

Технология и организация строительства

УДК 69.05

© А. А. Руденко, д-р экон. наук, профессор
© В. А. Черный, магистрант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: rudenkoa.a@mail.ru,
vladislavblacky@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-6-42-57

© A. A. Rudenko, Dr. Sci. Ec., Professor
© V. A. Cherny, undergraduate
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: rudenkoa.a@mail.ru,
vladislavblacky@yandex.ru

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ И МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕМОНТЕ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

FACTOR ANALYSIS AND METHODOLOGY OF QUALITY CONTROL OF WORKS DURING THE CONSTRUCTION AND RESTORATION OF BUILDINGS USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Представлены результаты исследования и оценки факторов, влияющих на качество строительно-монтажных работ (СМР) с использованием технологии и средств наземного лазерного сканирования (НЛС). В исследовании определены и оценены 20 ключевых факторов, включая инструментальные, человеческие, природные, процедурные, нормативные и другие, влияющие на итоговый результат контроля. Для оценки результатов использовался лазерный сканер Leica RTC360. Целью исследования были анализ и оценка факторов, влияющих на качество контроля работ с использованием средств НЛС, с разработкой методики применения таких средств контроля. Для достижения поставленных в исследовании целей проведен регрессионный анализ данных, влияющих на целевой показатель Y . В качестве этого показателя выбран процент СМР, геометрические параметры которых соответствовали требованиям проектной документации. Сбор аналитических данных (зависимых переменных для исследования) производился по результатам их фиксации на 10 различных типах объектов строительства. С учетом полученных результатов разработана методика контроля качества СМР при строительстве и ремонте зданий с использованием средств НЛС.

Ключевые слова: стохастическая модель, методика, качество работ в строительстве, восстановление зданий, наземное лазерное сканирование в строительстве.

The article presents the results of the study and assessment of the factors affecting the quality of construction and installation works (CIW), using the technology and means of terrestrial laser scanning (TLS). The study identified and evaluated 20 key factors, including instrumental, human, natural, procedural, regulatory factors, etc. that affect the final result of control. The study used the Leica RTC360 laser scanner to evaluate the results. The purpose of the study was to analyze and assess the factors affecting the quality of control using TLS, and to develop a methodology for using such control tools. To achieve the research objectives, there was implemented a regression analysis of data affecting the target indicator Y . As this indicator, the percentage of CIW was chosen, the geometric parameters of which met the requirements of the design documentation. The collection of analytical data-dependent variables for the study was based on the results of their recording at 10 different types of construction sites. Taking into account the results obtained, a methodology for quality control of CIW was developed during the construction and repair of buildings using the terrestrial laser scanning (TLS).

Keywords: stochastic model, methodology, quality of work in construction, restoration of buildings, terrestrial laser scanning in construction.

Введение

Повышение качества строительной продукции является одной из основных наиболее актуальных проблем строительной отрасли. Современные технологии строительства и контроля качества строительно-монтажных работ (СМР) требуют внедрения высокоточных методов.

Вопросы оценки качества строительной продукции рассматривали в своих работах и исследованиях отечественные и зарубежные специалисты. Существенный вклад в решение проблемы оценки качества строительной продукции внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как А. А. Афанасьев, Б. Ф. Белецкий, А. А. Гусаков, А. Х. Теличенко, А. А. Лапидус, А. В. Гинзбург, Н. Н. Данилов, Л. Г. Дикман, В. Д. Копылов, П. П. Олейник, С. А. Синенко, В. Е. Соколович, С. В. Середович, О. В. Кузнецов, А. Х. Байбурин, Р. В. Шульц, И. Милев, D. Lichti, W. Boehler, H. Ingensand, A. Ullrich и др.

Вопросы обеспечения качества СМР являются важными и находятся в фокусе постоянного внимания всех служб строительного контроля на всех этапах строительства.

За начало широкого применения лазерного сканирования принято считать период 2013–2015 гг., когда по аналитическим оценкам экспертных организаций в Северной Америке были зафиксированы в течение указанного периода сотни случаев использования его результатов в процессе инженерных изысканий, предпроектных и проектных разработок [1, 18].

По статистике Госдепартамента США «в настоящее время 34 федеральных агентства США и 50 администраций штатов используют данные лазерного сканирования. Кроме того, 1/3 территории США уже отсканирована. Ежегодные затраты на лазерное сканирование в США составляют не менее 146 млн долл. в год. Прибыль от использования лазерного сканирования с 2022 г. — 13 млрд долл. в год» [12].

Вместе с тем влияние различных факторов на эффективность применения средств наземного лазерного сканирования (НЛС) в настоящее время исследовано недостаточно, что подтверждается отсутствием необходимого количества экспериментальных и численных исследований, а кроме того, и отсутствием положений в регламентирующей и научно-технической документации в данной области. Применение лазерного сканирования, несомненно, позволит снизить трудовые и финансовые затраты при повышении точности результатов оценки качества и объемов выполненных работ.

Актуальность исследования обусловлена отсутствием достаточного количества результатов исследований по оценке значимости факторов, влияющих на качество оценки СМР с применением средств НЛС.

Целью исследования является анализ и моделирование факторов, влияющих на качество контроля СМР с использованием средств НЛС, с разработкой методики применения таких средств.

Задачи исследования:

1. Определение, исследование, оценка значимости и ранжирование факторов, влияющих на качество СМР с применением средств НЛС.

2. Разработка стохастической модели (уравнения регрессии), позволяющей учесть влияние каждого фактора на результирующий показатель [3].

3. Разработка методики применения средств НЛС для оценки качества выполненных СМР.

Объект исследования — средства наземного лазерного сканирования, используемые при оценке качества выполненных СМР.

Предмет исследования — факторы, влияющие на качество СМР, оцениваемое средствами НЛС при контроле выполненных работ.

Границы исследования — исследования проводились с использованием средств НЛС для следующих видов СМР: монтажные, бетонные, отделочные.

Научная новизна полученных результатов заключается:

- в получении результатов исследования по подбору факторов, определению их веса и ранжированию с разработкой стохастической модели влияния факторов на результирующий показатель Y — критерий качества СМР как процент выполненных СМР, геометрические параметры которых соответствуют требованиям проектной документации;
- разработке новой методики применения средств НЛС для оценки качества выполненных СМР.

