).

Процесс калибровки выполнялся совместно для цифровой камеры и ампулы уровня. На различных участках ампулы использовался собственный набор предикторов из состава $[f(\mathbf{X})]$. Количество диапазонов – 3, аналогично эталонному инклинометру. Выбор границы первого диапазона для ВИМ ($\pm 200''$) был обусловлен длиной используемой ампулы уровня. Границы второго и третьего диапазонов установлены в соответствии с эталонным инклинометром: от $\pm 200''$ до $\pm 400''$ и от $\pm 400''$ до $\pm 600''$.

Рассмотрены два способа калибровки ВИМ. Первый способ основан на методе множественной линейной регрессии (МЛР):

$$C_1([f(\mathbf{X})]) = \beta_0 + \beta_1[f(\mathbf{X})]_1 + \beta_2[f(\mathbf{X})]_2 + \dots + \beta_k[f(\mathbf{X})]_k, \quad (4)$$

где k – индекс последнего предиктора из вектора (3).

Параметры МЛР-модели $\beta = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k]^T$ оценивались из условия формы $\operatorname{argmin}(\|I - A\beta\|^2)$:

$$\hat{\beta} = (AA^T)^{-1} A^T I, \quad I = [I_i]^T; I_i = \alpha_i^{eth} + c_i^{eth}(t_i^{eth} - t_0^{eth}) + c_i^{vim}(t_i^{vim} - t_0^{vim}), \quad (5)$$

где A – соответствующая матрица коэффициентов системы уравнений, элементы которой строятся на основе предикторов (3).

Второй способ калибровки основан на методе градиентного бустинга решающих деревьев GBDT (Gradient Boosting Decision Tree). Не для всех предикторов связь с углом наклона является линейной. Например, координата центроиды нелинейно зависит от смещения из-за дисторсии камеры; связь между температурой и дрейфом нулевой точки может проявляться в виде явления гистерезиса. Для расчетов использовалась реализация метода в библиотеке CatBoost. Модель калибровки имеет следующий вид:

$$C_2([f(\mathbf{X})]) = a_l(B) = a_1(B) + \eta a_1(B) + \dots + \eta a_l(B) \quad (6)$$

где $a_l(B)$ – ансамбль базовых алгоритмов из ансамбля K моделей; η – гиперпараметры модели GBDT библиотеки CatBoost; $a_1(B) = C_1([f(\mathbf{X})])$ – начальное приближение модели (4), (5). Параметры модели (6) подбирались путем минимизации показателя среднеквадратической ошибки. В процессе обучения использовался следующий набор гиперпараметров η : темп обучения (learning_rate), глубина алгоритма решающих деревьев (depth), регуляризационный коэффициент (l2_leaf_reg). Подбор гиперпараметров модели (6) выполнен с помощью стандартной библиотеки Optuna. Качество модели оценивалось при помощи стандартных инструментов библиотеки CatBoost, методом кросс-валидации hold-out. Набор предикторов для GBDT модели дополнительно расширялся путем включения непосредственно вектора $\mathbf{X}$ и вектора значений температуры ампулы, а также температуры окружающего воздуха.

Коэффициент чувствительности c^{vim} определялся методом линейной регрессии только по x – координате центроиды в окрестности нуль-пункта ампулы в отдельном сеансе наблюдений без смещения.

Эксперимент состоял из четырех этапов:

- калибровка эталонного инклинометра с помощью индикатора часового типа по методике производителя (в диапазоне $\pm 0,5$ мрад);
- запись сеанса для калибровки прототипа ВИМ;
- запись тестового сеанса измерений для проверки моделей калибровки;
- запись сеанса для оценки величины собственного дрейфа нулевой точки от самонагрева.

Записи тестового и калибровочного сеансов выполнялись следующим образом. Инклинометры Leica Nivel 220 и ВИМ были жестко закреплены на экзаменаторе поперек базы. Между приборами был задан начальный разбег,

обусловленный особенностями диапазона измерений Leica Nivel 220: минимальная погрешность (1") достигается в пределах $\pm 300''$.

Перед началом измерений ВИМ и индикатор часового типа устанавливались в нулевое положение, тогда как Leica Nivel 220 был предварительно настраивался на угол – $300''$. Далее последовательно задавались наклоны с помощью подъемного винта экзаменатора с шагом 0,05 мм по показаниям индикатора часового типа ($10''$). После каждого перемещения система выдерживалась в течение 10–15 с для стабилизации показаний.

