

# **Исследование точности системы слежения за вертикальными смещениями на основе алгоритмов компьютерного зрения**

*Мареев А. В. \*, Попков М. А., Янгальшиев В. Р., Мамаев Д. С.*

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

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

**Аннотация** В статье представлено исследование разрабатываемого в лаборатории автоматического геодезического мониторинга СГУГиТ прототипа малобюджетного высокоточного цифрового датчика вертикальных перемещений. 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.

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

## **Введение**

При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений особое внимание уделяется вопросам безопасности, связанным со структурной целостностью несущих конструкций. Контроль обеспечивается в процессе геодезического мониторинга путем эпизодических или непрерывных инструментальных измерений; он обязателен для уникальных инженерных сооружений, таких как гидроэлектростанции, протяженные тоннели, атомные электростанции и т.п. При этом для уникальных сооружений наиболее целесообразными являются непрерывные автоматизированные системы наблюдений.

Для большей части объектов гражданской и промышленной инфраструктуры при контроле целостности несущих конструкций применяют сочетание средств линейно-угловых измерений и геометрического нивелирования. Наблюдения выполняются вручную с определенной периодичностью в соответствии с обязательными программами мониторинга. Однако существует целый ряд потенциальных областей для реализации геодезического мониторинга с применением средств автоматизации измерений.

Во-первых, это мониторинг жилых, административных и промышленных зданий, нормативный срок эксплуатации которых подходит к завершению. Это касается, например, строений из сборного железобетона и блочных конструкций, которые активно возводились с конца 1940-х годов. Примерно 20 % жилищного фонда России представлено пятиэтажными зданиями советской массовой застройки; при этом 80 % зданий данного фонда нуждаются в физическом обновлении [1], а темп реновации массового советского жилья на данном этапе оказывается недостаточным для своевременного замещения [2]. И здесь, на наш взгляд, особенно важным является оперативный геодезический мониторинг с целью обнаружения возможных деформаций у зданий, вблизи которых производятся капитальные строительные работы.

Второй важной областью массового внедрения геодезического мониторинга являются здания и сооружения, эксплуатируемые в регионах Крайнего Севера. Это связано с возросшим риском аварийных ситуаций в результате таяния вечной мерзлоты. Практически 75 % объемов нефтегазодобычи в Российской Федерации сосредоточены в регионах, расположенных в зонах Крайнего Севера и подвержены риску из-за нестабильности грунтов. Согласно оценке [3] возможный накопленный общемировой ущерб от глобального потепления к 2050 году достигнет порядка 132 млрд. долларов, а по оценке ФАНУ «Восток-госплан», общий потенциальный ущерб для России от глобального потепления может достичь величины порядка 5 трлн. рублей [4]. Актуальность разработки средств измерений для мониторинга окружающей среды в регионах Крайнего Севера также отмечена программой фундаментальных научных исследований Российской Федерации на 2021–2030 годы [5].

Таким образом, для повышения общего уровня безопасности эксплуатации зданий и сооружений на территории Российской Федерации необходимо предложить масштабируемые методы геодезического мониторинга, способные функционировать в широком диапазоне изменения условий внешней среды.

В настоящее время инженерам-геодезистам при проведении геодезического мониторинга доступны для производства наблюдений такие средства

геодезических измерений, как роботизированные тахеометры, цифровые инклинометры, ГНСС-приемники и гидростатические нивелиры. Перечисленные устройства характеризуются достаточно высокой стоимостью и не всегда подходят для массового внедрения. При этом большая часть представленного на рынке геодезического оборудования является продукцией зарубежных компаний. Приборы не адаптированы для выполнения наблюдений в условиях низких температур.

Компания Trimble в 2024 и 2025 годах представила новые приборы геотехнического мониторинга: Trimble GNSS meter и Trimble Laser-Tilt meter. Первое устройство представляет собой коллокацию ГНСС-приемника и датчика наклона, а второе – коллокацию датчика наклона и лазерного дальномера. Новые приборы предназначены для проведения мониторинга при выполнении наблюдений на коротких расстояниях в условиях отсутствия электропитания и связи, и предназначены для необслуживаемой эксплуатации в течение 2 лет. Другой важной особенностью приборов является широкий диапазон рабочих температур: от  $-40$  до  $+80$  °C. Следует отметить, что новые геодезические приборы компании Trimble не поставляются в Россию. Кроме того, их стоимость достаточно высока: от тысячи долларов за единицу, что не способствует их массовому внедрению.

Для того, чтобы сделать системы геодезического мониторинга по-настоящему массовыми, необходимо, с одной стороны, – обеспечить возможность автономной работы данных устройств в широком диапазоне низких температур; а с другой, – гарантировать ценовую доступность, подобную существующим системам безопасности, например, таким как, системы наружного видеонаблюдения или системы пожарной безопасности.