В настоящее время одним из перспективных методов контроля качества работ является НЛС, представляющее собой высокотехнологичный сбор пространственных данных с применением геодезической аппаратуры — лазерных сканеров [18]. Эти технологии позволяют значительно повысить точность измерений и снизить вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Однако качество контроля с использованием НЛС зависит от множества факторов, таких как плотность сканирования, точность оборудования, условия окружающей среды и квалификация специалистов и многое другое, что и следует учесть и оценить в данном исследовании.

Методы

В России, как и за рубежом, средства НЛС получают все большее применение. Особенно высока эффективность применения инструментария лазерного сканирования в процессе инженерных изысканий, эксплуатации и строительства линейных объектов. Указанное получило подтверждение [1, 2] при проектировании и строительстве железной дороги на участке Москва–Казань–Екатеринбург, где с использованием средств воздушного лазерного сканирования разработана проектная документация, причем в разных масштабах — от 1 : 500 до 1 : 2000 — с картографической привязкой к местности (рис. 1).

При этом был применен фактически полный спектр имеющегося на тот момент инструментария способов и средств построения картографических изображений и разработки проектных документов, в том числе все виды лазерного сканирования (наземное, воздушное, мобильное) и методик обработки их результатов (предварительная фильтрация, регистрация и совмещение скан-файлов, идентификация точек и коррекция геопривязки), что позволило со 100 %-ной точностью формировать цифровые топографические планы для целей проектирования (рис. 2) [9–11, 13].



Рис. 1. Участки проведения сканирования средствами НЛС на участке Москва – Казань

Оценка эффективности применения средств лазерного сканирования по соотношению «трудозатраты, финансовые затраты – точность» показала высокую результативность мобильных (автомобильных) лазерных сканеров, позволяющих формировать облака точек требуемой плотности с высокой скоростью (рис. 3) [8].

В настоящее время в строительной отрасли России в практике выполнения контроля СМР получили большое распространение такие средства НЛС, как приборы марок Trimble x7, Leica RTC360, Trimble x12, Leica Scan Station P50, Faro Focus 350 premium и некоторые другие. В границах данного исследования при оценке факторов исполь-

зовался лазерный лидар марки Leica RTC360 (табл. 1), хорошо зарекомендовавший себя в строительстве за счет оптимального соотношения «цена – качество», надежности и простоты применения [12, 14, 15].

На начальном этапе исследование проводилось методом экспертной оценки с привлечением шести квалифицированных специалистов строительного контроля, осуществляющих проверку качества СМР с использованием средств НЛС на таких строящихся объектах и комплексах Санкт-Петербурга, как ЖК «Сенат в Московском», ЖК «Amber Club (Амбер клуб)», ЖК «Imperial Club», ЖК «Astra Marine», ЖК «Pulse Premier», ЖК «Титул в Московском», ЖК «Панора-

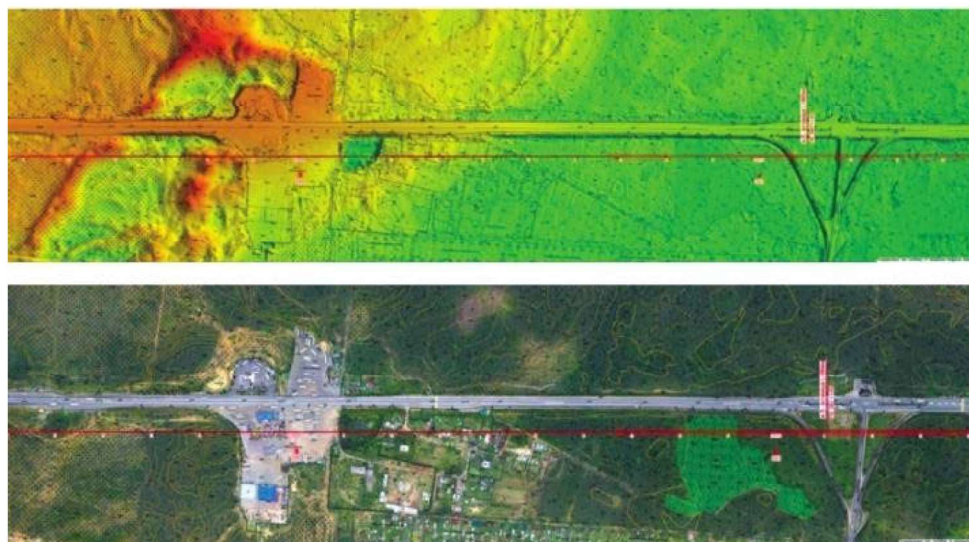


Рис. 2. Цифровая модель рельефа на участке трассы М4 Москва–Казань



Рис. 3. Общий вид передвижного сканирующего комплекса на базе легковых автомобилей

Таблица 1

Технические характеристики лазерного сканера марки Leica RTC360

	Скорость сканирования	2 000 000
	Класс лазера	1-й
	Максимальная дальность	130 м
	Минимальная дальность	0,5 м
	Размер лазерного пятна	6 мм
	Поле зрения	360°/300°
	Точность 3D-точки	1,9 мм на 10 м
	Угловая точность	18"
	Точность дальномера	1,0 мм
	Уровень шума	0,4 мм на 10 м, 0,5 мм на 20 м
	Рабочая температура	от -20 °С
	Температура хранения	от -40 °С до + 70 °С
	Защищенность	IP54

ма парк Сосновка», ЖК «Автограф в центре», вестибюль станции метро «Театральная», наклонный ход станции метро «Юго-Западная», флагшток комплекса «3 эпохи», здание канатного цеха на Васильевском острове.

Для достижения поставленных в исследовании целей был проведен регрессионный анализ данных, влияющих на целевой показатель Y , в качестве которого был выбран процент СМР, геометрические параметры которых соответствовали требованиям проектной документации [16, 17]. Сбор аналитических данных для исследования (зависимых переменных) производился по результатам их фиксации на 10 различных типах объектов строительства, указанных выше. Для этих объектов было проведено определение соответствия выполненных СМР требованиям проектной документации.

Этапы исследования:

1. Сбор данных и анализ возможных вариантов по выбору зависимой переменной.
2. Определение целевой переменной Y , в качестве которой выбран критерий качества как процент выполненных СМР, соответствующих проектной документации.
3. Отбор и группировка факторов, влияющих на целевую переменную Y . Из совокупного массива 38 факторов были выбраны 20,

значимо влияющих на целевую переменную Y (табл. 2).

