

# Технология мониторинга объектов капитального строительства на этапах жизненного цикла методами дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов (дронов) на основе высокоточной цифровой модели объекта

УДК 69.001.5

**Адамцевич Любовь Андреевна**

Доцент, к.т.н., доцент кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26

**Воробьев Павел Юрьевич**

НТУ «Сириус», д.1 Олимпийский проспект, 354340, Сочи, Россия  
Аспирант, Кафедра Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве  
Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26

**Железнов Егор Максимович**

Студент, кафедра «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»  
Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26

Аннотация: В современном строительстве на этапах инвестиционной оценки, проектирования, строительства и эксплуатации объектов капитального строительства при внедренной системе информационного моделирования серьезной проблемой является гармонизация собираемых с площадки строительства данных о геометрических параметрах возводимого объекта и территории. В статье представлено комплексное научно-техническое решение в области диагностики зданий и сооружений, мониторинга хода строительства, а

также автоматизированного определения объемов выполненных строительных работ с использованием технологий дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов и информационного моделирования (BIM-технологий).

Ключевые слова: мониторинг, облако точек, беспилотный летательный аппарат, объекты капитального строительства, автоматизация проектирования

**TECHNOLOGY FOR MONITORING CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS AT THE LIFE CYCLE STAGES BY REMOTE SENSING METHODS USING UNMANNED AIRCRAFT (DRONES) BASED ON HIGH PRECISION DIGITAL MODEL**<sup>1,2 3 4</sup>

**Adamtsevitsh Lubov Andreevna**

PhD., associate professor, Department of Information systems, technologies and automation in construction, Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'shosshe 26, Moscow

**Vorobev Pavel Yurievich**

Sirius University of Science and Technology, 1 Olympic Ave, 354340, Sochi, Russia

postgraduate student, Department of Information systems, technologies and automation in construction, Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'shosshe 26, Moscow, Russia

**Zheleznov Egor Maksimovich**

Student, Department of Information systems, technologies and automation in construction, Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'shosshe 26, Moscow, Russia

**Abstract:** In modern construction at the stages of investment assessment, design, construction and operation of capital construction facilities with the implemented information modeling system, a serious problem is the harmonization of data collected from the construction site on the geometric parameters of the facility and territory being built. The article presents a comprehensive scientific and technical solution in the field of diagnostics of buildings and structures, monitoring the progress of construction, as well as automated determination of the volume of construction work performed using remote sensing technologies using unmanned aerial vehicles and information modeling (BIM technologies).

**Key words:** monitoring, point cloud, unmanned aerial vehicle, capital construction facilities, design automation

## Введение

В современном строительстве на этапах инвестиционной оценки, проектирования, строительства и эксплуатации объектов капитального строительства при внедренной системе информационного моделирования серьезной проблемой является гармонизация собираемых с площадки строительства данных о геометрических параметрах возводимого объекта и территории (в том числе данных о геодезических изысканиях, данных о геодезическом мониторинге, данных о реализации графика строительства и данных об объеме и качестве выполненных работ). Все это приводит к значительному усложнению контроля процессов на строительной площадке, а также параметров возводимого объекта, что в итоге влечет задержки в строительстве и значительные финансовые потери (до 30% от начальной стоимости проекта).

При этом современная реализация технологии 4D-моделирования в текущем виде чаще всего представлена однократным созданием необновляемой предиктивной модели до начала строительства. Данная модель теряет свою предсказательную способность в случае значащих отклонений в ходе реализации проекта строительства, если не дополняется и не обновляется новыми данными.

В то же время авторы исследования предполагают, что решением данной проблемы является создание нового комплексного научно-технического решения в области диагностики зданий и сооружений, мониторинга хода строительства, а также автоматизированного определения объемов выполненных строительных работ с использованием технологий дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов и информационного моделирования (BIM-технологий).

## Объекты, предметы и методы

Процессы мониторинга хода строительства, использования BIM, а также геодезического мониторинга в Российской Федерации регулируются сводами правил в строительстве. Некоторые из них:

- СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла»;

- СП 471.1325800.2019 «Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства строительных работ»;

- СП 317.1325800.2017 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ»;

- СП 126.13330.2017 «СНиП 3.01.03-84 Геодезические работы в строительстве».

