

УДК 528.482: [69:004]

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-33-42>

Исследование точности прототипа малобюджетного цифрового датчика слежения за вертикальными смещениями на основе алгоритмов компьютерного зрения

А. В. Мареев¹✉, М. А. Попков¹, В. Р. Янгальшев¹, Д. С. Мамаев¹

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

e-mail: a.v.mareev@sgugit.ru ⁴

Аннотация. В статье представлено исследование разрабатываемого в лаборатории автоматического геодезического мониторинга СГУГиТ прототипа малобюджетного высокоточного цифрового датчика вертикальных перемещений. Датчик представляет собой колокацию полупроводникового лазера и видеоинклинометра, размещаемых на опорной точке, а также экрана с цифровой видеокамерой, фиксируемого на контролируемой точке. Датчик может использоваться в составе систем геодезического мониторинга для раннего предупреждения техногенных аварий. В результате исследования установлено, что цифровой датчик способен измерять вертикальные перемещения с ошибкой 3 мм на расстоянии до 50 м. Разрабатываемый прототип датчика вертикальных перемещений характеризуется низкой стоимостью и, в перспективе, позволит удешевить системы наблюдений геодезического мониторинга. В статье приведены ссылки на открытое программное обеспечение для организации системы наблюдений с помощью проектируемого датчика и исходные данные эксперимента.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, геотехнический мониторинг, цифровой инклинометр, компьютерное зрение, открытое программное обеспечение

Для цитирования:

Мареев А. В., Попков М. А., Янгальшев В. Р., Мамаев Д. С. Исследование точности прототипа малобюджетного цифрового датчика слежения за вертикальными смещениями на основе алгоритмов компьютерного зрения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 33–42. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-33-42>

Accuracy assessment of a low-cost digital sensor prototype for vertical displacement monitoring using computer vision algorithms

A. V. Mareev¹✉, M. A. Popkov¹, V. R. Yangalyshev¹, D. S. Mamaev¹

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

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

Abstract. The article presents a research on a low-cost, high-precision digital vertical displacement sensor prototype developed at the SSUGT Laboratory of Automatic Geodetic Monitoring. The sensor consists of a collocated semiconductor laser and video inclinometer mounted on a reference point, paired with a screen and digital video camera affixed to the monitored point. It is suitable for integration into geodetic monitoring systems to provide early warnings of anthropogenic hazards. The study proves that the sensor measures vertical displacements with a 3 mm error at distances up to 50 m. The prototype holds potential to reduce the expense of geodetic monitoring systems. The article

also includes references to open-source software for implementing the observation system with the proposed sensor, as well as the raw experimental data.

Keywords: geodetic monitoring, geotechnical monitoring, digital inclinometer, computer vision, open source software

For citation:

Mareev A. V., Popkov M. A., Yangalyshev V. R., Mamaev D. S. (2026). Accuracy assessment of a low-cost digital sensor prototype for vertical displacement monitoring using computer vision algorithms. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 33–42. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-31-2-33-42>

Введение

При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений особое внимание уделяется обеспечению безопасности за счёт контроля структурной целостности несущих конструкций. Контроль осуществляется в рамках геодезического мониторинга посредством эпизодических или непрерывных инструментальных измерений. Для большинства объектов гражданской и промышленной инфраструктуры при геодезическом мониторинге применяют сочетание линейно-угловых измерений и геометрического нивелирования. Измерения выполняются вручную с установленной периодичностью в соответствии с программами наблюдений. Однако существует ряд дополнительных потенциальных направлений внедрения автоматизированных систем геодезического мониторинга.

Первое направление — мониторинг жилых, административных и промышленных зданий, срок эксплуатации которых приближается к нормативному пределу. К ним относятся здания из сборного железобетона и блочных конструкций, массово возводившиеся с конца 1940-х гг. На долю пятиэтажных зданий советской серии приходится около 20 % жилищного фонда России; при этом 80 % таких зданий требуют физического обновления [1]. Темпы реновации недостаточны, что приводит к фактическому продлению срока эксплуатации. В результате возникает потребность применения дополнительных мер обеспечения безопасности. Особенно важен оперативный контроль структурной целостности старого жилого фонда, вблизи которого проводятся интенсивные строительные работы, поскольку потенциально опасные деформационные процессы в таких зданиях могут протекать с высокой скоростью.

