

Практика использования фотограмметрических маяков для мониторинга ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях

Ю.С. Кунин, Г.А. Григорян

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; г. Москва, Россия

Аннотация: В статье представлен сравнительный анализ результатов автоматического определения ширины раскрытия трещин в железобетонной конструкции при помощи фотограмметрических 3D маяков и ручного метода при помощи микроскопа Бринелля, а также сформулированы общие условия необходимые для получения корректных результатов определения ширины раскрытия трещин при выполнении фотограмметрической съемки. Опыт применения фотограмметрических маяков, для определения ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях, в России не велик, ввиду новизны методики, большой стоимости специализированного оборудования и сложности в обработке результатов. Использование фотограмметрических маяков позволяет значительно ускорить процесс измерения ширины раскрытия трещин в монолитных железобетонных конструкциях и повысить точность выполняемых измерений. Данная технология особенно актуальна при выполнении работ по мониторингу и при натурных испытаниях конструкций, когда требуется регулярный контроль ширины раскрытия трещин.

Ключевые слова: фотограмметрические маяки, мониторинг, ширина раскрытия трещин, железобетон, программный комплекс, фотоаппарат, фокусное расстояние, освещение.

Введение

Образование трещин в железобетонных конструкциях на любом из этапов жизненного цикла здания требует повышенного внимания. В нормативной документации (СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» и ГОСТ 31384-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии») предъявляются требования по ограничению ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях исходя из определенных условий, например, обеспечение сохранности арматуры, ограничение проницаемости конструкции.

Мониторинг ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях в основном выполняют в случаях, когда образование трещин

вызвано дефицитом несущей способности по второй группе предельных состояний или же при проведении натурных испытаний конструкций.

Основной целью мониторинга ширины раскрытия трещин является предупреждение потенциально аварийных ситуаций с целью своевременного принятия определённых мер. В отличие от единичного измерения ширины раскрытия трещин, в рамках мониторинга измерения проводятся в течении длительного периода времени, для определения наличия динамики раскрытия трещин с высокой точностью.

Материалы и методы

Актуальность исследования обусловлена возрастающей необходимостью автоматизации и повышения точности работ по мониторингу ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях.

Механические щелемеры обеспечивают точность измерений от 0,1 до 0,5 мм и требуют присутствия оператора для снятия показаний. Также при использовании механических щелемеров обработка результатов измерений выполняется вручную. Наличие человеческого фактора на всем этапе мониторинга ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях при помощи механических щелемеров является одним из ключевых источников погрешностей. Разные операторы могут по-разному интерпретировать показания шкалы, особенно при трещинах шириной раскрытия менее 0,2 мм.

Использование фотограмметрических маяков (что из себя представляет маяк) позволяет значительно уменьшить влияние человеческого фактора на выполняемые измерения, ввиду автоматизации процесса съёмки показаний и их последующей обработки при помощи специализированного программного обеспечения.

В данной работе был выполнен мониторинг ширины раскрытия трещин в монолитной железобетонной трансферной плите перекрытия при помощи

фотограмметрических маяков. Результаты съемки маяков обрабатывались в программном комплексе Photomicrometr.

В процессе выполнения мониторинга для выполнения сравнительного анализа результатов выполнялся контроль результатов при помощи выполнения повторных измерений с помощью микроскопа с измерительной сеткой (микроскоп Бринелля).

Результаты исследования

Рассматриваемый объект – монолитная железобетонная трансферная плита перекрытия над минус первым этажом строящегося многоэтажного жилого дома.

Трансферная плита перекрытия имеет следующие размеры: толщина – 800 мм; ширина 29,945 м; длина 50,27 м. Основное верхнее и нижнее армирование плиты выполнено стержнями периодического профиля Ø25 мм класса А500С, расположенным с шагом 200 мм вдоль буквенных и цифровых осей.

В ходе строительства в конструкции трансферной плиты перекрытия началось образование трещин шириной раскрытия от 0,1 мм до 0,3 мм по нижней поверхности. Ввиду образования трещин до достижения полного значения проектных нагрузок на конструкцию плиты, был выполнен поверочный расчет по результатам которого установлен дефицит несущей способности по второй группе предельных состояний.

Для устранения дефицита по результатам расчетов был разработан проект усиления плиты перекрытия. Мониторинг за шириной раскрытия трещин выполнялся, начиная с этапа реализации проекта усиления и до завершения строительства.