С 1 января 2022 года становится обязательным внедрением BIM-моделирования для объектов капитального строительства, финансируемых с привлечением бюджетных средств.

Таким образом, современное развитие технологий организации строительного производства и мониторинга хода строительства во многом опирается на цифровизацию строительства с обеспечением уже выработанных требований по составу и объему собираемых сведений и показателей.

Это в свою очередь позволяет выделить ряд технологий, которые уже сегодня могут быть внедрены в указанные процессы с обеспечением сформированных требований с учетом возможностей использования информационной модели объекта строительства, а также 4D-моделирования.

Таковыми технологиями среди прочих являются использование наземного лазерного сканирования (НЛС) для отслеживания геометрических параметров объектов и создания высокоточных объектов, использование воздушного лазерного сканирования (ВЛС) для создания детализированных цифровых моделей местности, а также использование методов фотограмметрии для создания реалистичных геопривязанных моделей объектов, местности и отдельных элементов строительных конструкций.

Все три упомянутые технологии позволяют получать данные в виде геопривязанного плотного облака точек (point cloud), что позволяет комбинировать эти методы сбора геопространственных данных с компенсацией недостатков и использованием преимуществ каждого.

В то же время в прямом сравнении нельзя не учитывать традиционные технологии геодезических измерений (которые в определенных задачах не могут быть заменены) с использованием тахеометров, лазерных дальнометров, теодолитов, нивелиров и прочих приборов, позволяющих получать геопространственные данные. Но в данной статье авторы фокусируются на отличительных особенностях технологий НЛС, ВЛС и фотограмметрии – а именно получение избыточной информации (миллиарды точек, для которых определено положение в пространстве), повышенная скорость полевых работ (для фотограмметрии и ВЛС), возможности по сбору больших объемов

данных (десятки и сотни гектаров для площадных и протяженных объектов), возможность наглядной визуализации полученных данных.

Рассмотрим отдельно каждую технологию с учетом актуальных научных публикаций:

### 1. Наземное лазерное сканирование

В основе технологии лежит сбор данных с использованием лазерного сканера – съёмочная система, измеряющая с высокой скоростью (от нескольких тысяч до миллиона точек в секунду) расстояния от сканера до поверхности объекта и регистрирующая соответствующие направления (вертикальные и горизонтальные углы) с последующим формированием трёхмерного изображения (скана) в виде облака точек [1-13].

При этом лазерный сканер может быть статично установлен на месте съёмки, и после выполнения съёмок с нескольких позиций сканы «сшиваются» (совмещаются) в единое облако точек для дальнейшей работы. Также сканер может быть оборудован системой инерциальной навигации (INS) (чаще инерциальным измерительным блоком – IMU для обеспечения записи данных о углах наклона и поворотах сканера), системами визуальной навигации (VNS) и глобальной навигационной спутниковой системой (GNSS). Во втором случае сканер может быть установлен на подвижные транспортные средства или может перемещаться вручную, а благодаря наличию информации о положении сканера в пространстве в каждый момент времени становится возможным получить единое облако точек.

### 2. Воздушное лазерное сканирование

В основе технологии также лежит сбор данных с использованием лазерного сканера, оборудованного системами инерциальной и спутниковой навигации. Сканер устанавливается на пилотируемый или беспилотный летательный аппарат (БПЛА), осуществляет сбор и запись геопространственных данных [14-16].

### 3. Использование методов фотограмметрии

В основе данных методов лежит идея определения положения точки в пространстве по нескольким ее изображениям. Изображения могут быть получены съёмкой любой камерой, получающей визуальные снимки – в том числе цифровые или аналоговые, в видимом или других диапазонах. Камера может быть установлена на БПЛА или может осуществляться съёмка «с рук». Также отдельно может быть записана информация о положении камеры в пространстве с использованием INS, GNSS. После осуществления съёмки выполняется обработка полученного материала, а в конечном итоге могут быть получены – облако точек, ортофотопланы, цифровые модели местности, цифровые модели рельефа, полигональные (в том числе текстурированные) модели для дальнейшего дешифрирования [17-22].

Сравним данные технологии по качественным критериям для выделения слабых и сильных сторон каждой (Таблица 1):

На основе данного сравнения сформирована модель и предложена технология комплексного мони-

Таблица 1.