Второе направление — эксплуатация зданий и сооружений в регионах Крайнего Севера. Риск аварийных ситуаций в этих регионах возрастает вследствие таяния многолетнемерзлых грунтов. По оценкам [2], совокупный мировой ущерб от глобального потепления к 2050 г. может достичь 132 млрд долларов. При этом 75 % объёма нефтегазодобычи в Российской Федерации сосредоточено в зонах Крайнего Севера, а инфраструктура подвержена риску, связанному с нестабильностью оснований. Поэтому геодезический мониторинг на Крайнем Севере представляет собой стратегически важную задачу как с точки зрения природопользования, так и экономики.

В настоящее время для непрерывного геодезического мониторинга применяют роботизированные тахеометры, цифровые инклинометры, ГНСС-приёмники и гидростатические нивелиры [3, 4]. Устройства отличаются высокой стоимостью и не предназначены для массового внедрения. Большинство приборов произведено зарубежными компаниями и не адаптировано к эксплуатации при низких температурах.

Компания Trimble представила в 2024–2025 гг. новые приборы геотехнического мониторинга: Trimble GNSS Meter и Trimble Laser-Tilt Meter. Первое устройство представляет собой коллокацию ГНСС-приёмника и датчика наклона, второе — датчика наклона и лазерного дальномера. Приборы предназначены для наблюдений на коротких базах, функционируют без внешнего электропитания и связи, обеспечивают автономную работу в течение двух лет. Диапазон рабочих температур составляет от –40 до +80 °С. Однако данные устройства не поставляются на российский рынок, а их стоимость превышает

тысячу долларов за единицу, что исключает возможность массового применения.

Таким образом, для повышения уровня безопасности эксплуатации зданий и сооружений в России требуется разработка масштабируемых методов геодезического мониторинга, способных функционировать в широком диапазоне внешних условий, включая низкие температуры [5]. Для достижения массовости геодезического мониторинга необходимо обеспечить ценовую доступность, сопоставимую с системами безопасности, такими как наружное видеонаблюдение или пожарная сигнализация.

Перспективным направлением повышения экономической эффективности систем мониторинга являются системы наблюдений на основе совместного использования цифровых видеокамер, полупроводниковых лазеров и алгоритмов технического зрения [6, 7]. Известны методы высокоточного определения изменений расстояния с помощью лазерной триангуляции [8], а также способы оценки углов наклона по перемещению пузырька в цилиндрическом уровне [9, 10]. Широко распространены створные системы наблюдений за деформациями, основанные на отслеживании лазерного луча с помощью цифровых камер и технического зрения [11–14]. Развитие таких систем обусловлено доступностью открытых библиотек, таких как OpenCV, и удешевлением энергоэффективных цифровых плат с видеокамерами. Большинство подобных систем остаются прототипами, и лишь единичные реализации применяются для непрерывного мониторинга.

Исследования в данной области сфокусированы на повышении качества обработки изображений и устойчивости к внешним воздействиям, в первую очередь — к изменяющемуся освещению. В обзорной работе [6] выделены два ключевых направления дальнейшего развития технологии: разработка упрощённых и доступных программно-аппаратных комплексов для долгосрочных геотехнических исследований и изучение долговременной стабильности датчиков в условиях изменяющейся внешней среды.

Учитывая изложенное, для повышения доступности геодезического мониторинга требу-

ется разработка открытых программно-аппаратных решений, способствующих внедрению технологий технического зрения в системы контроля конструктивной целостности. Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная оценка возможностей системы слежения на основе бюджетных цилиндрических уровней, полупроводниковых лазерных модулей, малобюджетных цифровых процессоров, цифровых видеокамер и программ технического зрения при наблюдениях за вертикальными смещениями в рамках геодезического мониторинга для потенциальной замены дорогостоящего оборудования, и обеспечения эксплуатации в условиях низких температур.

Методика исследования

Для проверки результатов исследования использовались следующие метрики: арифметическое среднее значение, среднеквадратическое отклонение разностей вертикальных перемещений, определяемых с использованием прототипа датчика вертикальных перемещений (ДВП) и их последующего сравнения с эталоном. На рис. 1 представлена схема измерительного узла для способа определения вертикальных перемещений объекта контроля геодезического мониторинга на основе тригонометрического нивелирования, который реализуется при помощи измерительного и реперного модулей.