4. Подготовка информации для анализа, включая очистку, преобразование и нормализацию данных.

5. Экспертная оценка принятых в исследовании 20 факторов с расчетом их ранга и веса и выбором наиболее значимых шести факторов (табл. 3).

6. Разработка регрессионной модели с получением уравнения линейной регрессии при помощи программного комплекса Microsoft Excel.

Для этих целей был применен метод множественной линейной регрессии, предусматривающий возможность моделирования связей каждой из независимых переменных с оценкой их влияния на зависимую переменную Y .

7. Оценка модели: проверка качества уравнения регрессии, основанная на методах дисперсного анализа и выявления точности взаимосвязи показателей модели, с проверкой статистической значимости модели.

8. Интерпретация модели и результатов регрессионного анализа, включая оценку коэффициентов независимых переменных и их значимость [9].

Сама концепция оценки объемов и качества НЛС в строительстве основана на

способах, используемых при проведении геодезических работ, в соответствии со следующими нормативными документами при контроле:

- бетонных работ согласно СП70.13330.2012;
- монтажа ограждающих конструкций согласно СП70.13330.2012;
- штукатурных работ согласно СП 71.13330.2017 [7].

Оценка объемов и качества выполненных работ в строительстве основана на сопоставлении данных проекта с фактическими данными в виде облака точек, полученных по результатам лазерного сканирования. Трактовка указанного в СП 126.13330.2017 дает однозначное понимание того, что для каждого строительного объекта разрабатывается геодезическая разбивочная основа с последующим выносом проекта в натуру [4].

Результаты

На начальном этапе выбранные и сгруппированные факторы, полученные в процессе полевых измерений, были сформированы и представлены в табл. 2.

Произведена экспертная оценка уровня влияния исследуемых факторов на целевую переменную Y путем ранжирования значимости факторов присвоением им оценки влияния от 1 до 20, где 20 обозначает наибольшую степень влияния. Вычислены сумма рангов и вес каждого фактора. Данные представлены в табл. 3.

В результате экспертной оценки определены наиболее значимые факторы, которые будут использованы в качестве критериев X при разработке уравнения линейной регрессии (табл. 4).

Была проведена оценка влияния факторов для различных видов строительного-монтажных работ (бетонные работы, монтажные работы, отделочные работы) для трех наиболее распространенных типов объектов: жилые и общественные здания, производственные

здания, уникальные здания. Данные приведены в матрице табл. 5.

Визуализация табличных данных позволяет подтвердить, что выбранные на основе экспертных оценок наиболее значимые факторы имеют влияние на каждый тип всех указанных видов строительного-монтажных работ.

Для приведения информации о степени влияния факторов к численным значениям была сформирована табл. 6, отражающая оценочную характеристику влияния каждого фактора в зависимости от условий, используемых средств измерений, контроля и их характеристик, квалификации специалистов и качества проектных данных.

В табл. 6 представлены факторы, сгруппированные в зависимости от видов СМР — бетонных, монтажных и отделочных, а также от типов зданий — жилых, производственных и уникальных. Принятие в качестве условия деления по п. 1 — «функциональному назначению объекта» — объясняется различным конструктивным устройством, видами выполняемых работ и особенностями отделки элементов зданий.

Обсуждение

При создании уравнения регрессии для показателя качества геометрически правильных конструкций, соответствующих проектной документации, определенных под контролем средств НЛС, был применен Microsoft Excel [18, 19, 20, 21].

В табл. 7 приведены данные по оценочным баллам каждого фактора X_1 – X_6 как среднестатистические, определенные из массива оценок каждого показателя на каждом из 10 указанных ранее объектов.

Далее были реализованы следующие этапы:

1. Вычисление коэффициентов уравнения линейной регрессии с настройкой массивов входных интервалов целевой переменной Y и входных интервалов независимых переменных X для решения полученного уравнения.

Таблица 2

Факторы, оказывающие влияние на качество контроля строительного-монтажных работ с использованием средств НЛС

	№ п/п	Наименование факторов
1. Технологические факторы	1	Плотность сканирования (точек/м ²)
	2	Точность оборудования НЛС (мм)
	3	Скорость сканирования (м ² /ч)
	4	Количество сканеров, используемых одновременно (шт.)
	5	Частота калибровки оборудования (раз в месяц)
	6	Время обработки данных сканирования (ч)
	7	Точность проектных эталонных данных (по шкале от 1 до 3)
2. Организационные факторы	8	Квалификация специалиста НЛС (по шкале от 1 до 3)
	9	Частота контроля (раз в месяц)
	10	Наличие стандартов контроля качества (да/нет)
	11	Опыт строительной компании в использовании НЛС (лет)
	12	Своевременность устранения дефектов (дни с момента обнаружения)
	13	Количество сотрудников, обученных работе с НЛС (чел.)
	14	Наличие системы управления качеством (да/нет)
3. Факторы, связанные с исследуемыми	15	Тип конструкции (железобетон, камень, отделка)
	16	Сложность геометрии конструкции (по шкале от 1 до 5)
	17	Размеры конструкции (м ²)
	18	Качество материалов (по шкале от 1 до 3)
	19	Условия окружающей среды (по шкале от 1 до 3)
	20	Условия эксплуатации конструкции (нормальные, агрессивные)

2. Для работы с массивами была использована встроенная функция Microsoft Excel — «Линейн». Она позволяет рассчитывать результаты статистического ряда значений для последующей оценки с использованием метода наименьших квадратов и, как следствие, позволяет получить максимально точное значение [5, 9, 12, 13].

3. Полученные коэффициенты позволили сформировать уравнение линейной регрессии

$$Y = 2,075X_1 + 3,742X_2 + 2,473X_3 + 1,204X_4 + 2,908X_5 + 1,409X_6 + 55,96, \quad (1)$$

где Y — целевая переменная, критерий качества СМР (процент выполненных СМР, соответствующих проектной документации); X_1 — плотность сканирования (точек/м²); X_2 — точность оборудования НЛС (мм); X_3 — тип используемого материала; X_4 — условия окружающей среды; X_5 — квалификация спе-

циалистов НЛС; X_6 — точность проектных эталонных данных; 55,96 — свободный член (базовый уровень качества при нулевых значениях всех факторов).