Перед началом мониторинга были выполнены подготовительные работы, включающие в себя: формирование карты фактического

расположения трещин; измерение их ширины раскрытия на 0 цикле мониторинга; установка 17-ти фотограмметрических маяков.

Для мониторинга ширины раскрытия трещин был выбран программно-аппаратный комплекс «ФОТОМИКРОМЕТР 3D» в состав которого входят: фотограмметрические маяки (два маркера, на которые нанесены специальные метки) обеспечивающие точность измерений 0,005 мм; программный комплекс «Photomicrometer 3D»; цифровой фотоаппарат «Nikon Coolpix P950».

Принцип наблюдений основан на съемке маяка цифровым фотоаппаратом и дальнейшей обработке снимков в программном комплексе «Photomicrometer 3D», где определяется взаимное положение центров двух маркеров в трехмерной декартовой системе координат (положение точки R в системе $OXYZ$) (рис. 1). Начало системы координат маяка (точка O) всегда располагается на маркере с меньшим номером и ориентируется таким образом, чтобы ось Z была направлена кверху пластины, ось X – вправо, а ось Y – внутрь пластины.

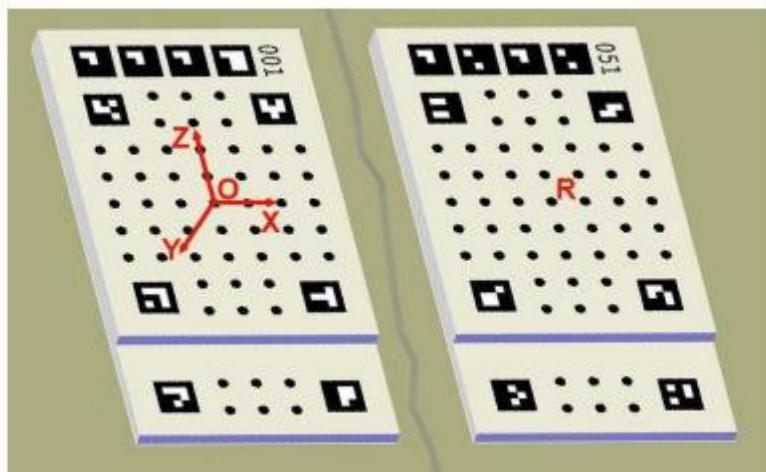


Рис. 1. Система координат фотограмметрического маяка

Взаимные перемещения частей маяка в пространстве определяют из сравнения результатов обработки снимков, выполненных в разное время (в разные циклы мониторинга). В научных статьях [1-3] более подробно

описаны физические принципы определения расстояния между двумя маркерами при помощи фотограмметрии.

По результатам мониторинга 17-ти трещин на протяжении 20-ти дней при помощи фотограмметрических маяков были получены графики изменения ширины раскрытия трещин. Также на каждом цикле мониторинга, в целях контроля измерений фотограмметрических маяков, выполнялось измерение ширины раскрытия трещины при помощи микроскопа Бринелля.

Для сравнительного анализа результатов измерений выполненных двумя разными методами, рассмотрим отчет об изменении ширины раскрытия трещины, расположенной между маркерами 1765-1766 (рис. 2).

Отчет Photomicrometer для маяка типа М-0.01 от 23-04-2025.

Таблица наблюдений.