Одним из наиболее перспективных направлений для повышения экономической эффективности приборов геодезического мониторинга являются системы, основанные на совместном использовании цифровых видеокамер, полупроводниковых лазеров и программ технического зрения [6], [7]. Так, например, известны способы высокоточного отслеживания изменения расстояний

с помощью лазерной триангуляции [8], способы определения углов наклона путем отслеживания перемещения цилиндрического уровня [9], [10]. Достаточно широко представлены системы наблюдений за деформациями, основанные на отслеживании перемещений лазерного луча с помощью цифровых камер и компьютерного зрения [11], [12], [13] и системы наблюдений с использованием референтного лазерного луча, например, створная система наблюдений [14]. Существуют коммерческие проекты систем мониторинга, основанные на принципе отслеживания перемещений лазерных лучей с использованием технологий компьютерного зрения [15]. Такие системы наблюдения стали активно развиваться в последние десятилетия, благодаря открытым программным библиотекам технического зрения, таким как OpenCV, а также повышению доступности энергоэффективных цифровых процессоров с видеокамерами. Большая часть систем наблюдения подобного типа является на данный момент прототипами, и лишь малая из них использовалась для непрерывного мониторинга.

Исследования в данной области в основном сфокусированы на улучшении качества обработки изображений с применением методов компьютерного зрения и повышении устойчивости систем к внешним воздействиям, в особенности к изменяющемуся освещению. Так, например, в обзорной работе [6] отмечаются два наиболее важных аспекта дальнейшего развития направления: это разработка упрощенных и доступных программно-аппаратных комплексов для возможности их применения в долгосрочных геотехнических и динамических исследованиях, и изучение долговременной стабильности датчиков слежения, эксплуатируемых в условиях изменяющейся внешней среды.

Учитывая вышесказанное, можно констатировать, что для повышения доступности геодезического мониторинга и, как следствие, повышения безопасности эксплуатации зданий и сооружений необходимы разработки открытых программно-аппаратных решений, способствующих внедрению технологий технического зрения в целях организации систем слежения за конструктивной целостностью зданий и сооружений. Один из таких проектов, предоставляющий открытый доступ к программам и чертежам аппаратов, является

проект «MonCenter», в рамках которого совершенствуется программная библиотека «MonCenterLib». Библиотека предназначена для организации систем геодезического мониторинга с применением малобюджетных приемников сигналов ГНСС и систем, с использованием технологий компьютерного зрения на основе малобюджетных цифровых процессоров с камерами. В ходе проведенных исследований продемонстрированы возможности использования малобюджетных приемников для отслеживания вертикальных смещений объектов контроля [16] и измерения малых углов наклона относительно горизонта с использованием бюджетных цилиндрических ампул и технологии компьютерного зрения [17], а также возможности отслеживания перемещения лазерного луча по экрану при помощи малобюджетной камеры и программ компьютерного зрения [18].

Также следует отметить создаваемые зарубежными коллегами подобные открытые проекты для совершенствования систем геодезического мониторинга, например, такие как, «DABAMOS» [19], «GREAT» [20].

В данной статье рассматриваются возможности разработки системы слежения на основе бюджетных цилиндрических ампул с диапазоном работы от  $-40$  до  $+50$  °С, полупроводниковых лазерных модулей, малобюджетных цифровых процессоров, цифровых видеокамер и программ компьютерного зрения для производства наблюдений за изменениями вертикальных перемещений в рамках геодезического мониторинга для потенциальной замены дорогостоящего геодезического оборудования.

### **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. Дополнительно проводился статистический тест Шапиро-Уилка для проверки гипотезы о соответствии нормальному распределению для временного ряда ошибок измеренных смещений.

На рисунке 1 представлена схема измерительного узла для способа определения вертикальных перемещений объекта контроля геодезического мониторинга на основе метода тригонометрического нивелирования, который реализуется при помощи измерительного (инклинометр + полупроводниковый лазер) и реперного модулей (экран и цифровая видеокамера).