Оценка модели и анализ значимости факторов позволяют отметить, что наибольшее влияние на показатель Y оказывают следующие факторы:

- X_2 — точность оборудования НЛС (мм) с коэффициентом 3,742, являющимся самым высоким и, как следствие, наиболее значимым;
- X_5 — квалификация специалистов НЛС с коэффициентом 2,908;
- X_3 — тип используемого материала, коэффициент 2,473.

Наименьшее влияние оказывают такие факторы, как:

- X_6 — точность проектных эталонных данных, коэффициент 1,409;

Результаты экспертной оценки значимых факторов с расчетными значениями их ранга и веса

№ п/п	Наименование фактора риска	Эксперты						Σ рангов	Вес фактора
		1	2	3	4	5	6		
1	Плотность сканирования (точек/м ²)	16	20	19	19	20	20	114	0,0904
2	Точность оборудования НЛС (мм)	9	10	16	18	17	18	88	0,0698
3	Скорость сканирования (м ² /ч)	4	5	13	6	9	7	44	0,0349
4	Количество скаперов, используемых одновременно (шт.)	11	9	14	16	16	16	82	0,0650
5	Частота калибровки оборудования (раз в месяц)	15	14	11	13	14	10	77	0,0611
6	Время обработки данных сканирования (ч)	18	15	12	8	10	12	75	0,0595
7	Точность проектных эталонных данных (по шкале от 1 до 3)	10	18	15	17	18	17	95	0,0753
8	Квалификация специалиста НЛС (по шкале от 1 до 3)	17	19	20	9	19	19	103	0,0817
9	Частота контроля (раз в месяц)	7	3	5	14	8	8	45	0,0357
10	Наличие стандартов контроля качества (да/нет)	6	12	8	12	12	14	64	0,0507
11	Опыт строительной компании в использовании НЛС (лет)	8	11	10	10	13	9	61	0,0484
12	Своевременность устранения дефектов (дни с момента обнаружения)	5	4	4	7	6	6	32	0,0253
13	Количество сотрудников, обученных работе с НЛС (чел.)	14	13	17	1	7	11	63	0,05
14	Наличие системы управления качеством (да/нет)	2	6	3	5	4	4	24	0,0190
15	Тип конструкции (железобетон, камень, отделка)	12	8	7	3	3	5	38	0,0301
16	Сложность геометрии конструкции (по шкале от 1 до 5)	3	1	2	2	2	3	13	0,0103
17	Размеры конструкции (м ²)	13	7	6	4	5	2	37	0,0293
18	Качество материалов (по шкале от 1 до 3)	20	16	9	15	15	13	88	0,0698
19	Условия окружающей среды (по шкале от 1 до 3)	19	17	18	11	11	15	91	0,0722
20	Условия эксплуатации конструкции (нормальные, агрессивные)	1	2	1	20	1	1	26	0,0206

• X_4 — условия окружающей среды, коэффициент 1,204, являющийся наименее значимым.

Выполнена проверка качества уравнения регрессии, основанная на методах дисперсного анализа.

Для этого были рассчитаны [5, 6]:

1. Сумма квадратов относительно среднего Y (общая) — TSS (total sum of squares).

2. Сумма квадратов, обусловленная регрессией (объясненная), — RSS (regression (residual) sum of squares).

3. Сумма квадратов относительно регрессии (необъясненная, остаток) — ESS (error sum of squares).

Успешная проверка модели заключается в выполнении равенства

$$TSS = RSS + ESS. \quad (2)$$

Таблица 4

Условное обозначение наиболее значимых факторов

№ п/п	Описание фактора	Условное обозначение фактора
1	Плотность сканирования (точек/м ²)	X_1
2	Точность оборудования НЛС (мм)	X_2
3	Точность проектных эталонных данных (по шкале от 1 до 3)	X_3
4	Квалификация специалиста НЛС (по шкале от 1 до 3)	X_4
5	Качество материалов (по шкале от 1 до 3)	X_5
6	Условия окружающей среды (по шкале от 1 до 3)	X_6

Был рассчитан коэффициент детерминации по формуле

$$R^2 = \frac{RSS}{TSS} = \frac{TSS - ESS}{TSS} = 1 - \frac{ESS}{TSS}. \quad (3)$$

Рассчитанный коэффициент детерминации ($R^2 = 0,9801$) позволяет утверждать, что 98 % дисперсии результативного признака Y объясняется уравнением регрессии. Этот показатель говорит о высокой точности модели.

Выполнена проверка критерия Фишера, определяющая значимость уравнения (1). Определена величина F -критерия (критерия Фишера) по формуле

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{m - p - 1}{p}, \quad (4)$$

где p — число независимых переменных в уравнении регрессии (6 шт.); m — число объектов исследования.

Произведен подбор критического значения F (критерия Фишера) по таблицам для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и соответствующих степеней свободы $k_1 = p = 6$; $k_2 = n - m - 1 = 3$; $F_{\text{крит}} = 8,94$.

Выдвигаем нулевую гипотезу, обозначая все влияющие коэффициенты значениями ноль:

$$H_0: b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = b_6 = 0. \quad (5)$$

Определено фактическое значение F (критерия Фишера) по формуле (4):

$$F_R = 19,75; F_{\text{крит}} = 8,94. \quad (6)$$

Следовательно,

$$F_R > F_{\text{крит}}, \quad (7)$$

что позволило определить тот факт, что нулевая гипотеза может быть отклонена, а модель является статистически значимой.

Результаты проведенного исследования подтверждают значимость использования технологии НЛС для повышения качества контроля СМР.

Анализ работ других авторов по данной тематике дает основание отметить, что в большинстве таких работ не уделялось достаточного внимания количественной оценке влияния различных факторов, что позволяет сделать вывод о научной новизне данного исследования, в том числе и в части методологической формализации процессов контроля работ. То есть требуется разработка методики как комплексного подхода и взаимосвязанных приемов и средств по контролю СМР с использованием средств НЛС.

Сформируем методику контроля качества СМР при строительстве и ремонте зданий с использованием средств НЛС, включающую следующие этапы:

1. Рекогносцировка объекта строительства.
2. Прием геодезической разбивочной основы, положений реперных точек.
3. Ориентирование станции тахеометра от существующей геодезической разбивочной основы (ГРО).
4. Установка марок для НЛС.
5. Определение координат марок НЛС.