№	Дата	Проект	ID левый	ID правый	ϕ°	ΔX	ΔY	ΔZ	m _x	m _y	m _z
1	26.03.2025 11:01:03	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 2)	1765	1766	5	0,000	0,000	0,000	0,160	1,469	0,202
2	27.03.2025 12:19:47	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 3)	1765	1766	5	0,051	1,808	-0,251	0,026	0,493	0,065
3	28.03.2025 10:50:48	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 4)	1765	1766	5	-0,009	0,055	-0,013	0,042	0,689	0,085
4	31.03.2025 10:44:03	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 5)	1765	1766	5	-0,024	-1,068	0,146	0,037	0,598	0,063
5	01.04.2025 12:47:07	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 6)	1765	1766	5	-0,025	-1,241	0,085	0,011	0,028	0,012
6	02.04.2025 11:24:23	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 7)	1765	1766	20	0,110	0,016	-0,190	0,036	0,754	0,233
7	03.04.2025 11:41:57	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 8)	1765	1766	20	0,103	0,137	0,174	0,020	0,643	0,019
8	04.04.2025 12:05:52	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 9)	1765	1766	20	0,034	-2,628	0,071	0,009	0,720	0,040
9	07.04.2025 12:46:19	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 10)	1765	1766	20	-0,018	-2,789	0,093	0,026	0,876	0,009
10	08.04.2025 12:11:26	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 11)	1765	1766	5	-0,039	-1,774	0,151	0,019	0,657	0,005
11	09.04.2025 12:02:21	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 12)	1765	1766	5	-0,001	-0,017	0,131	0,006	0,202	0,004
12	10.04.2025 13:33:49	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 13)	1765	1766	5	-0,041	-0,729	0,156	0,023	0,308	0,006
13	11.04.2025 13:01:27	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 14)	1765	1766	5	-0,083	-1,375	0,140	0,023	0,280	0,008
14	14.04.2025 12:49:21	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 15)	1765	1766	5	-0,148	0,085	0,103	0,003	0,325	0,011
15	15.04.2025 12:09:18	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 16)	1765	1766	10	-0,028	-0,318	0,112	0,013	0,245	0,010
16	16.04.2025 14:12:03	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 17)	1765	1766	20	0,035	-1,098	0,148	0,036	0,433	0,006
17	17.04.2025 12:49:56	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 18)	1765	1766	15	0,005	-0,322	0,113	0,015	0,722	0,019
18	18.04.2025 12:48:44	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 19)	1765	1766	20	0,038	-0,326	0,176	0,003	0,410	0,010
19	21.04.2025 15:23:24	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 20)	1765	1766	20	0,035	-0,369	0,188	0,004	0,333	0,016
20	22.04.2025 13:16:15	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 21)	1765	1766	19	0,036	-1,361	0,144	0,029	0,254	0,003
21	23.04.2025 11:45:29	Трещина №2 (1765-1766) (цикл 22)	1765	1766	20	0,086	-0,758	0,124	0,037	0,833	0,008

Смещения по X.

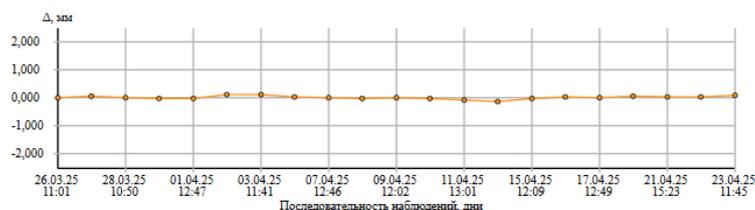


Рис. 2. Отчет из программного комплекса «Photomicrometer 3D» по результатам 20 циклов мониторинга

Динамика изменения ширины раскрытия трещины относительно первого измерения указана в столбце ΔX . Ширина раскрытия трещины между маркерами 1765-1766, измеренная на 0 цикле мониторинга составляла 0,2 мм.

Ввиду отсутствия возможности в программном комплексе учесть начальную ширину раскрытия трещины составим таблицу, в которой отобразим ширину раскрытия трещины на каждом цикле мониторинга, исходя из показаний ΔX указанным в отчете.

Таблица № 1

Ширина раскрытия трещины согласно отчету программного комплекса

№ цикла	ΔX	Ширина раскрытия, мм
2	-	0,2
3	0,051	0,251
4	-0,009	0,242
5	-0,024	0,218
6	-0,025	0,193
7	0,11	0,303
8	0,103	0,406
9	0,034	0,44
10	-0,018	0,422
11	-0,039	0,383
12	-0,001	0,382
13	-0,041	0,341
14	-0,083	0,258
15	-0,148	0,11
16	-0,028	0,082
17	0,035	0,117
18	0,005	0,122
19	0,038	0,16
20	0,035	0,195
21	0,036	0,231
22	0,086	0,317

Составим таблицу изменения ширины раскрытия трещин по результатам измерений выполненных при помощи микроскопа Бринелля с точностью 0,05 мм.

Таблица № 2

Ширина раскрытия трещины согласно измерениям, выполненным при помощи микроскопа Бринелля

№ цикла	ΔX	Ширина раскрытия, мм
2	-	0,2
3	0	0,2
4	0	0,2
5	0	0,2
6	0	0,2
7	0,05	0,25
8	0,1	0,35
9	0	0,35
10	0	0,35
11	0	0,35
12	0	0,35
13	0	0,35
14	0	0,35
15	-0,1	0,25
16	-0,05	0,2
17	0	0,2
18	0	0,2
19	0	0,2
20	0	0,2
21	0	0,2
22	0,05	0,25

Составим графики изменения ширины раскрытия трещин, по результатам измерений, выполненных двумя разными способами (рис. 3).