Когда показания индикатора часового типа достигали предельного значения 1 мм (что соответствует $200''$), выполнялась перестановка: положения ВИМ и Leica Nivel 220 оставались неизменными, в то время как индикатор часового типа возвращался в нулевое положение (0 мм) для продолжения измерений.

Все исходные записи эксперимента доступны по следующей ссылке [16]. Скрипт вычислений для реализации методики исследования доступен по ссылке [17].

Результаты исследования

В результате исследования установлено, что при помощи цилиндрической ампулы уровня по ГОСТ с ценой деления $30''$ и длиной 64 мм, а также цифровой видеокамеры с разрешением 2 Мпикс можно реализовать инклинометр с диапазоном измеряемых углов наклона, сопоставимым с характеристиками коммерческого прибора Leica Nivel 220.

Эмпирически определен перечень наиболее информативных предикторов для различных диапазонов наклонов относительно горизонта:

- для диапазона 0– $200''$ – x -координата геометрической центроиды (табл. 2, предиктор 3);

- для диапазона 200– $400''$ – x -координата центроиды, взвешенной по яркости, и показатель компактности выпуклой оболочки (табл. 2, предикторы 5 и 7 соответственно);

- для диапазона 400– $600''$ – x - и y - координаты центроиды, взвешенной по яркости, и ориентация эллипса рассеяния (табл. 2, предикторы 5, 6 и 12 соответственно).

Также были рассчитаны коэффициенты чувствительности к температуре и дрейфа нулевой точки для прототипа ВИМ. Установлено, что смещение нулевой точки (это дрейф нуля в приборах, может быть, дрейф пузырька уровня с точки нуля-пункта) составляет около $4''/^{\circ}\text{C}$. Среднеквадратическая погрешность оценки коэффициента чувствительности равна $1,4''/^{\circ}\text{C}$, а оценка на основе половины межквартильного размаха – $0,7''/^{\circ}\text{C}$. В ходе калибровочного сеанса температура ампулы повысилась на 3°C .

Во всех тестовых сеансах изменение температуры не превышало $0,5^{\circ}\text{C}$, однако в калибровочных достигало $1,8^{\circ}\text{C}$ (в диапазоне 0– $200''$). Температура воздуха в лаборатории (по данным датчика температуры Leica Nivel 220) в течение всех сеансов изменялась не более чем на 1°C – как в калибровочном, так и в тестовом режиме.

Общий бюджет ошибок калибровки ВИМ можно оценить из разрешающей способности камеры ($0,6''$), ошибки эталона Leica Nivel 220 ($1''$) и ошибки коэффициента дрейфа нулевой точки по температуре ($0,7''/^{\circ}\text{C}$). С учетом изменения

температуры в ходе эксперимента на 1,8 °С, дополнительная погрешность может достигать 1,3". В результате суммарная априорная погрешность калибровки ВИМ достигает 1,7" для центрального диапазона (0–200").

Точность измерения углов наклона, достигнутая разработанным прототипом в диапазоне $\pm 200''$ методом калибровки на основе множественной линейной регрессии (МЛР), составила порядка 3" (по половине интервала IQR). Это примерно в 2 раза грубее ранее представленного прототипа [18], однако диапазон рабочих наклонов при этом был увеличен в 8 раз – с $\pm 25''$ до $\pm 200''$ в центральной области (табл. 1). Снижение точности главным образом обусловлено использованием менее чувствительной ампулы (30" против 4") и камерой с меньшим угловым разрешением. Полученная оценка точности измерения углов наклона при помощи прототипа ВИМ укладывается в удвоенную априорную оценку точности (3,4").

Для диапазонов 200–400" и 400–600" оценка точности по тестовым сеансам при использовании МЛР получила значения IQR/2, равные 7,81" и 22,45" соответственно.

Применение метода градиентного бустинга решающих деревьев (GBDT) в качестве калибровочной модели позволило существенно снизить погрешность на диапазонах 200–400" и 400–600" – практически в 2 раза по сравнению с МЛР (IQR/2 = 3,00" и 10,85" соответственно). Однако в диапазоне 0–200" наблюдалось понижение точности: IQR/2 возрос до 4,79".

При построении калибровочной модели GBDT использовался полный набор предикторов, включая непосредственно координаты контура пузырька уровня, при этом лишь небольшая часть предикторов была автоматически отсеяна в ходе обучения средствами встроенных инструментов библиотеки CatBoost.