Таблица 5

Матрица влияния факторов на качество СМР под контролем НЛС для различных типов объектов на различных стадиях работ

Тип зданий			2. Тип контролируемых СМР		
			2.1	2.2	2.3
			Бетонные работы	Монтажные работы	Отделочные работы
1. Функциональное назначение объекта	1.1	Жилые и общественные здания	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$
	1.2	Производственные здания	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$
	1.3	Уникальные здания	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6$

6. Выбор настроек и методов выполнения съемки наземным сканером.

7. Выполнение хода НЛС.

8. Предварительная регистрация станций по сканированию.

9. Завершение полевых испытаний по НЛС, проверка полноты собранных данных.

10. Камеральная обработка результатов.

11. Составление заключения о качестве выполненных работ на объекте по каждому проверяемому виду СМР.

В качестве примера процесса проверки качества выполненных СМР далее представлен материал по проверке качества выполнения бетонных работ. По результатам каждого вида работ предлагается составлять два типа схем:

- трехмерное изображение с визуализированными данными о выявленных отклонениях существующих вариантов показов различных дуговых, круговых, поворотных изображений и перемещений (рис. 4);

- двумерную расчетную стандартную схему отметок (рис. 5).

Для комплексной оценки качества выполненных работ следует учитывать и применять сразу две схемы. Примером комплексного анализа является показанная на рис. 4 обмерная схема трехмерного облака точечных данных в совокупности с трехмерной

моделью здания из железобетонных элементов в программе NanoCAD.

Данный подход к оценке и анализу выполненных работ предполагает, с одной стороны, максимальное количество точек, что увеличивает концентрацию точек обмера, с другой стороны, их оптимальное количество, так как увеличение и избыточное количество обмеров приведет к увеличению погрешности результатов и усложнению работы системы. В данном случае в каждом облаке обмеров назначается определенный окрас пикселей *RGB*, что будет определяться диапазоном назначенного предельного максимального и минимального размеров, отражаемых вокруг расчетной схемы, детализирующей ее. Определение данных по допуску выполняется по СП 70.13330.2012.

Целью строительного контроля качества и объемов работ являлась оценка выполнения требований проектной и исполнительной документации по объемам работ и качеству СМР в соответствии с проектной и сметной документацией и согласованными ведомостями объемов работ.

Процесс обмера и фиксация полученных результатов отражались в обмерном 180-градусном чертеже по каждому помещению и зданию соответственно. Сравнение и оценка соответствия выполнялись по вер-

Показатели оценочных баллов для присвоения каждому фактору

№ п/п	Наименование фактора	Расшифровка фактора	Оценочный балл
1	Плотность сканирования (точек/м ²)	Низкая плотность, 7000 точек/м ²	1
		Средняя плотность, 28 000 точек/м ²	2
		Высокая плотность, 100 000 точек/м ²	3
2	Точность оборудования НЛС (мм)	Точность более 10 мм на 10 м	1
		Точность от 5 до 10 мм на 10 м	2
		Точность менее 5 мм на 10 м	3
3	Тип используемого материала	Низкокачественные материалы, полученные от новых поставщиков, со значительными дефектами или изменением свойств	1
		Среднее качество материалов, полученных от известных поставщиков, с некоторыми незначительными дефектами или изменениями свойств	2
		Высококачественные материалы, полученные от надежных поставщиков, с качественными свойствами и минимальными дефектами	3
4	Условия окружающей среды	Условия с умеренными температурами, низкой влажностью и минимальными ветром и осадками	1
		Хорошие условия с некоторыми колебаниями температуры, влажности и ветра, но все еще подходящие для строительных работ	2
		Плохие погодные условия с экстремальными температурами, высокой влажностью, сильным ветром или частыми осадками, затрудняющими проведение строительных работ	3
5	Квалификация специалистов НЛС	Специалисты не имеют образования по специальности или отсутствует опыт работы	1
		Специалисты имеют высшее или среднее специальное образование, опыт работы в данной сфере 1–5 лет	2
		Специалисты имеют высшее образование, опыт работы в данной сфере не менее 5 лет	3
6	Точность проектных эталонных данных	Чертежи содержат существенные неточности, противоречия или пропуски информации. Спецификации неполны или содержат серьезные ошибки. Проектная модель имеет недостаточную детализацию, что значительно осложняет сравнение с данными НЛС и не позволяет провести качественный контроль. Результаты сравнения с НЛС будут малоинформативны. Существуют серьезные риски несоответствия выполненных работ проекту	1
		В чертежах присутствуют незначительные неточности или неясности, не приводящие к существенным ошибкам при сравнении с данными НЛС. Некоторые спецификации могут быть неполными или содержать незначительные расхождения. Проектная модель имеет достаточную детализацию для большинства, но не всех элементов. Для выполнения качественного анализа может потребоваться дополнительное уточнение некоторых параметров проекта	2
		Чертежи полные, понятные и не содержат противоречий. Все необходимые размеры и спецификации указаны корректно и однозначно. Проектная модель содержит достаточную детализацию для проведения качественного сравнения с данными НЛС. Вероятность ошибок в проекте минимальна. Все необходимые для контроля параметры и элементы присутствуют в проекте и точно определены	3

Факторы, влияющие на Y — критерий качества СМР по 10 объектам (с оценочным баллом каждого фактора по табл. 6)

№ объекта исследования	Процент качественно выполненных СМР	Ранжированные значения экспертных оценок влияющих факторов					
	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	90	3	2	3	2	2	3
2	85	2	3	1	3	2	1
3	87	3	2	3	1	2	2
4	92	3	2	3	2	3	3
5	90	3	3	2	3	2	2
6	92	2	3	3	3	2	3
7	87	3	2	2	2	3	1
8	90	2	3	2	3	2	3
9	88	3	2	3	3	2	1
10	98	3	3	3	3	3	3

тикальным и горизонтальным направлениям для вертикальных конструкций (стен) и по горизонтали для перекрытий и покрытий в соответствии с СП 48.13330.2011. Алгоритм контрольных процедур СМР инструментами НЛС базируется на геодезическом инструментарии контроля работ в строительстве и представляет собой комплекс измерительно-контрольных мероприятий, предназначенных для контроля оценки соответствия геометрических параметров возводимого объекта проектным документам.

Наибольшее влияние на качество контроля оказывают точность оборудования НЛС и квалификация специалистов, что подчеркивает необходимость инвестиций в современное оборудование и обучение персонала. Тип используемого материала играет не менее важную роль, что указывает на необходимость тщательного выбора материалов на этапе проектирования. Точность проектных данных и условия окружающей среды имеют меньшее влияние, но их учет все же необходим для повышения точности прогнозов.