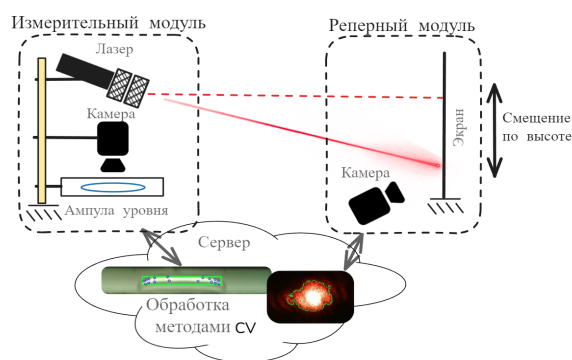


Рис. 1. Схема измерительного узла датчика вертикальных перемещений

Калиброванные реперный и измерительный модули располагаются на расстоянии до 50 м друг от друга в условиях прямой видимости.

сти под малым углом наклона лазерного луча относительно горизонта. Наклон измерительного модуля фиксируется термокомпенсированной системой слежения за перемещением пузырька уровня по цилиндрической ампуле с использованием программы компьютерного зрения, основанной на библиотеке OpenCV; описание программы наклона представлено в работе [15]. Изменение наклонной дальности (расстояния между реперным и измеритель-

ным модулем) определяется в результате оценки расходимости лазерного луча путем отслеживания программой компьютерного зрения изменения видимой площади лазерного пучка на экране реперного модуля. В то же время величина перемещения лазерного луча отслеживается программой компьютерного зрения путем вычисления центра масс его проекции. Схема калибровки датчика вертикальных перемещений представлена на рис. 2.



Рис. 2. Uml-диаграмма действий для калибровки датчика перемещений (ДВП)

Смещение по высоте реперного модуля определяется по формуле

$$\Delta u_i = (S_0 + S_i) \cdot \sin(\gamma_0 + \gamma_i) - S_0 \cdot \sin(\gamma_0) - \Delta y_i, \quad (1)$$

где Δu_i – фиксируемые относительные вертикальные перемещения;

S_0, γ_0 – начальные значения наклонной дальности между реперным и измерительными модулями и начальное значение угла наклона лазерного модуля относительно горизонта соответственно;

$S_i, \gamma_i, \Delta y_i$ – фиксируемые при помощи измерительной системы, основанной на компьютерном зрении, значения изменений

наклонной дальности, угла наклона относительно горизонта и перемещения лазерного луча по экрану.

Уравнение (1) линейризуется разложением в ряд Тейлора второго сомножителя первого слагаемого $\sin(\gamma_0 + \gamma_i) = \sin(\gamma_0) - \cos(\gamma_0)\gamma_i + O(\gamma_i^2)$.

Система линейных уравнений для определения вектора $\hat{X} = [\widehat{\delta u_i}, \widehat{\delta S_i}, \widehat{\delta \gamma_i}]^T$ с помощью МНК-оптимизации имеет следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -S_0 \cos \gamma_0 & -\sin \gamma_0 \\ (\sin \gamma_0)^{-1} & S_0 \cot \gamma_0 & 0 \\ (S_0 \cos \gamma_0)^{-1} & 0 & \tan \gamma_0 / S_0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \Delta u_i^{app} - S_0 \cos \gamma_0 \cdot \gamma_i - S_i \sin \gamma_0 - \Delta y_i \\ (\Delta S_i^{app} - S_0 \cos \gamma_0 \cdot \gamma_i - \Delta y_i) / \sin \gamma_i - S_i \\ (\Delta \gamma_i^{app} - S_i \sin \gamma_0 - \Delta y_i) / S_0 \cos(\gamma_0) - \gamma_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где u_i^{app} – предвычисленное значение относительного перемещения по формуле (1). Значение вертикального перемещения вычисляется комбинацией $\hat{u}_i = u_i^{app} + \widehat{\delta u}_i$. Общий порядок расчетов в рамках эксперимента представлен на рис. 3.