Сравнение технологий по качественным критериям

Наименование критерия	Наземное лазерное сканирование	Воздушное лазерное сканирование	Фотограмметрия
<b>Стоимость</b>	Высокая	Высокая	Низкая
<b>Точность получаемых данных</b>	Высокая (до 1-2 мм)	Средняя (3-5 см в плане и по высоте)	Средняя (3-5 см в плане и по высоте)
<b>Скорость сбора данных (относительно получаемых объемов)</b>	Средняя	Высокая (десятки гектар за час полета в зависимости от требуемой плотности)	Высокая (десятки гектар за час полета в зависимости от требуемой плотности)
<b>Скорость обработки данных</b>	Средняя (требуются значительные вычислительные мощности для больших объемов данных)	Высокая (как правило данные на выходе уже в едином облаке точек, требующем лишь уравнивания в системе координат)	Средняя (требуются значительные вычислительные мощности для больших объемов данных)
<b>Особенности</b>	Низкая мобильность (в случае статичных лазерных сканеров) позволяет получать данные на небольшом по площади участке, но с высокой точностью в том числе внутри помещений. Возможно затруднение сбора данных в некоторых областях (крышам, элементам «в тени»)	Возможно получение данных о рельефе, закрытом растительностью (лес или трава), возможен доступ к труднодоступным областям (крыши, труднопроходимые территории)	Возможен доступ к труднодоступным областям (крыши, труднопроходимые территории), возможна наглядная визуализация полученных материалов (текстурированная полигональная модель), имеется сильная зависимость качества материала от условий съёмки

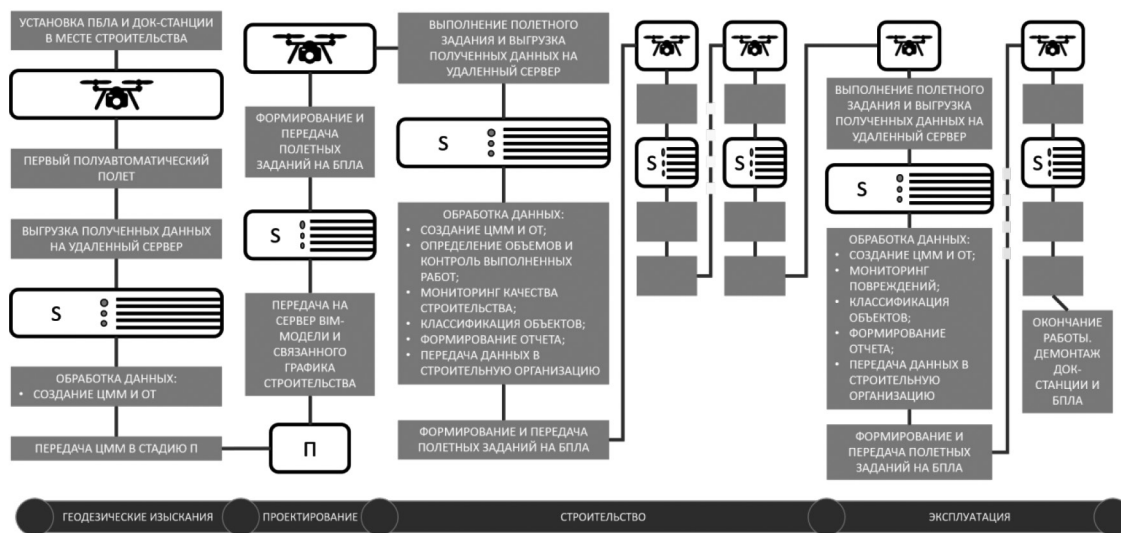


Рис. 1. Общая схема реализации последовательности действий и получаемых данных технологии на этапах жизненного цикла объектов капитального строительства.

торинга и диагностики объектов капитального строительства с использованием методов дистанционного зондирования с беспилотных летательных аппаратов (дронов) на этапах жизненного цикла.