Выводы

1. Экспертно-аналитическая оценка позволила выявить шесть наиболее значимых факторов, влияющих на качество оценки СМР с использованием лазерного сканера

Leica RTC360, а именно: плотность сканирования (точек/м²), показатель значимости — 0,0904; точность оборудования НЛС (мм), показатель значимости — 0,0698; точность проектных эталонных данных (по шкале от 1 до 3), показатель значимости — 0,0753; квалификация специалиста НЛС (по шкале от 1 до 3), показатель значимости — 0,0817; вид оцениваемых работ (по шкале от 1 до 3), показатель значимости — 0,0698; условия окружающей среды (по шкале от 1 до 3), показатель значимости — 0,0722.

2. В процессе математической обработки результатов экспертной оценки и их анализа на реальных строительных объектах получена регрессионная модель в виде зависимости $Y = 2,075X_1 + 3,742X_2 + 2,473X_3 + 1,204X_4 + 2,908X_5 + 1,409X_6 + 55,96$.

Представленное уравнение позволяет сделать вывод о степени влияния указанных факторов на результирующий показатель, то есть на процент выполненных СМР, соответствующих требованиям проектной документации, а именно: X_2 — точность оборудования НЛС (мм) с коэффициентом 3,742, являющимся самым высоким и, как следствие, наиболее значимым; X_5 — квалификация специалистов НЛС с коэффициентом 2,908; X_3 — вид оцениваемых работ, коэффици-

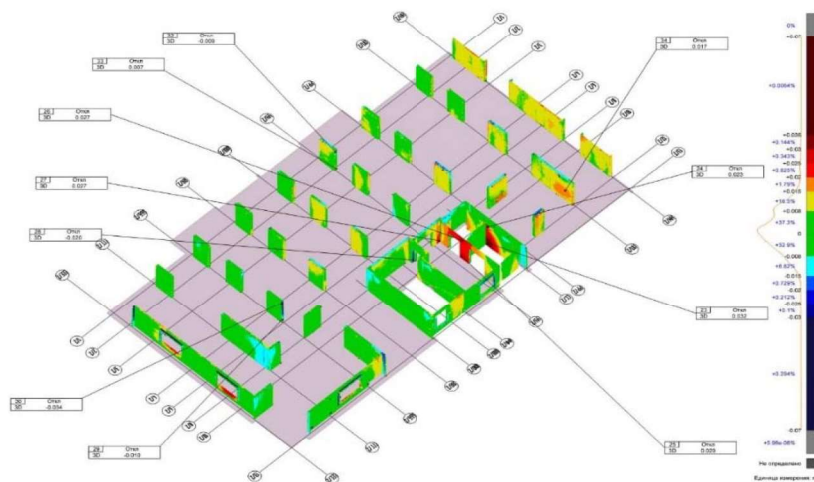


Рис. 4. Объемно-параметрическая модель геометрических отклонений при оценке работ на объекте

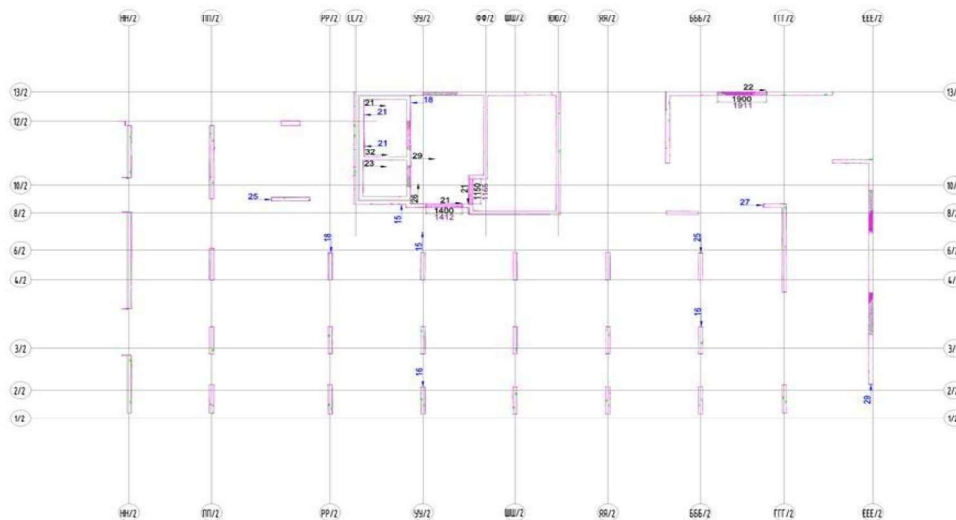


Рис. 5. Классическая схема геометрических отклонений при производстве монолитных работ на объекте

ент 2,473. Меньшее влияние будут оказывать такие факторы, как: X_1 — плотность сканирования, коэффициент — 2,075; X_6 — точность проектных эталонных данных, коэффициент 1,409; X_4 — условия окружающей среды, коэффициент 1,204.

3. Разработанная математическая модель позволяет дифференцированно из множества воздействующих факторов учитывать и более качественно прорабатывать именно полученные в результате исследования, что

позволит снизить затраты и исключить их нецелевое использование, а также повысить качество оценки СМР при строительстве и ремонте зданий.

Данные, полученные с использованием средств НЛС, могут быть интегрированы в современные BIM-модели (Building Information Modeling). Таким образом, разработанная модель может стать частью цифровой системы управления строительством, что может позволить автоматизировать про-

цессы контроля и повысить их точность. Модель также может быть использована для непрерывного мониторинга качества СМР на строительных объектах, что позволит оперативно выявлять отклонения и принимать меры по их устранению.

4. Точность результатов при реализации предложенной методики контроля качества СМР будет выше при комплексном применении двух видов контрольных схем: а) контроля на основе трехмерной схемы оценки параметров выполненных СМР и б) двумерного изображения геометрических параметров работ с указанными отклонениями.

Таким образом, разработанные стохастическая модель (уравнение регрессии) и методика контроля качества СМР представляют эффективный инструментарий оценки степени влияния выявленных факторов на качество СМР. Их внедрение в практику строительного контроля позволит не только улучшить качество строительства, но и оптимизировать затраты на контроль, сократить процесс проверки качества и сроки строительства.