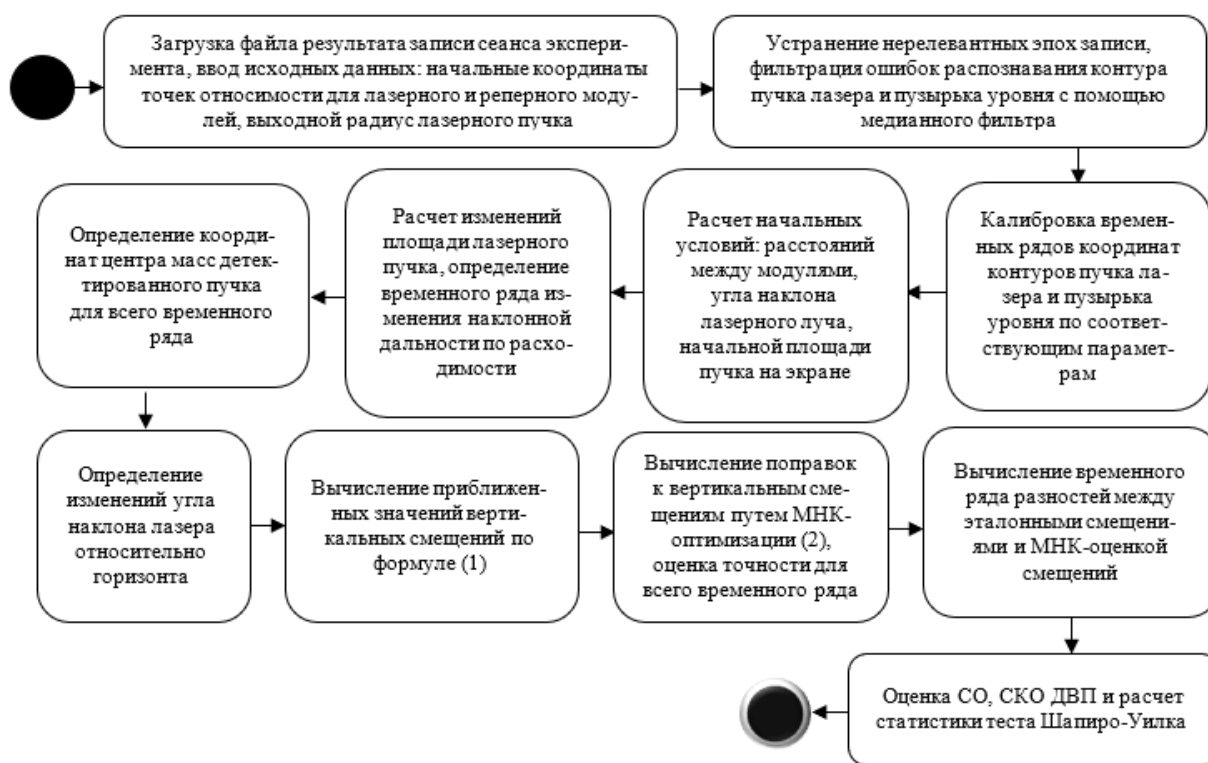


Рис. 3. Uml-диаграмма порядка действий обработки результатов эксперимента

Начальные значения угла наклона γ_0 и дальности между реперным и измерительным модулем S_0 определяются с помощью электронного тахеометра.

Описание эксперимента

Экспериментальная установка для исследования датчика вертикальных перемещений состоит из следующих элементов (рис. 4):

- 1) экзаменатора уровней, снабженного микрометрическим подъемным винтом с шагом 0,01 мм и индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм;
- 2) измерительного модуля, включающего:
 - а) полупроводниковый лазерный модуль 650 нм мощностью 50 мВт;
 - б) инклинометрический блок (рис. 5, а и б): монтажную шпильку формата 5/8 дюйма; цилиндрическую ампулу уровня с це-

ной деления 30" и длиной 64 мм; монтажную пластину, изготовленную из гипсоволокнистого листа; датчик температуры DS18B20, СКО – 0,5 °С; цифровой модуль ESP32-sam с модулем OV2640 с разрешением 2 МП; светодиодную ленту; прозрачную пластину из оргстекла, для теплоизоляции уровней;

3) реперный модуль (рис. 5, в): пластиковый корпус с пластиковым экраном; поляризационный светофильтр на входном окне модуля, модуль ESP32-sam с камерой OV2640, установленный на расстоянии 7 см относительно экрана.