Таблица 1

Основные результаты эксперимента, тестовый сеанс

Диапазон, " (метод калибровки)	$\bar{\Delta}$, "	σ , "	Тест Шапиро-Уилка, статистика	Тест Шапиро-Уилка, P-value	IQR/2, "	Медиана, "
0–200 (МЛР)	– 1,54	3,60	0,97	1,78E-5	2,45	– 0,94
200–400 (МЛР)	– 0,22	13,20	0,96	1,17e-07	7,81	1,22
400–600 (МЛР)	0,19	31,81	0,99	0,034	22,45	0,07
0–200 (GBDT)	– 2,29	8,24	0,90	5,42e-13	4,79	– 2,38
200–400 (GBDT)	– 1,44	6,19	0,96	4,8e-07	3,00	– 0,38
400–600 (GBDT)	1,66	14,44	0,98	1,26 e-03	10,85	0,70

В процессе обработки не применялась предварительная фильтрация выбросов. Поскольку полученные выборки ошибок калибровки ВИМ отклоняются от нормального, то в качестве основного показателя точности использована половина межквартильного размаха (IQR/2), характеризующая интервал, в котором лежат 50 % отклонений относительно медианы, которая отражает систематическую составляющую ошибки (рис. 5).

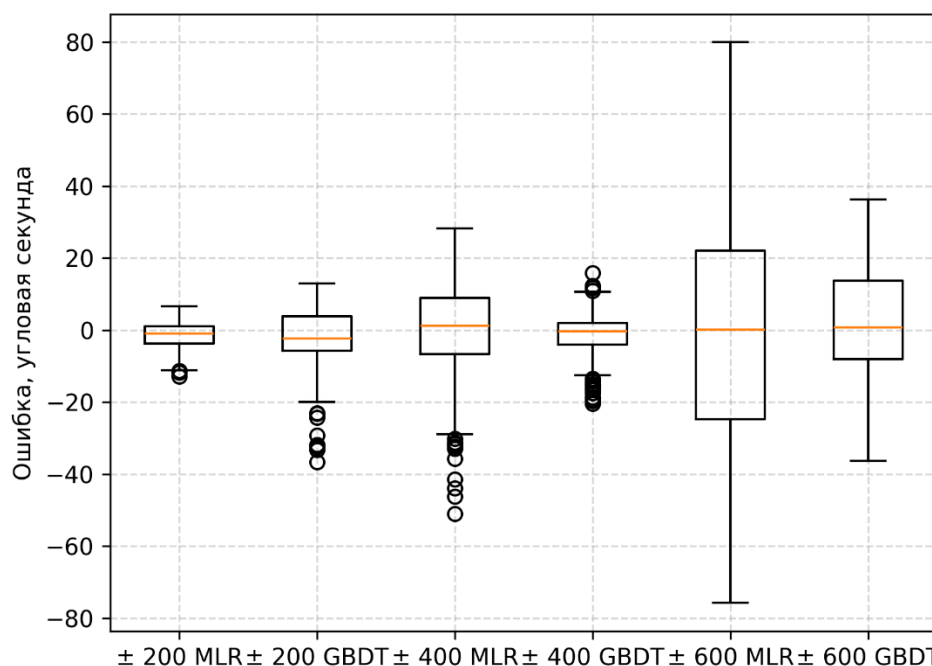


Рис. 5. Блочные диаграммы распределения ошибок калибровки ВИМ методом МЛР и GBDT

Таким образом, оптимальной для ВИМ представляется комбинированная калибровочная модель, в которой: в диапазоне 0–200" используется МЛР по предложенным набору предикторов, а для последующих диапазонов – GBDT. Это обеспечит точность определения угла наклона относительно горизонта в диапазонах: 0–200" $\approx 2,5''$; 200–400" $\approx 3''$; 400–600" $\approx 11''$.

Обсуждения

Предложенная конструкция чувствительного элемента видеоинклинометра – с боковой проекцией ампулы относительно камеры и использованием в качестве предикторов комбинации геометрических характеристик контура пузырька и характеристик яркости отраженного света на границе раздела «спирт–воздух» – позволила приблизить рабочий диапазон и точность видеоинклинометра к характеристикам промышленных цифровых инклинометров.

Для полного соответствия техническим характеристикам прибора Leica Nivel 220 потребуется увеличить длину используемой ампулы на 30 % (при сохранении радиуса кривизны) и использовать камеры с разрешением выше 8 Мп. При этом потенциальная чувствительность может быть существенно повышена – например, за счет применения ампул Талькотта с ценой деления $\sim 1''$ и линейных матриц с оптическим разрешением порядка 6400 dpi, что позволит достигнуть чувствительности порядка тысячной доли угловой секунды при использовании системы активной термостабилизации.