Библиографический список

1. Алексеев Н. Н. Применение технологии лазерного сканирования в различных отраслях и на различных этапах жизненного цикла объектов // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 62–73.
2. Ковач Н. С., Шурушин К. Ю. Опыт использования МЛС для создания трехмерной модели инфраструктуры железных дорог // Геопрофи. 2012. № 2. С. 23–26.
3. Кузнецов О. Ф., Миронов Н. А., Кузнецова А. О. Оценка качества строительно-монтажных работ с использованием современных технологий // Приволжский научный вестник. 2014. № 5 (33). С. 33–35. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-stroitelno-montazhnyh-rabot-s-ispolzovaniem-sovremennyh-tehnologiy> (дата обращения: 20.02.2025).
4. Руденко А. А., Юрченко А. Н. Оценка факторов и разработка методики определения продолжительности ремонта и восстановления зданий // Инженерный вестник Дона. 2025. № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9742>
5. Руденко А. А., Черный В. А. Особенности и эффективность применения средств наземного лазерного сканирования при контроле работ в строительстве // Инновации и инвестиции. 2025. № 2. С. 635–641. URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/bb7/uttwrcvypoxd99wxpgg15uch2t3eytgp/%E2%84%961%202025%20%D0%98%D0%B8%D0%98.pdf>
6. Лысенко А. А. Введение в регрессионный анализ данных и регрессионные модели // Неделя науки Санкт-Петербургского гос. морского техн. ун-та. 2020. Т. 1, № 3–1. С. 93. EDN QUONOO.
7. Руденко А. А., Юрченко А. Н. Регрессионный анализ факторов качества ремонтно-восстановительных работ с учетом технического состояния зданий // Инновации и инвестиции. 2025. № 1. С. 585–590.
8. Шурушин К. Ю. Проведение инженерно-геодезических изысканий объектов топливно-энергетического комплекса с использованием технологий мобильного лазерного сканирования и тепловизионной съемки // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 3 (28). С. 10–13.
9. Ковач Н. С. Мобильные лазерные системы в дорожной отрасли // Дороги: Инновации в строительстве. 2013. № 26. С. 34–36.
10. Олейникова Я. И., Горбунова А. А., Есиков А. Н. Особенности изучения математической статистики // StudNet. 2022. Т. 5, № 6. С. 221.
11. Богданов А. Н., Листратов Я. А. Строительный контроль методом наземного лазерного сканирования // Известия Казанского гос. архитектурно-строительного ун-та. 2019. № 4 (50). С. 401–409. EDN BRIRDS.
12. Исупов Н. С., Фомин Н. И. Технология лазерного сканирования на этапе строительства как инструмент управления жизненным циклом здания // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2023 года / под общ. ред. А. А. Семенова. СПб.: СПбГАСУ, 2023. С. 47–52. DOI 10.23968/BIMAC.2023.007. EDN STLFRM.
13. Малахова О. С. Корреляционно-регрессионный анализ зависимости выручки от факторов внешнеэкономической деятельности (на примере ООО «ЦМТ „Аналитика“») // Аллея науки. 2019. Т. 2, № 1 (28). С. 592–597. EDN YUMBFB.
14. Барлиани А. Г., Чудова В. С. Анализ влияния факторов на осадку инженерных сооружений методом многофакторного регрессионного анализа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 9. С. 141–147.
15. Чибирова М. Э. Анализ данных и регрессионное моделирование с применением языков программирования Python и R // Научные записки молодых исследователей. 2019. Т. 7, № 2. С. 37–45. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-dannyh-i-regressionnoe-modelirovanie-s-primeneniem-yazykov>

programmirovaniya-python-i-r (дата обращения: 18.02.2025).

16. Малёнова С. Г., Тарасов Р. В., Макарова Л. В. Применение регрессионного анализа при контроле качества строительной продукции // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 5 (61). С. 25–27. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/05/67157> (дата обращения: 14.02.2025).

17. Мелёхин В. Б., Магдиев А. Ш. Методологические основы оценки качества строительной продукции // Науковедение. 2014. № 4 (23). С. 114. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-osnovy-otsenki-kachestva-stroitelnoy-produktsii> (дата обращения: 20.02.2025).

18. Маряшов А. Д., Руденко А. А. Новые технологические решения при выполнении инженерных изысканий в строительстве // Научно-технологические инновации (XXV научные чтения): сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 23 ноября 2023 г. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. С. 829–833. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59997735>

19. Sugarbaker L. J., Constance E. W., Heidemann H. K., Jason A. L., Lukas V., Saghy D. L., Stoker J. M. The 3D elevation program initiative — A call for action // U.S. Geological Survey Circular 1399. 2014. 35 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/circ/1399/pdf/circ1399.pdf>

20. Snyder G. I., Sugarbaker L. J., Jason A. L., Maune D. F. National requirements for enhanced elevation data // U.S. Geological survey open-file report 2013–1237. 2012. 371 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1237>

21. Snyder G. I. The 3D elevation program — summary of program direction // U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012–3089. 2012. 2 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3089/>

References

1. Alekseenko N. N. *Primenenie tekhnologii lazernogo skanirovaniya v razlichnykh otraslyakh i na razlichnykh etapakh zhiznennogo tsikla ob'ektov* [Application of laser scanning technology in various industries and at various stages of the life cycle of objects]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2016, no. 2, pp. 62–73.

2. Kovach N. S., Shurshin K. Yu. *Opyt ispol'zovaniya MLS dlya sozdaniya trekhmernoy modeli infrastruktury zheleznykh dorog* [Experience in using MLS to create a three-dimensional model of railway infrastructure]. *Geoprofi – Geophy*, 2012, no. 2, pp. 23–26.

3. Kuznetsov O. E., Mironov N. A., Kuznetsova A. O. *Otsenka kachestva stroitel'no-montazhnykh rabot s ispol'zovaniem sovremennykh tekhnologiy* [Quality assessment of construction and installation works using modern technologies]. *Privolzhskiy nauchnyy vestnik – Volga Region*

Scientific Bulletin, 2014, no. 5 (33), pp. 33–35. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-stroitelno-montazhnykh-rabot-s-ispolzovaniem-sovremennykh-tehnologiy> (accessed: 20.02.2025).