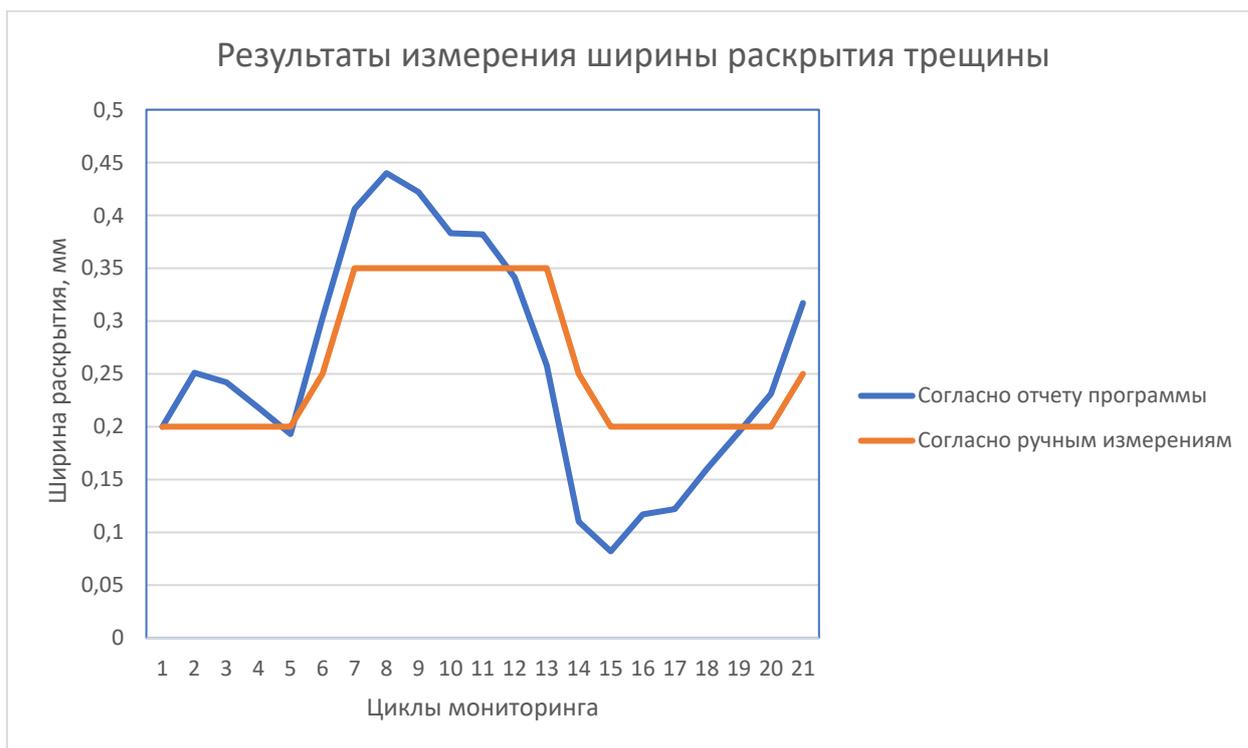


Рис. 3. Графики изменения ширины раскрытия трещины по результатам измерений при помощи микроскопа Бринелля и фотограмметрических маяков

Выполним анализ полученных результатов измерения ширины раскрытия трещины. Коэффициент вариации данных, полученных при измерении микроскопом, составляет 0,27 для измерений, полученных в отчете программного комплекса 0,43. Ввиду большей абсолютной точности, фотограмметрия показывает больший относительный разброс измерений. Примеры схожих результатов статистического анализа фотограмметрических измерений также представлены отечественных научных статьях [4-6].

Для получения точных данных при мониторинге ширины раскрытия трещин с помощью фотограмметрических маяков необходимо соблюдать следующие требования:

1. Маяки должны быть надежно закреплены на поверхности конструкции;

2. Необходимо обеспечить равномерное освещение маяков без бликов и теней.

3. Технические параметры фотоаппарата (разрешение, фокусное расстояние) должны соответствовать предъявляемым требованиям, указанным в техническом паспорте.