Прибор можно колоцировать со средствами линейных измерений (например, с лазерными дальномерами), что позволит в режиме реального времени оценивать изменения превышений между точками и автоматизировать процедуры высокоточного геометрического нивелирования. Это существенно расширит сферу применения высокоточного геодезического мониторинга за счет повышения

доступности измерительных средств и увеличит информативность систем наблюдений.

Технические характеристики прибора могут быть дополнительно улучшены за счет применения термокомпенсированных ампул (с компенсационной стеклянной колбой), в которых видимый размер пузырька сохраняется при изменении температуры. Это расширит рабочий температурный диапазон – вплоть до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как, например, для Leica Nivel 220 он ограничивается $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Следует указать и на ограничения выполненного исследования:

- в эксперименте изучен только один (левый) участок ампулы – от 0 до $600''$. Это обусловлено ограничениями эталонного инклинометра (Leica Nivel 220), имеющего собственный диапазон $\pm 600''$, предполагается, что правая часть ампулы должна калиброваться отдельно при повторении предложенной схемы;

- требует дальнейшего углубленного изучения влияние изменения температуры на чувствительный элемент, а также смещение положения камеры (в том числе, вызванное термодформациями корпуса), что может проявляться в виде дополнительного дрейфа нуля-пункта. Планируется преодолевать указанную проблему за счет автоматической перекалибровки положения камеры с использованием встроенного тест-объекта и соответствующих алгоритмов компьютерного зрения.

Потенциальное повышение точности для представленной конструкции возможно за счет:

- увеличения числа поддиапазонов и локального подбора наиболее информативных предикторов;

- использования алгоритмов «субпиксельной» точности распознавания координат контура мениска;

- использования регрессионных моделей, устойчивых к шумам предикторов;

- оптимизации границ диапазонов измеряемых наклонов.

Потенциально возможно дальнейшее расширение диапазона измерений за пределы диапазона $\pm 600''$ – с допускаемой погрешностью измерения углов наклона порядка $15\text{--}20''$ для данной разработанной конструкции.

С точки зрения конструктивных и аппаратных изменений предполагается оптимизация конструкции освещения уровней с целью снижения теплового нагрева от работающих светодиодов, установка тест-объекта в поле зрения камеры инклинометра для компенсации собственного дрейфа позиции камеры.

В дальнейшем также планируется оптимизация алгоритмов обработки изображений непосредственно на модуле ESP32 с целью снижения энергопотребления, а также интеграция специализированного сопроцессора для реализации процедур компьютерного зрения и калибровки на самом датчике.

В текущей реализации система функционирует только в связке с удаленным сервером: исходные видеокадры передаются по Wi-Fi в реальном времени. Такая архитектура накладывает существенные ограничения:

- дальность беспроводной передачи без направленных антенн остается ограниченной;

- надежность системы становится зависимой не только от датчика, но и от стабильности сетевой инфраструктуры;

– альтернативные низкоэнергетические каналы связи (например, LoRa) не обеспечивают достаточной пропускной способности для передачи полноразмерных кадров.