4. Rudenko A. A., Yurchenko A. N. *Otsenka faktorov i razrabotka metodiki opredeleniya prodolzhitel'nosti remonta i vosstanovleniya zdaniy* [Assessment of factors and development of methods for determining the duration of repair and restoration of buildings]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Don Engineering Bulletin*, 2025, no. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9742>

5. Rudenko A. A., Cherniy V. A. *Osobennosti i effektivnost' primeneniya sredstv nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri kontrole rabot v stroitel'stve* [Features and effectiveness of the use of ground-based laser scanning tools in the control of work in construction]. *Innovatsii i investitsii – Innovation and Investment*, 2025, no. 2, pp. 635–641. Available at: <https://innovazia.ru/upload/iblock/bb7/uttwrcvypoxd99wxpgg15uch2t3eytgp/%E2%84%961%202025%20%D0%98%D0%B8%D0%98.pdf>

6. Lysenko A. A. *Vvedenie v regressiionnyy analiz dannykh i regressiionnye modeli* [Introduction into data regression analysis and regression models]. *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gos. morskogo tekhn. un-ta – Science Week of the St. Petersburg State Marine Technology University*, 2020, vol. 1, no. 3–1, p. 93.

7. Rudenko A. A., Yurchenko A. N. *Regressiionnyy analiz faktorov kachestva remontno-vosstanovitel'nykh rabot s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy* [Regression analysis of quality factors of repair and restoration work, taking into account the technical condition of buildings]. *Innovatsii i investitsii – Innovation and Investment*, 2025, no. 1, pp. 585–590.

8. Shurshin K. Yu. *Provedenie inzhenerno-geodezicheskikh izyskaniy ob'ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa s ispol'zovaniem tekhnologiy mobil'nogo lazernogo skanirovaniya i teplovizionnoy s'emki* [Engineering and geodetic surveys of fuel and energy complex facilities using mobile laser scanning and thermal imaging technologies]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz – Exposure Oil Gas*, 2013, no. 3 (28), pp. 10–13.

9. Kovach N. S. *Mobil'nye lazernye sistemy v dorozhnoy otrasli* [Mobile laser systems in the road industry]. *Dorogi: Innovatsii v stroitel'stve – Roads: Innovation in Construction*, 2013, no. 26, pp. 34–36.

10. Oleynikova Ya. I., Gorbunova A. A., Esikov A. N. *Osobennosti izucheniya matematicheskoy statistiki* [Features of the study of mathematical statistics]. *StudNet*, 2022, vol. 5, no. 6, 221 p.

11. Bogdanov A. N., Listratov Ya. A. *Stroitel'niy kontrol' metodom nazemnogo lazernogo skanirovaniya* [Continuous control by ground laser scanning]. *Izvestiya Kazanskogo gos. arkhitekturno-stroitel'nogo un-ta –*

Bulletin of the Kazan State Architectural and Construction University, 2019, no. 4 (50), pp. 401–409.

12. Isupov N. S., Fomin N. I. *Tekhnologiya lazernogo skanirovaniya na etape stroitel'stva kak instrument upravleniya zhiznennym tsiklom zdaniya* [Laser scanning technology at the construction stage as a tool for building life cycle management]. *BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury. Trudy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Sankt-Peterburg, 19–21 aprelya 2023 goda* [BIM modeling in construction and architecture problems. Proceedings of the VI International scientific-practical conf., St. Petersburg, April 19–21, 2023]. Ed. by A. A. Semenov. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2023, pp. 47–52. DOI 10.23968/BIMAC.2023.007.

13. Malakhova O. S. *Korrelatsionno-regressionnoy analiz zavisimosti vyruchki ot faktorov vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti (na primere OOO «TsMT „Analitika“»)* [Correlation and regression analysis of the dependence of revenue on factors of foreign economic activity (on the example of WTC Analytica LLC)]. *Alleya nauki – Alley of Science*, 2019, vol. 2, no. 1 (28), pp. 592–597.

14. Barliani A. G., Chudova V. S. *Analiz vliyaniya faktorov na osadku inzhenernykh sooruzheniy metodom mnogofaktornogo regressionnogo analiza* [Analysis of the influence of factors on the settlement of engineering structures by multivariate regression analysis]. *Interksp Geo-Sibir – Interexpo Geo-Siberia*, 2016, no. 9, pp. 141–147.

15. Chibirova M. E. *Analiz dannykh i regressionnoe modelirovanie s primeneniem yazykov programirovaniya PythoniR* [Data analysis and regression modeling using PythoniR programming languages]. *Nauchnye zapiski molodykh issledovateley – Scientific Notes by Young Researchers*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 37–45. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-dannyh-i-regressionnoe-modelirovanie-s-primeneniem-yazykov-programirovaniya-python-i-r> (accessed: 18.02.2025).

16. Malebnova S. G., Tarasov R. V., Makarova L. V. *Primenenie regressionnogo analiza pri kontrole kachestva*

stroitel'noy produktsii [Application of regression analysis in quality control of construction products]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii – Modern scientific research and innovation*, 2016, no. 5 (61), pp. 25–27. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2016/05/67157> (accessed: 14.02.2025).

17. Melyokhin V. B., Magdiev A. Sh. *Metodologicheskie osnovy otsenki kachestva stroitel'noy produktsii* [Methodological foundations for assessing the quality of construction products]. *Naukovedenie – Science of Science*, 2014, no. 4 (23), p. 114. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-osnovy-otsenki-kachestva-stroitelnoy-produktsii> (accessed: 20.02.2025).

18. Maryashov A. D., Rudenko A. A. *Novye tekhnologicheskie resheniya pri vypolnenii inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve* [New technological solutions for engineering surveys in construction]. *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii (XXV nauchnye chteniya). Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt.konf. Belgorod, 23 noyabrya 2023 g.* [Knowledge-intensive technologies and innovations (XXV scientific readings). [Proceedings of the International scientific-practical conf., Belgorod, November 23, 2023]. Belgorod, BGTU im. V. G. Shukhova Publ., 2023, pp. 829–833. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59997735>

19. Sugarbaker L. J., Constance E. W., Heidemann H. K., Jason A. L., Lukas V., Saghy D. L., Stoker J. M. The 3D elevation program initiative. A call for action. *U.S. Geological Survey Circular*, 1399, 2014, 35 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/circ/1399/pdf/circ1399.pdf>

20. Snyder G. I., Sugarbaker L. J., Jason A. L., Maune D. F. National requirements for enhanced elevation data. *U.S. Geological survey open-file report 2013–1237*, 2012, 371 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1237>

21. Snyder G. I. The 3D elevation program — summary of program direction. *U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012–3089*, 2012, 2 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3089/>