В основе предложенной технологии лежит получение геопривязанных геометрических данных путем наземного, воздушного лазерного сканирования и получения данных методами фотограмметрии с использованием достоинств каждой. Регулярно получаемые данные представляют собой единую цифровую модель всего объекта или его части, представленную в виде облака точек, полигональной модели, цифровой модели местности, ортофотоплана, классифицированного облака точек. Общая последовательность действий и информации на этапах реализации технологии представлена на рисунке 1. Кроме того, такое сочетание позволяет переходить от технологий BIM, подразумевающих использование и обновление информации о строительном объекте, к технологиям цифровой оценки состояния объекта в комплексе с инфраструктурой и природными ландшафтами прилегающих территорий за счет автоматизированного соотнесения информационной модели сооружения с его реальными геометрическими параметрами, а также классификацией его элементов.

## Результаты

Предложенная технология прошла апробацию, реализована на пилотных объектах и тиражируется

для решения ряда задач строительства на этапах жизненного цикла объекта:

- создание цифровой модели местности (ЦММ),
- определение объемов и контроль выполненных работ (земляные работы, ограждающие и несущие конструкции),
- мониторинг качества строительства и соблюдение геометрических параметров,
- создание и обновление цифровой модели строительной площадки, мониторинг повреждений конструкции в области визуально определимых отклонений и т.д.

Технология применена в проектах инфраструктурного строительства, а также экологического мониторинга в Москве и Московской области, в том числе был осуществлен мониторинг хода строительства протяженных объектов с подсчетом объемов выполненных работ и проведением инвентаризации строительной площадки: временной автодороги к полигону ТБО в Серпуховском районе МО. С использованием Технологии были проведены работы по определению действительных объемов твердых бытовых отходов в местах несанкционированного складирования для расчета объемов нанесенного ущерба. Было осуществлено обследование фасадов комплекса из отдельно стоящих жилых корпусов с нежилыми помещениями и подземной автостоянкой для определения объемов дефектов фасадной части здания в результате несоблюдения технологии производства строительных элементов. Также Технологи-

гия была применена в ряде аналогичных проектов. Использование технологии позволило осуществлять полноценный цифровой мониторинг хода строительства, а также контроль геометрических параметров строительства, сокращая присутствие высококвалифицированных специалистов непосредственно на площадке строительства.

В конечном итоге использование данной технологии позволяет получить прямую экономию до 10 млн. руб. на 1000 Га объекта строительства, а также в значительной мере снизить издержки: сократить объем строительных отходов (до 10%), а также сократить общее время строительства (до 20%).

## Выводы

Предложенная технология мониторинга объектов капитального строительства на этапах жизненного цикла методами дистанционного зондирования с беспилотных летательных аппаратов (дронов) на основе высокоточной цифровой модели объекта дает возможность оценивать в динамике геометрические параметры крупных строительных объектов за счет оперативного сбора информации с помощью методов дистанционного зондирования с беспилотных летательных аппаратов (дронов) для создания и обновления цифровых моделей.

Все это в конечном итоге позволяет контролировать соблюдение графика строительства и, как следствие, сокращать перерасход средств, а также объемы недополученной прибыли из-за задержки ввода объекта в эксплуатацию. Использование методов дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов позволяет в существенной мере сократить время сбора данных, обеспечить их

избыток при сохранении необходимой точности.

Фактически, вместо использования ручного труда с традиционными геодезическими приборами предлагается использовать методы получения геометрических данных с привязкой к БПЛА, получая машиночитаемую информацию, которая может в режиме онлайн обрабатываться удаленными серверами. Это сильно повлияет на рынок труда в области геодезических услуг (сократит потребность в рабочих, но увеличит требования к их квалификации), а также даст возможность развития новых методов классификации и распознавания элементов на основе пространственного анализа.

В тоже время технологический переход на использование дронов для дистанционного зондирования открыл широкие возможности к разработке методов полностью автоматизированного обновления графиков строительства в достаточной детализации путем сравнения состояний «план» (на основе BIM 4D) и «факт» (на основе собираемой с площадки строительства информации) в цифровом пространстве проекта. Для этого требуется дальнейшее изучение возможностей геометрического анализа и топологического сопоставления двух обозначенных моделей в том числе с тесным взаимодействием со строительными компаниями, имеющими высокий уровень внедрения и адаптации в свою деятельность BIM-технологий на этапах проектирования и строительства.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51013