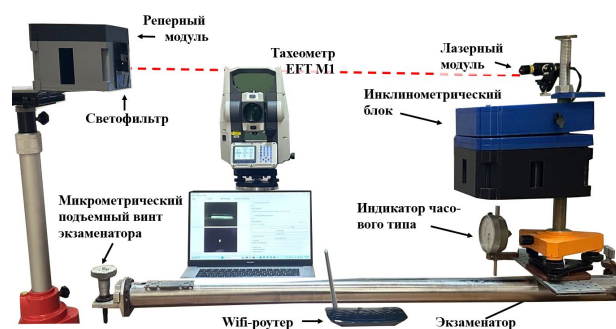


Рис. 4. Фотография элементов экспериментальной установки

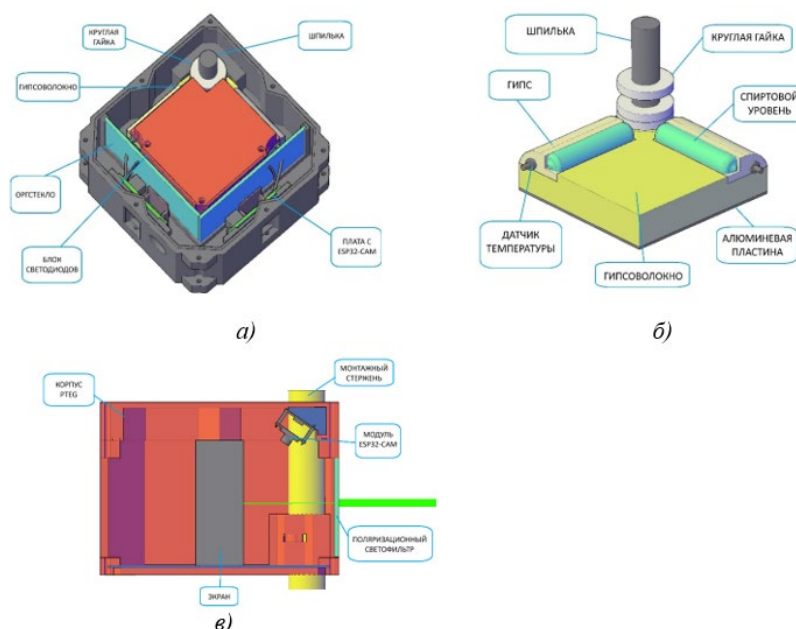


Рис. 5. Чертежи элементов датчика вертикальных перемещений: а), б) инклинометрический блок; в) реперный модуль

Сбор измерительной информации, а также автоматическое распознавание перемещений пузырька уровня и светового пятна лазерного луча выполнялись при помощи программы с графическим пользовательским интерфейсом; сведения о программе можно найти в работе [15]. Эксперимент проводился в подвальном помещении лабораторного корпуса СГУГиТ. В процессе выполнения измерений модули ДВП устанавливались на расстояниях 15, 30, 50 м. Для каждой установки выполнялись определения начальных условий: измерялись расстояние между реперным и изме-

рительным модулем и угол наклона лазерного луча с помощью тахеометра EFT M1 (угловая ошибка – 2", ошибка дальномера – 3 мм).

В пределах каждой из установок выполнялось около 10 перемещений измерительного модуля с шагом 1 мм при помощи подъемного механизма экзаменатора. При расстоянии 50 м сделано 2 сессии записи в разные дни из-за недостаточного количества данных, полученных в ходе первой записи. Сырые данные эксперимента, включая видеозаписи пузырькового уровня и лазерного пятна, результаты автоматического определения пара-

метров слежения, а также скрипт расчетов, можно найти по следующим ссылкам [16, 17].

Результаты

Калибровка камеры ДВП проводилась при помощи подвижного микрометрического столика с ценой деления 0,01 мм. Калибровка инклинометрического модуля выполнялась при помощи инклинометра Leica Nivel 220 в диапазоне $\pm 200''$. Ошибка Leica Nivel 220 в диапазоне $\pm 200''$ составляет $1''$. По результатам калибровки элементов датчика вертикальных перемещений выполнена априорная оценка точности. Чувствительность датчика вертикальных перемещений на расстоянии 15 м оценивается величиной 0,5 мм при угле наклона лазерного луча относительно горизонта до 1° и ошибке определения расстояния в 10 мм. Для расстояния в 50 м априорная ошибка ДВП составляет 1,4 мм. Ошибка определения угла наклона оценена по величине межквартильного размаха в $5''$. Ошибка определения перемещений лазерного луча оценивается величиной 0,3 мм.