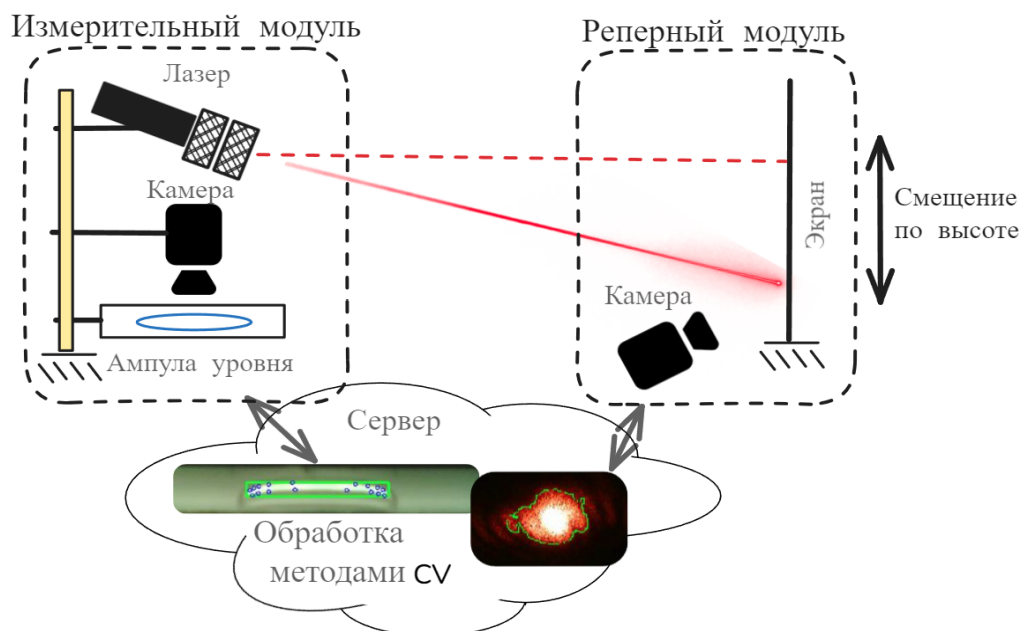


Рисунок 1 – Схема измерительного узла датчика вертикальных перемещений

Калиброванные реперный и измерительный модули располагаются на расстоянии до 50 м друг от друга в условиях прямой видимости под малым углом наклона лазерного луча относительно горизонта. Наклон измерительного модуля фиксируется при помощи термокомпенсированной системы слежения за перемещением пузырька уровня по цилиндрической ампуле с использованием программы компьютерного зрения, основанной на библиотеке OpenCV; описание измерителя наклона представлено в работе [29]. Изменение наклонной дальности (расстояния между реперным и измерительным 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 при помощи программы компьютерного зрения путем вычисления центра масс его проекции; способ определения перемещений представлен в работе

[18]. Условная схема калибровки датчика вертикальных перемещений представлена на рисунке 2.

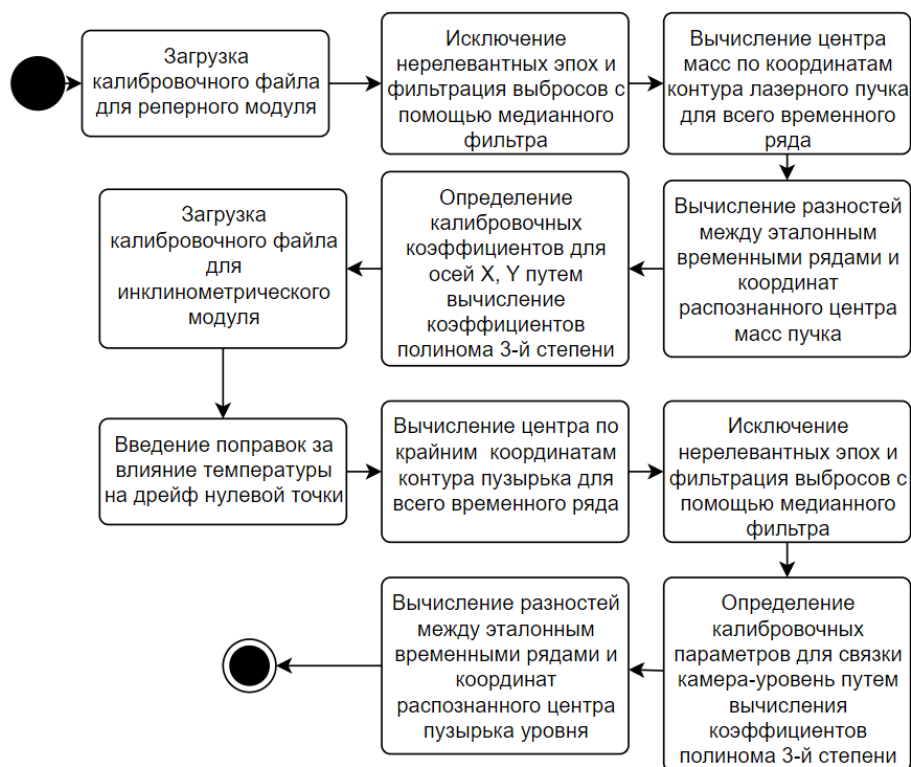


Рисунок 2 – Uml-диаграмма действий для калибровки датчика вертикальных перемещений (ДВП)

Относительное смещение по высоте реперного модуля определяется по следующей 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:  $\Delta u_i$  – фиксируемые относительные вертикальные перемещения;

$S_0, \gamma_0$  – начальные значения наклонной дальности между реперным и измерительными модулями и начальное значение угла наклона лазерного модуля относительно горизонта соответственно;

$S_i, \gamma_i$  – фиксируемые при помощи измерительной системы, основанной на компьютерном зрении, значения изменений наклонной дальности и угла наклона относительно горизонта;

$\Delta y_i$  – зафиксированное по экрану перемещение лазерного луча в направлении «вверх-вниз».

Уравнение (1) линейризуется путем разложения 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  $\mathbf{X} = [\delta u_i, \delta S_i, \delta \gamma_i]^T$  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).

Искомое значение вертикального перемещения вычисляется как комбинация  $u_i = u_i^{app} + \delta u_i$ . Общий порядок расчетов в рамках эксперимента представлен на рисунке 3.