## Литература

1. Kim, H., Yoon, J., Hong, J., Sim, S.-H. Automated Damage Localization and Quantification in Concrete Bridges Using Point Cloud-Based Surface-Fitting Strategy//Journal of Computing in Civil Engineering. - 2021. -35(6).- 04021028
2. Dehbi, Y., Leonhardt, J., Oehrlein, J., Haurert, J.- H. Optimal scan planning with enforced network connectivity for the acquisition of three-dimensional indoor models //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. - 2021. 180, с. 103-116
3. Takhirov, S.M. Control of Construction Quality by a Terrestrial Laser Scanner: Example of Steel Frame Building//HORA 2021 - 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, Proceedings.- 2021. - 171163.
4. Takhirov, S.M., Kayen, R.E. Point Clouds of Bridge Generated by Terrestrial Laser Scanner and Images via Structure from Motion Technique: Comparison Study//HORA 2021 - 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, Proceedings. - 2021. – 171163.
5. Al-Durgham, K., Lichti, D.D., Kwak, E., Dixon R. Automated accuracy assessment of a mobile mapping system with lightweight laser scanning and mems sensors// Applied Sciences (Switzerland). - 2021. - №11(3),1007. - с.1-14
6. Pentez Cabrera, P.C. Land movement detection from terrestrial laser scanner (LiDAR) analysis// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. - 2021. -11744.
7. Gollob, C., Ritter, T., Nothdurft, A. Comparison of 3D point clouds obtained by terrestrial laser scanning and personal laser scanning on forest inventory sample plots // Data. - 2020. - №5(4),103. - с. 1-13



8. Азаров Б.Ф., Федорова Е.А. Использование наземного лазерного сканирования для обследования состояния берегов красноярского водохранилища// Геопрофи: научно-технический журнал по геодезии, картографии и навигации. 2014. № 1. С. 46-52.
9. Олейник А.М., Привалов А.В. О возможности применения наземного лазерного сканирования для деформационного мониторинга сооружений нефтегазовых месторождений//Инновации и инвестиции. - 2021. - № 4. - С. 185-188.
10. Жильцова А.В. Использование наземного лазерного сканирования при мониторинге строительных объектов и конструкций //StudNet. -2020. -Т.3. - № 10. - С. 181.
11. Бударова В.А., Мартынова Н.Г., Шереметинский А.В., Привалов А. В. Наземное лазерное сканирование объектов промышленных площадок на территории нефтегазовых месторождений// Московский экономический журнал. 2019. № 6. С. 4.
12. Богданов А.Н., Алешутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях//Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4 (46). С. 326-332.
13. Ямбаев Х.К., Горохова Е.И. Мониторинг деформаций тоннелей методом наземного лазерного сканирования// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2014. - № S4. - С. 7-12.
14. Бойко Е.С., Карагян А.В. Трёхмерное моделирование анапской пересыпи на основе данных воздушного лазерного сканирования//Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 11-1 (50). С. 77-81.
15. Реджепов М.Б., Колесникова С.А. Анализ применения наземного и воздушного лазерного сканирования//В сборнике: Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства. Материалы I международной научно-практической конференции факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. - 2019. С. 292-300.
16. Кочнева А.А., Мустафин М.Г. Создание цифровых моделей рельефа для проектирования автодорог на основе технологии воздушного лазерного сканирования// Естественные и технические науки. 2015. № 12 (90). С. 91-95.
17. Лозовая С.Ю., Лозовой Н.М., Прохоров А.В. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территорий// Практикум. Учебное пособие -Белгород, 2012.- 168 с.
18. Гермак О.В. БПЛА – Фотограмметрия. //Новая наука: Проблемы и перспективы. - 2015. - № 6-2. - С. 147-149.
19. Щукина О.Г. Эпоха цифровой фотограмметрии// Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. - 2015. - № 8. - С. 14-16.
20. Завтур А., Гришина Н., Чалый Ю. Трёхмерная фотограмметрия, или от фотографии к 3D-модели// САПР и графика. - 2016.- № 2 (232). -С. 58-61.
21. Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Прикладная фотограмметрия//Учебник для вузов / Москва, 2016. -168 с.
22. Попелло Е.С. Информационное моделирование в строительстве на основе фотограмметрии.// В сборнике: Интеграция современных научных исследований в развитие общества. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. -2017. - С. 77-82.