По результатам эксперимента установлено, что ДВП способен отслеживать смещение с ошибкой 3 мм на расстоянии до 50 м, а на расстоянии до 15 м – с ошибкой 1 мм (рис. 6, 7). В ходе эксперимента выявлено, что полученные величины ошибок измеренных перемещений укладываются в удвоенную величину априорной ошибки и ошибку используемого эталона (табл. 1). По значениям критерия и P-value теста Шапиро – Уилка был сделан вывод о том, что временные ряды разностей не подчиняются нормальному закону распределения, что свидетельствует о наличии неучтенных систематических ошибок.

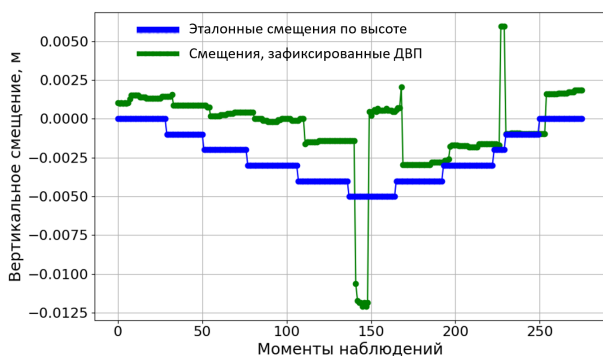


Рис. 6. График временного ряда для сеанса 2 на расстоянии до 50 м

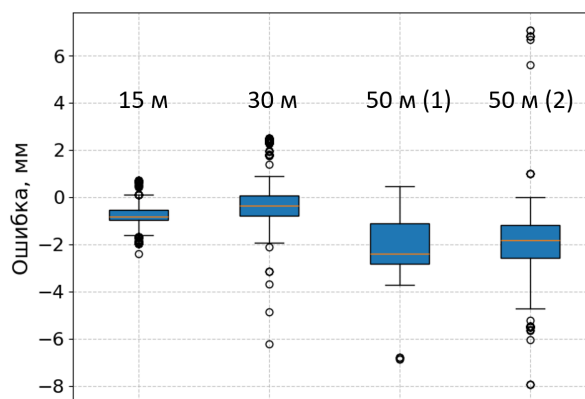


Рис. 7. Гистограмма распределения разностей во временных рядах при отслеживании вертикальных перемещений

Таблица 1. Результаты исследования датчика вертикальных перемещений

Сеанс записи	15 м	30 м	50 м (сеанс 1)	50 м (сеанс 2)
СКО, мм	0,6	1,3	1,2	2,1
СО, мм	-0,7	-0,1	-2,1	-1,8
Априорн. ошибка, мм	0,9	1,1	1,4	1,4
Ошибка эталона, мм	0,01	0,01	0,01	0,01
Критерий теста Шапиро – Уилка	0,97	0,87	0,84	0,84
Шапиро – Уилка тест, P-value	2E-06	7E-16	8E-12	2E-16
Количество движений	15	11	8	11
Количество эпох наблюдений, сек	300	300	140	270

Заключение

Для обеспечения заданной точности измерения вертикальных перемещений на основе рассмотренного в статье способа с применением ДВП на уровне геометрического нивелирования I класса необходимо определять перемещения на расстоянии до 50 м с ошибкой не более 0,04 мм, а для II класса – не более 0,1 мм.

Для замещения тригонометрического нивелирования, выполняемого при помощи роботизированного тахеометра (с характеристиками: угловая точность – $1''$, ошибка компенсации наклона – $0,5''$, ошибка измерения расстояния – 1 мм), требуется отслеживать изменения вертикальных перемещений на расстоянии до 50 м с ошибкой порядка 0,4 мм при углах наклона относительно горизонта не

больше 2°. На расстоянии до 10 м роботизированный тахеометр может обеспечить ошибку измерения перемещений порядка 0,1 мм. Согласно паспортным данным упомянутый ранее прибор компании Trimble Laser-tilt, позволяет отслеживать вертикальные перемещения на расстоянии до 50 м с ошибкой 2,0–3,0 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что полученный результат измерения вертикальных перемещений с применением ДВП пока не соответствует высокоточному геометрическому нивелированию или наблюдениям с применением роботизированных тахеометров и не способен их заменить. При этом ДВП может выступать альтернативой прибору Trimble Laser-tilt.