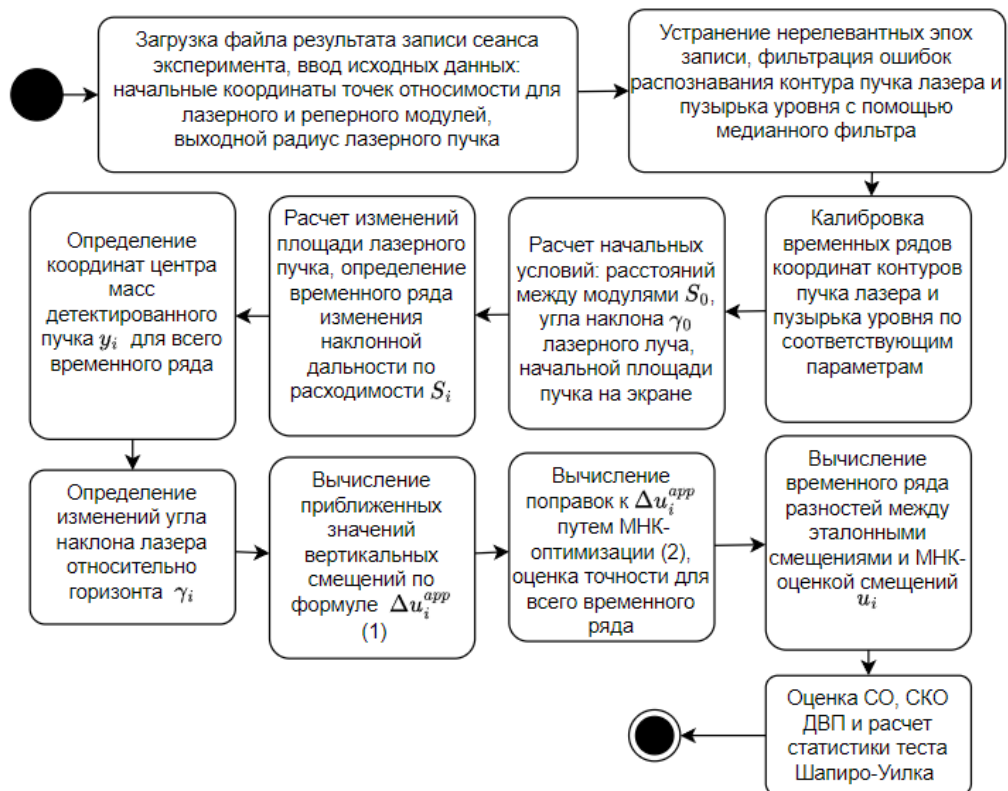


Рисунок 3 – Uml-диаграмма порядка действий обработки результатов эксперимента

Начальные значения угла наклона лазерного луча  $\gamma_0$  и наклонной дальности между реперным и измерительным модулем  $S_0$  определяются с использованием электронного тахеометра.

### **Описание эксперимента**

Экспериментальная установка для исследования датчика вертикальных перемещений состоит из (рисунок 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 с длиной волны 650 нм и мощностью 50 мВт;

б) инклинометрический блок (рисунок 5, а и б):

- монтажную шпильку формата 5/8 дюйма;
- цилиндрическую ампулу уровня с ценой деления 30" и длиной 64 мм;
- монтажную пластину, изготовленную из гипсоволокнистого листа;
- датчик температуры DS18B20, СКО – 0,5 °С;
- цифровой модуль ESP32-сам с модулем OV2640 с разрешением 2 МП;
- светодиодную ленту;
- прозрачную пластину из оргстекла, для теплоизоляции уровней.

3) реперный модуль (рисунок 5 в):

а) пластиковый корпус с пластиковым экраном;

б) поляризационный светофильтр на входном окне модуля.

г) модуль ESP32-сам с цифровой камерой OV2640, установленный на расстоянии 7 см относительно экрана.