В то же время централизованная обработка имеет важное преимущество: накопление и последующий анализ архивов видеоизображений с множества инклинометров на сервере открывает дополнительные возможности для повышения эффективности алгоритмов геодезического мониторинга – например, за счет совершенствования алгоритмов распознавания движений мениска пузырька уровня.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Zhang L., Stange M., Schwieger V. Automatic low-cost GPS monitoring system using WLAN communication. – С. 17.
- 2 Yigit C. O., El-Mowafy A., Dindar A. [et al.] Investigating performance of high-rate GNSS-PPP and PPP-AR for structural health monitoring: dynamic tests on shake table // Journal of Surveying Engineering. – 2021. – Т. 147, № 1. – С. 05020011. – DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000343.
- 3 Curone D., Savarese G., Antonini M. [et al.] An innovative low-power, low-cost, multi-constellation geodetic-grade global navigation satellite system reference station for the densification of permanent networks: the GREAT project // Sensors. – 2023. – Т. 23, № 13. – С. 6032. – DOI: 10.3390/s23136032.
- 4 Zhuang Y., Chen W., Jin T. [et al.] A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments // Sensors. – 2022. – Т. 22, № 10. – С. 3789. – DOI: 10.3390/s22103789.
- 5 Ferraris C., Amprimo G., Pettiti G. Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications // Signals. – 2023. – Т. 4, № 3. – С. 539–574. – DOI: 10.3390/signals4030029.
- 6 Brown N., Schumacher T., Vicente M. Evaluation of a novel video- and laser-based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2021. – Т. 11. – С. 1–17. – DOI: 10.1007/s13349-020-00450-z.
- 7 Artese S., Achilli V., Zinno R. Monitoring of Bridges by a Laser Pointer: Dynamic Measurement of Support Rotations and Elastic Line Displacements: Methodology and First Test // Sensors. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 338. – DOI: 10.3390/s18020338.
- 8 Han Y., Wu G., Feng D. Structural modal identification using a portable laser-and-camera measurement system // Measurement. – 2023. – Т. 214. – С. 112768. – DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112768.
- 9 Leica Nivel210/220 Inclination Sensor [Электронный ресурс] // Leica Geosystems. – URL: https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/systems/geotechnical-sensors/leica-nivel210_220 (2025-10-23).
- 10 Artese G., Perrelli M., Artese S. [et al.] POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests // Sensors. – 2015. – Т. 15, № 5. – С. 10806–10824. – DOI: 10.3390/s150510806.
- 11 OpenCV. Homepage [Электронный ресурс]. – URL: <https://opencv.org/> (2025-06-25).
- 12 DoubleCitizen. Inklinometer [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://github.com/DoubleCitizen/Inklinometer> (2025-06-25).
- 13 CatBoost [Электронный ресурс]. – URL: <https://catboost.ai/en/docs/> (2024-09-06).
- 14 ГОСТ 2386-73. Ампулы уровней. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). – 23 с.
- 15 ESP32-CAM Module [Электронный ресурс] / AI-Thinker. – URL: <https://iarduino.ru/lib/78eba891fa500cedb3b7a5641d82ce74.pdf> (2024-07-12).
- 16 OSF. Digital Bubble-level [Электронный ресурс]. – URL: <https://osf.io/pd9kj/> (2025-09-25).

17 Скрипт вычислений для оценки точности видеоинклинометра [Электронный ресурс] / А. В. Mareev, V. R. Yangalishev, S. V. Dolin // Gist. – URL: <https://gist.github.com/ArtemMareev/883771561dfb52aa209d736133872007> (2025-12-08).
 18 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.

Аппендикс

Таблица 2

Состав вектора интегральных предикторов для калибровки ВИМ

Номер	Название предиктора	Формула
1	Количество точек контура	$n(\mathbf{X}) = \text{len}(\mathbf{X})$
2	Средняя яркость	$\bar{b}(\mathbf{X}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j$, где j – индекс текущей точки контура пузырька уровня
3; 4	Центроида по контуру	$\bar{x}(\mathbf{X}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$; $\bar{y}(\mathbf{X}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$
5; 6	Центроид, взвешенный по яркости	$\bar{x}_b(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{j=1}^n x_j b_j}{\sum_{j=1}^n b_j}$, $\bar{y}_b(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{j=1}^n y_j b_j}{\sum_{j=1}^n b_j}$
7	Компактность выпуклой оболочки	$r_1 = \frac{4\pi \cdot S_{c.p.}}{P_{c.p.}^2}$, где $S_{c.p.}(x_j, y_j)$ – площадь выпуклой оболочки для контура пузырька, вычисляется по формуле Гаусса; $P_{c.p.}(x_j, y_j)$ – периметр многоугольника. Координаты выпуклого многоугольника вычисляются стандартной программой ConvexHull из модуля <code>scipy.spatial</code>
8	Отношение ширины к высоте охватывающего прямоугольника	$r_2 = \frac{\max(x_j) - \min(x_j)}{\max(y_j) - \min(y_j)}$
9	Плотность точек в выпуклой оболочке	$\rho = \frac{n}{S_{c.p.}}$
10	Круглость контура (коэффициент формы)	$r_3 = \frac{4\pi \cdot S_{c.p.}}{P^2}$, где $P = \sum_{j=1}^n \ \mathbf{p}_{j+1} - \mathbf{p}_j\ $ длина ломанной, соединяющей координаты точек контура пузырька $\mathbf{p} = (x_j, y_j)$
11	Диагональ ограничивающего прямоугольника	$d = \sqrt{(\max(x_j) - \min(x_j))^2 + (\max(y_j) - \min(y_j))^2}$
12	Ориентация эллипса рассеяния (аппроксимация направления)	$r_4 = \arctan\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)$, где $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_j - \bar{x})^2}$, $\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_j - \bar{y})^2}$
13	Асимметрия распределения яркости	$r_5 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{b_j - \bar{b}}{\sigma_b}\right)^3$, где $\sigma_b = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (b_j - \bar{b})^2}$