Потенциальную чувствительность рассмотренного в статье способа с применением ДВП возможно повысить до 0,3–0,5 мм для расстояния до 50 м за счет улучшения качества калиб-

ровки камер и возможных изменений в обработке измерительных видеопотоков. При этом большой вклад в ошибку будет вносить недостаточная точность калибровки камер модулей. Также требуется повысить общую устойчивость системы наблюдений к дестабилизирующим факторам, провести аналогичные измерения уже в условиях, близких к эксплуатационным, и исследовать систему наблюдения на долгосрочную стабильность.

Благодарности

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).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чувилова И. В., Кравченко В. В. Комплексные методы реконструкции и модернизации массовой жилой застройки. *Academia. Архитектура и строительство*. 2011. № 3. С. 94–100.
2. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V., Falaleeva A. A., Badina S. V., et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*. 2022. Vol. 112. No. 1. P. 231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.
3. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга. *Вестник СГУГиТ*. 2016. № 1(33). С. 48–61. EDN WDHJQH.
4. Сальников В. Г., Скрипников В. А., Скрипникова М. А., Хлебникова Т. А. Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС. *Вестник СГУГиТ*. 2018. Т. 23, № 3. С. 108–124. EDN YAATIT.
5. Косарев Н. С. О необходимости создания отечественного программного обеспечения для автоматизированного геодезического мониторинга. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 3. С. 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14. EDN DXVPUI.
6. Zhuang Y., Chen W., Jin T., Chen B., Zhang H., Zhang W. A review of computer vision-based structural deformation monitoring in field environments. *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 10. Art. no. 3789. DOI: 10.3390/s22103789.
7. Ferraris C., Amprimo G., Pettiti G. Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications. *Signals*. 2023. Vol. 4. No. 3. P. 539–574. DOI: 10.3390/signals4030029.
8. Stepanov V. A., Moos E. N., Shadrin M. V., Savin M. V., Umnyashkin V. N., Umnyashkin A. V., Triangulation Sensor for Measuring Displacements and High-PRECISION Monitoring of Production Performance. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 54–65. DOI: 10.18721/JPM.13105.
9. Рябов Г. Г., Ушакевич А. Н. Автоматизация мониторинга деформаций гидротехнических сооружений водного транспорта. *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. 2013. № 2 (21). С. 95–102.

10. Artese G., Perrelli M., Artese S., Meduri S., Brogno N. POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests. *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. 5. P. 10806–10824. DOI: 10.3390/s150510806.
11. Vicente M. A., Gonzalez D. C., Minguez J., Schumacher T. A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections. *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 4. Art. no. 970. DOI: 10.3390/s18040970.
12. Cao J., Chen Y., Yu D., Xu Z., Hu X., Liang Y., Pan S., Wu D. Real-time laser spot detection and tracking system based on parallel multi-target detection and determination algorithm. *Review of Scientific Instruments*. 2023. Vol. 94. DOI: 10.1063/5.0157141.
13. Brown N., Schumacher T., Vicente M. A. Evaluation of a novel video- and laser-based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2021. Vol. 11. No. 2. Pp. 265–281. DOI: 10.1007/s13349-020-00450-z.
14. Авхадеев В. Г., Можаров Г. А., Савостин П. И., Чугреев И. Г., Скрыпицина Т. Н., Золотов А. А. Лазерная измерительная сканирующая система для определения критических деформаций линейных объектов. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2019. Т. 63. № 6. С. 636–644. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-636-644.
15. Янгальшев В. Р., Попков М. А., Наумов В. Ю. Программа для калибровки малобюджетных высокоточных цифровых видеоинклинометров. *Тюменский индустриальный университет*. – Тюмень, 2024. С. 182–186.
16. Vertical movement sensor on CV. Онлайн-ресурс. URL: <https://osf.io/na4fw>.
17. Датчик вертикальных перемещений оценка точности. Онлайн-документ. URL: <https://gist.github.com/ArtemMareev/c8fdf105235b5717c4ff45c90c0f1d57>.