Рисунок 4 – фотография элементов экспериментальной установки

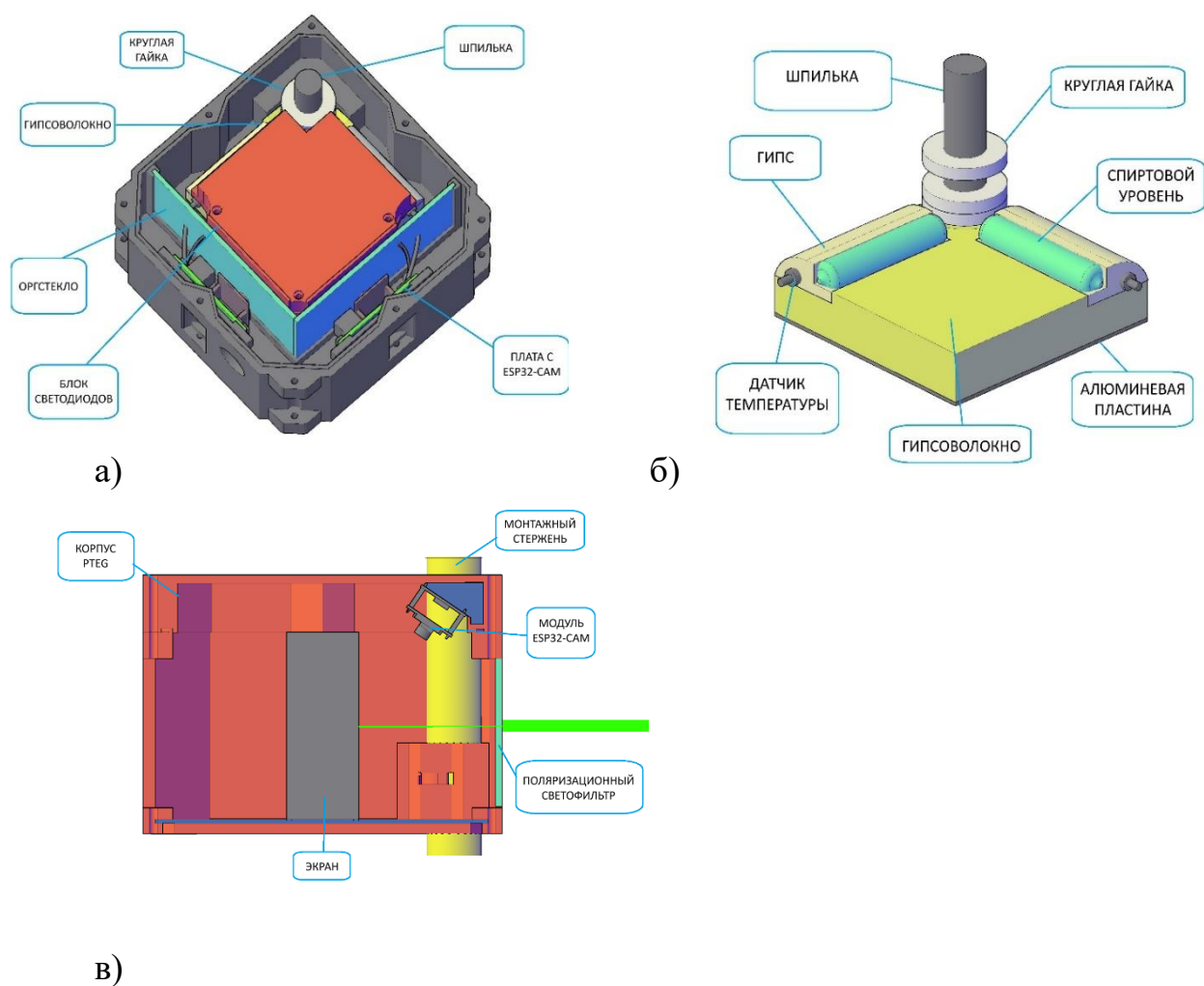


Рисунок 5 – Чертежи элементов датчика вертикальных перемещений

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 [21].

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 измерительным модулем и угол наклона лазерного луча с помощью электронного тахеометра EFT M1 (угловая точность – 2", ошибка дальномера – 3 мм в безотражательном режиме).

В пределах каждой из установок выполнялось около 10 перемещений измерительного модуля с шагом 1 мм при помощи подъемного механизма экзаменатора. При расстоянии 50 метров сделано 2 сессии записи в разные дни из-за недостаточного количества данных, полученных в ходе первой записи.

Моменты перемещений фиксировались при помощи интерфейса программы [21]. Сырые данные эксперимента, включая видеозаписи пузырькового уровня и лазерного пятна, результаты автоматического определения параметров слежения при помощи программ компьютерного зрения, а также скрипт расчетов, можно найти по следующим ссылкам<sup>1 2</sup>.

### **Результаты исследования**

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

---

<sup>1</sup> <https://osf.io/na4fw/>

<sup>2</sup> <https://gist.github.com/ArtemMareev/c8fdf105235b5717c4ff45c90c0f1d57>

лазерного луча относительно горизонта до  $1^\circ$  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 по экрану оценивается величиной 0,3 мм.

По результатам эксперимента установлено, что ДВП способен отслеживать величину смещения с ошибкой 3 мм на расстоянии до 50 м. А на расстоянии до 15 м – с ошибкой 1 мм. При этом в ходе эксперимента было выявлено, что полученные величины ошибок измеренных перемещений укладываются в удвоенную величину априорной ошибки и ошибку используемого эталона (таблица 1). По рассчитанному значению 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. Фрагменты графиков временных рядов представлены на рисунках 6 и 7, а на рисунке 8 представлена гистограмма распределения ошибок отслеживания вертикальных перемещений для каждого эксперимента в отдельности.

Таблица 1 – Результаты исследования датчика вертикальных перемещений

| Сеанс записи                                | 15 м  | 30 м  | 50 м<br>(сеанс 1) | 50 м<br>(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 релевантных эпох наблюдений, сек | 300   | 300   | 140               | 270               |