14	Среднее значение профиля	$\bar{X} = \frac{1}{3n} \left(\sum_{j=1}^n x_j + \sum_{j=1}^n y_j + \sum_{j=1}^n b_j \right)$
15	Стандартное отклонение профиля	$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{3n} \left[\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{X})^2 + \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{X})^2 + \sum_{j=1}^n (b_j - \bar{X})^2 \right]}$
16	Минимальное значение профиля	$X_{\min} = \min \{ x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n, b_1, \dots, b_n \}$
17	Максимальное значение профиля	$X_{\max} = \max \{ x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n, b_1, \dots, b_n \}$
18	Размах профиля	$R_X = X_{\max} - X_{\min}$
19	Асимметрия (скошенность)	$\gamma_1 = \frac{1}{3n} \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{x_j - \bar{X}}{\sigma_X} \right)^3 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{y_j - \bar{X}}{\sigma_X} \right)^3 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{b_j - \bar{X}}{\sigma_X} \right)^3 \right]$
20	Экссесс (избыточный)	$\gamma_2 = \frac{1}{3n} \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{x_j - \bar{X}}{\sigma_X} \right)^4 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{y_j - \bar{X}}{\sigma_X} \right)^4 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{b_j - \bar{X}}{\sigma_X} \right)^4 \right] - 3$
21	Первое значение профиля	$X_{\text{first}} = x_1$
22	Последнее значение профиля	$X_{\text{last}} = b_n$
23	Разность между краями профиля	$\Delta X_{\text{ends}} = b_n - x_1$
24	Доля ненулевых точек	$\rho_0 = \frac{1}{3n} \left(\sum_{j=1}^n \mathbb{I}(x_j \neq 0) + \sum_{j=1}^n \mathbb{I}(y_j \neq 0) + \sum_{j=1}^n \mathbb{I}(b_j \neq 0) \right)$
25	Скользящее среднее по последним ($w = \min(10, 3n)$) точкам	$\bar{X}_{\text{roll}} = \frac{1}{w} \left(\underbrace{\sum_{j=n-w_3+1}^n b_j}_{\text{последние } w_3 \text{ яркостей}} + \underbrace{\sum_{j=n-w_2+1}^n y_j}_{\text{затем } w_2 \text{ Y-координат}} + \underbrace{\sum_{j=n-w_1+1}^n x_j}_{\text{затем } w_1 \text{ X-координат}} \right),$ где $(w_3 = \min(w, n))$, $(w_2 = \min(w - w_3, n))$, $(w_1 = w - w_3 - w_2)$ распределения окна по концу объединенного профиля
26	Скользящее стандартное отклонение	$\sigma_{X, \text{roll}} = \sqrt{\frac{1}{w} \left[\sum_{j \in J_b} (b_j - \bar{X}_{\text{roll}})^2 + \sum_{j \in J_y} (y_j - \bar{X}_{\text{roll}})^2 + \sum_{j \in J_x} (x_j - \bar{X}_{\text{roll}})^2 \right]}, \text{ где } J_b, J_y, J_x \text{ индексы точек из последних } w \text{ позиций}$

Mareev A.V., Yangalyshev V.R., Makeev A.V., Mamaev D.S., Dolin S.V. (Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk)
Extending the measurement range of a low-cost digital video inclinometer

Abstract. The paper reports on a research effort to extend the measurable tilt range of a low-cost digital video inclinometer. The video inclinometer is a device for measuring small tilt angles relative to the horizontal plane with an accuracy on the order of arcseconds. The instrument employs cylindrical spirit levels as sensitive elements and digital video cameras as detectors. Experiments show that a sensitive inclinometer system can be built using an ESP32-CAM module and a 64-mm cylindrical alcohol vial with 30" scale division, achieving single-measurement uncertainties of 2.5" ($\pm 200''$ range), 3" ($\pm 400''$), and 11" ($\pm 600''$) – performance comparable to high-precision commercial digital inclinometers employed in geodetic applications. The developed video inclinometer design significantly reduces the cost of observation systems for geodetic monitoring, thereby increasing the accessibility and informativeness of instrumental monitoring.

Key words: inclinometer, video inclinometer, tilt sensor, geodetic monitoring, cylindrical spirit level