REFERENCE

1. Chuvilova I. V., Kravchenko V. V. (2011). Integrated methods of reconstruction and modernization of mass residential development. *Academia. Arxitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, 3, 394–100 [in Russian].
2. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V., Falaleeva A. A., Badina S. V., et al. (2022) Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 112 (1), Pp. 231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.
3. Hiller, B., Yambaev, Kh. K. (2016). Development and field tests of an automated deformation monitoring system. *Vestnik SSUGT [Vestnik SGUGIT]*, (1)(33), 48-61. EDN WDHJQH [in Russian].
4. Salnikov, V. G., Skripnikov, V. A., Skripnikova, M. A., Khlebnikova, T. A. (2018). Application of modern automated surveying instruments for monitoring hydrotechnical structures of hydroelectric power plants. *Vestnik SSUGT [Vestnik SGUGIT]*, 23(3), 108-124. EDN YAATIT [in Russian].
5. Kosarev, N. S. (2025). On the necessity of creating russian software for automated geodetic monitoring. *Vestnik SSUGT [Vestnik SGUGIT]*, 30(3), 5-14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14. EDN DXVPUI [in Russian].
6. Zhuang Y., Chen W., Jin T., Chen B., Zhang H., Zhang W. (2022) A review of computer vision-based structural deformation monitoring in field environments. *Sensors*, 22(10), P. 3789. – DOI: 10.3390/s22103789.
7. Ferraris C., Amprimo G., Pettiti G. (2023). Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications. *Signals*, 4(3), pp. 539–574. – DOI: 10.3390/signals4030029.
8. Stepanov V. A., Moos E. N., Shadrin M. V., Savin M. V., Umnyashkin V. N., Umnyashkin A. V. (2020). Triangulation Sensor for Measuring Displacements and High-PRECISION Monitoring of Production Performance. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 13(1), pp. 54–65. DOI: 10.18721/JPM.13105.
9. Ryabov G. G., Ushakevich A. N. (2013). Automation of monitoring of deformations of hydraulic structures of water transport. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo*

flota im. admiral S. O. Makarova. [Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping], 2 (21), 95–102. [in Russian].

10. Artese G., Perrelli M., Artese S., Meduri S., Brogno N. (2015). POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests. *Sensors*, 15 (5), pp. 10806–10824. – DOI: 10.3390/s150510806.

11. Vicente M. A., Gonzalez D. C., Minguez J., Schumacher T. (2018). A Novel Laser and Video–Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections. *Sensors*, 18 (4), P. 970. – DOI: 10.3390/s18040970.

12. Cao J., Chen Y., Yu D., Xu Z., Hu X., Liang Y., Pan S., Wu D. (2023). Real–time laser spot detection and tracking system based on parallel multi–target detection and determination algorithm. *Review of Scientific Instruments*. 94, DOI: 10.1063/5.0157141.

13. Brown N., Schumacher T., Vicente M. A. (2021). Evaluation of a novel video– and laser–based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(2), pp. 265–281. DOI: 10.1007/s13349–020–00450–z.

14. Avkhadeev V. G., Mozharov G. A., Savostin P. I., Chugreev I. G., Skripitsina T. N., Zolotov A. A. (2019). Laser measuring scanning system for determining critical deformations of linear objects *Izvestiya vuzov "Geodeziya I aerofotos"emka" [Izvestia Vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"]*, 63(6), 636–644. DOI: 10.30533/0536–101X–2019–63–6–636–644 [in Russian].

15. Yangalyshev V. R., Popkov M. A., Naumov V. Yu. (2024). Program for calibration of low–budget high–precision digital video inclinometers. *Tyumenskij industrial'nyj universitet [Tyumen Industrial University]*, 182–186 [in Russian].

16. Vertical movement sensor on CV Retrieved from <https://osf.io/na4fw>.

17. Vertical displacement sensor accuracy assessment Retrieved from <https://gist.github.com/ArtemMareev/c8fdf105235b5717c4ff45c90c0f1d57>.

Об авторах

Арте́м Влади́мирович Ма́реев – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, старший научный сотрудник НИР раздела 01-10.

Максим Андреевич Попков – инженер НИР раздела 01-10.

Янгальшев Валентин Рамильевич – аспирант, инженер НИР раздела 01-10.

Мамаев Даниил Станиславович – аспирант, инженер НИР раздела 01-10.

Author details

Artem V. Mareev – PhD, Assistant Professor, Department of Space and Physical Geodesy; Senior Researcher.

Maxim A. Popkov – Research Engineer.

Valentin R. Yangalyshev – PhD Student, Engineer.

Daniil S. Mamaev – PhD Student, Engineer.

Получено / Received 07.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 16.09.2025

Принята к публикации / Accepted 23.10.2025