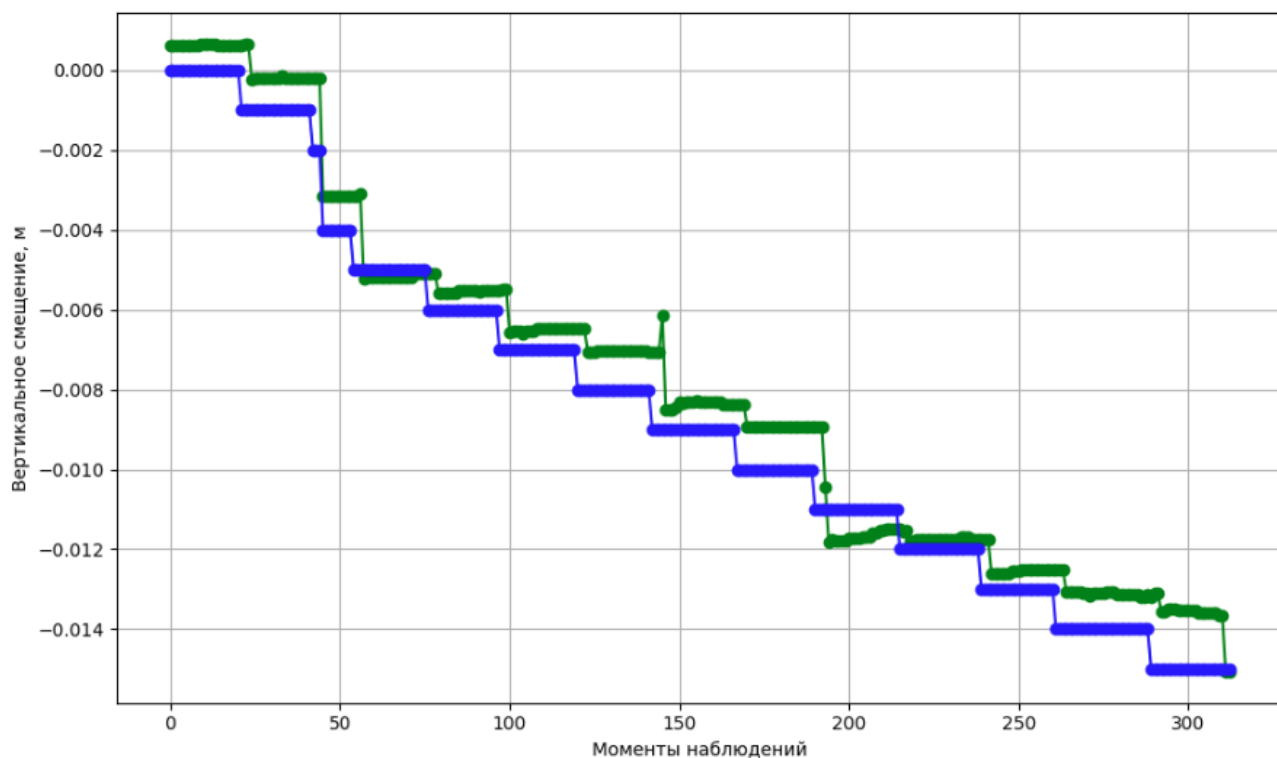


Рисунок 6 – Фрагмент графика временного ряда отслеживания вертикальных перемещений на расстоянии до 15 м. Синий график – эталонные перемещения, зеленый – зафиксированные с помощью ДВП

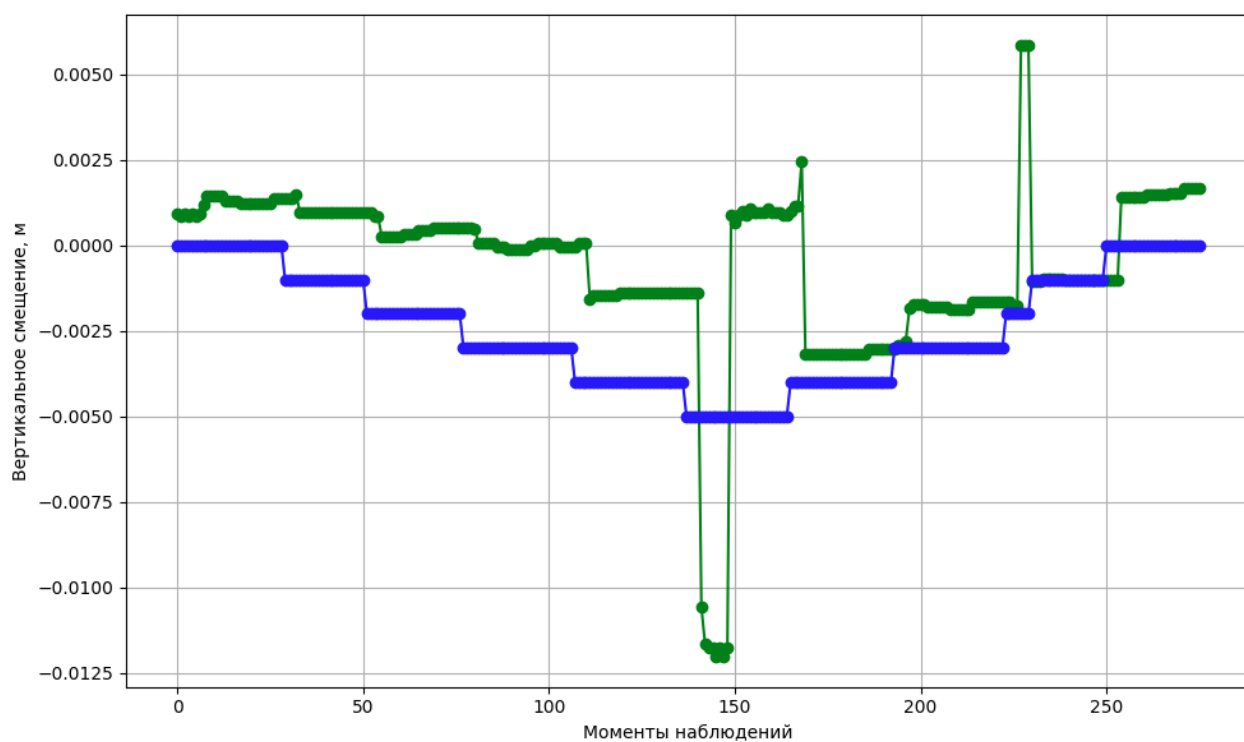


Рисунок 7 – График временного ряда отслеживания вертикальных перемещений на расстоянии до 50 м (сеанс 2). Синий график – эталонные перемещения, зеленый – зафиксированные при помощи ДВП

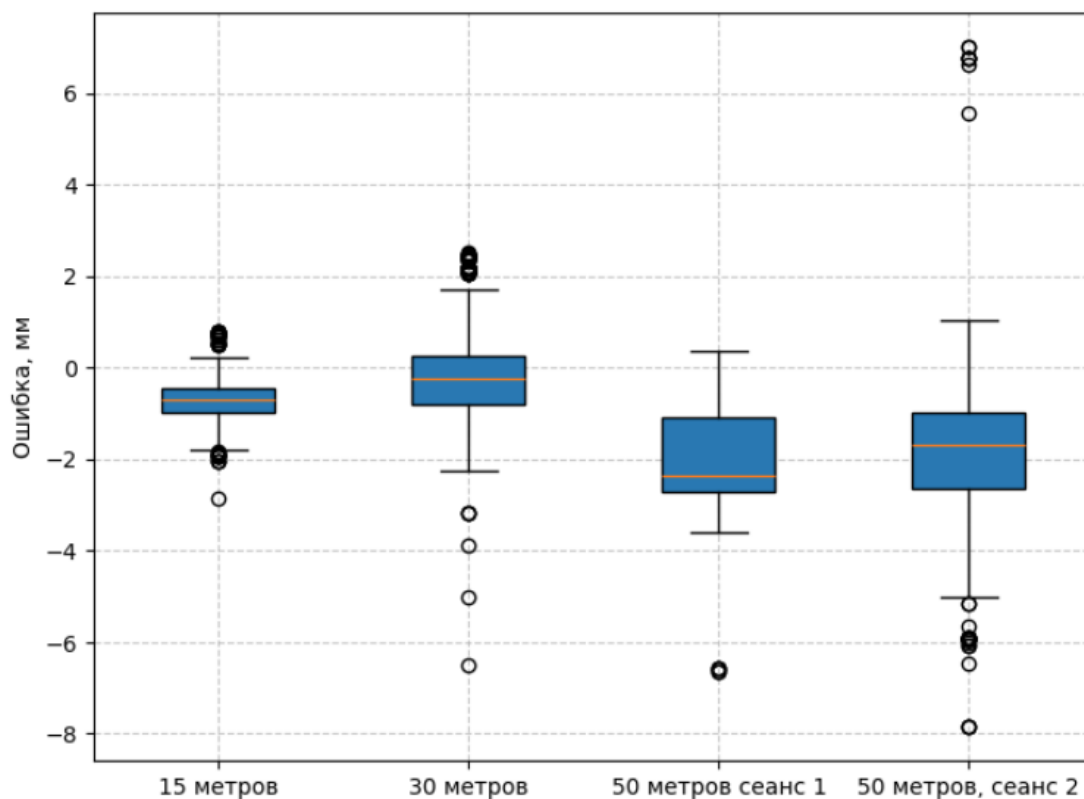


Рисунок 8 – Гистограмма распределения разностей во временных рядах при отслеживании вертикальных перемещений

## 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 2,3 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что полученный на данном этапе результат измерения вертикальных перемещений с применением ДВП – пока не соответствует высокоточному геометрическому нивелированию или наблюдениям с применением высокоточных 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 калибровки камер и возможных изменений в обработке измерительных видеопотоков. При этом больший вклад в ошибку будет вносить недостаточная точность калибровки камеры инклинометрического модуля.

Также требуется повысить общую устойчивость системы наблюдений к дестабилизирующим факторам, провести аналогичные измерения уже в условиях, близких к эксплуатационным, и исследовать систему наблюдения на долговременную стабильность.

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 Комплексные методы реконструкции и модернизации массовой жилой застройки / И. В. Чувилова, В. В. Кравченко // Academia. Архитектура и строительство. – 2011. – № 3. – С. 94–100.
- 2 Волынсков, В. Э. О необходимости модернизации пятиэтажного типового жилого фонда Российской Федерации / В. Э. Волынсков // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 4. – С. 71–75.
- 3 Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 / V. P. Melnikov, V. I. Osipov, A. V. Brouchkov [и др.] // Natural Hazards. –

2022. – Т. 112. – № 1. – С. 231–251. – DOI: [10.1007/s11069-021-05179-6](<https://doi.org/10.1007/s11069-021-05179-6>).

4 Как дорого обойдется экономике повышение температур и таяние льдов в Арктике - Российская газета – URL: [<https://rg.ru/2021/11/07/kak-dorogo-obojdetsia-ekonomike-povyshenie-temperatur-i-taianie-ldov-v-arktike.html>](<https://rg.ru/2021/11/07/kak-dorogo-obojdetsia-ekonomike-povyshenie-temperatur-i-taianie-ldov-v-arktike.html>) (дата обращения: 25.06.2023)

5 О Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы) от 31 декабря 2020 - docs.cntd.ru – URL: [<https://docs.cntd.ru/document/573319222>](<https://docs.cntd.ru/document/573319222>) (дата обращения: 29.05.2025)

6 A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments / Y. Zhuang, W. Chen, T. Jin [и др.] // Sensors. – 2022. – Т. 22. – № 10. – С. 3789. – DOI: [10.3390/s22103789](<https://doi.org/10.3390/s22103789>).

7 Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications / C. Ferraris, G. Amprimo, G. Pettiti // Signals. – 2023. – Т. 4. – № 3. – С. 539–574. – DOI: [10.3390/signals4030029](<https://doi.org/10.3390/signals4030029>).

8 A triangulation sensor for measuring the displacements and high-precision monitoring of the production performance / V. A. Stepanov, E. N. Moos, M. V. Shadrin [и др.] // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2020. – Т. 13. – № 1. – С. 54–65. – DOI: [10.18721/JPM.13105](<https://doi.org/10.18721/JPM.13105>).

9 Автоматизация Мониторинга Деформаций Гидротехнических Сооружений Водного Транспорта / Г. Г. Рябов, А. Н. Ушакевич // Вестник Государственного Университета Морского И Речного Флота Им. Адмирала С.о. Макарова. – 2013. – № 2 (21). – С. 95–102.

10 POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests / G. Artese, M. Perrelli, S. Artese [и др.] // Sensors. – 2015. – Т. 15. – № 5. – С. 10806–10824. – DOI: [10.3390/s150510806](<https://doi.org/10.3390/s150510806>).

11 A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections / M. Vicente, D. Gonzalez, J. Minguez [и др.] // Sensors. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 970. – DOI: [10.3390/s18040970](<https://doi.org/10.3390/s18040970>).

12 Real-time laser spot detection and tracking system based on parallel multi-target detection and determination algorithm / J. Cao, Y. Chen, D. Yu [и др.] // Review of Scientific Instruments. – 2023. – Т. 94. – DOI: [10.1063/5.0157141](<https://doi.org/10.1063/5.0157141>).

13 Evaluation of a novel video- and laser-based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications / N. Brown, T. Schumacher, M. A. Vicente // Journal of Civil Structural Health Monitoring.

– 2021. – Т. 11. – № 2. – С. 265–281. – DOI: [10.1007/s13349-020-00450-z](<https://doi.org/10.1007/s13349-020-00450-z>).

14 Лазерная измерительная сканирующая система для определения критических деформаций линейных объектов / В. Г. Авхадеев, Г. А. Можаров, П. И. Савостин [и др.] // Известия Высших Учебных Заведений. Геодезия И Аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. – № 6. – С. 636–644. – DOI: [10.30533/0536-101X-2019-63-6-636-644](<https://doi.org/10.30533/0536-101X-2019-63-6-636-644>).

15 Суров, Д. И. Способ удаленного мониторинга осадки основания резервуара вертикального стального / Д. И. Суров – URL: [https://elibrary.ru/item.asp?id=50266039](<https://elibrary.ru/item.asp?id=50266039>).

16 Оценка чувствительности к вертикальным перемещениям сети геодезического мониторинга при использовании малобюджетной навигационной аппаратуры потребителя ГНСС / А. П. Карпик, Маликов А. О., Мамаев Д. С. [и др.] // Геодезия и картография. – 2024. – № 12. – С. 18–29. – DOI: [10.22389/0016-7126-2024-1014-12] (<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1014-12>).

17 Effect of Digital Video Camera Heating on The Zero-Point Stability of a High-Precision Computer-Vision Based Video Inclinator / S. V. Dolin, A. P. Karpik, D. S. Mamaev [и др.] // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – 2024. – С. 1040–1044. – DOI: [10.1109/PIERE62470.2024.10805013](<https://doi.org/10.1109/PIERE62470.2024.10805013>).

18 Evaluation of OpenCV- and laser pointer- based vertical displacement sensor for structure health monitoring / A. P. Karpik, Makeev A. V., A. V. Mareev [и др.] // APEIE. – 2023.

19 Engel, P. Deformation monitoring in the internet of things. Implementation of a multi-platform software package for modern sensor networks in engineering geodesy / P. Engel – 2017. – С. 8.

20 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 / D. Curone, G. Savarese, M. Antonini [и др.] // Sensors. – 2023. – Т. 23. – № 13. – С. 6032. – DOI: [10.3390/s23136032](<https://doi.org/10.3390/s23136032>).

21 Программа для калибровки малобюджетных высокоточных цифровых видеоинклинометров / В. Р. Янгальшев, М. А. Попков, В. Ю. Наумов – Тюменский индустриальный университет, Тюмень, 2024. – С. 182–186. – URL: [https://elibrary.ru/item.asp?id=79721496&pff=1](<https://elibrary.ru/item.asp?id=79721496&pff=1>)

# **Investigation of the accuracy of the vertical displacement tracking system based on computer vision algorithms**

*Mareev A. V. \*, Popkov M. A., Yangalyshev V. R., Mamaev D. S.*

<sup>1</sup> Siberian state university of geosystems and technologies, Novosibirsk,  
Russia

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

**Abstract.** The article presents an investigation of a prototype low-cost, high-precision digital vertical displacement sensor developed in the laboratory of automatic geodetic monitoring at SGUGiT. This sensor could be used as a part of geodetic monitoring systems to provide early warning of potential technogenic accidents. As a result of this study, it has been found that the sensor is capable of measuring vertical movements with an accuracy of 3 millimeters at a distance up to 50 meters. The developed prototype of the vertical displacement sensor is characterized by its low cost, and in the future, it will reduce the overall cost of geodetic monitoring observation systems.

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