4. При обработке данных, в случае неполного автоматического распознавания маркеров необходимо вручную указывать геометрические центры меток (рис. 4). Более детально требования к условиям установки маяков и выполнению их фотофиксации описаны в научных статьях [7-9]

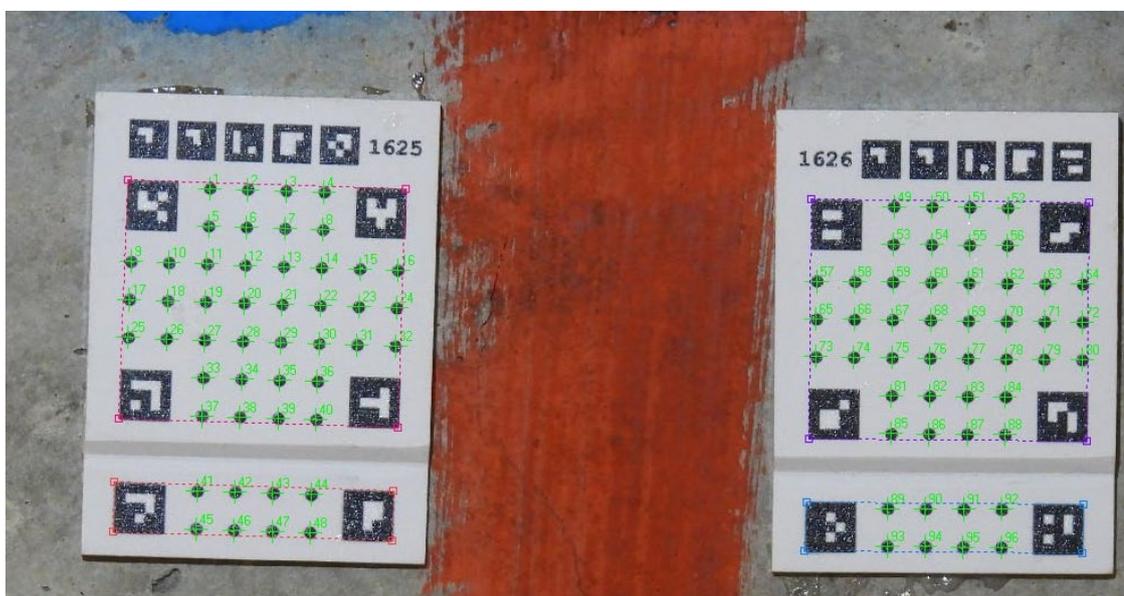


Рис. 4. Обработка маркера в программе «Photomicrometer 3D»

Корректная съемка фотограмметрических маяков позволит обеспечить высокую точность измерений. В соответствии с иностранными научными исследованиями [10-11] фотограмметрический методы измерений также позволяют значительно автоматизировать процесс мониторинга.

Выводы

1. Мониторинг ширины раскрытия трещин при помощи фотограмметрических маяков позволяет повысить скорость и точность измерений, в сравнении с механическими методами.



2. Из-за большей абсолютной точности измерений, фотограмметрия показывает больший относительный разброс в сравнении с измерениями, выполняемыми вручную.

3. Соблюдение всех требований по установке фотограмметрических маяков, выполнению их съемки и последующей обработке результатов, позволит обеспечить высокую точность измерений.

4. Фотограмметрия превосходит механические методы по точности измерений и скорости работ по их выполнению, но ввиду необходимости приобретения, специализированного ПО и оборудования, является более дорогостоящим.

Литература

1. Грязнов Н. А. Технология сверхвысокоскоростной фотограмметрии // Нанотехнологии. Экология. Производство. 2012. № 6(19). С. 30-31.
2. Назаров Р. А. Применение фильтра Габора и методов фотограмметрии для картографирования трещин // Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения: Материалы IV Международной научно-практической конференции. Астрахань. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный университет". 2022. С. 41-48.
3. Пириниязова Б.А., Эсенова А.И., Гараджаев Б.У., Оразова А.Н. Прикладная фотограмметрия // Символ науки. 2024. Т. 2. № 3-2. С. 53-54.
4. Леонова, А. Н., Федотова Е. А., Акопьян К. А. Проектирование и реконструкция с применением фотограмметрии // Наука. Техника. Технологии. 2020. № 1. С. 336-338.
5. Золотухин, Д. П. Создание 3-D моделей средствами цифровой фотограмметрии // Актуальные проблемы науки и техники. 2018: Материалы

национальной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону. Донской государственный технический университет. 2018. С. 328-329.

6. Казаков В. В., Ковалев В. С., Жумадилов К. Б., Шнайдер С. В. Трехмерная визуализация геометрических микролитов при помощи макрофотограмметрии // *Universum Humanitarium*. 2016. № 2. С. 65-72.

7. Гильмутдинов Т. З., Латыпов Р. Р., Латыпов В. М., Федоров П. А. Влияние ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях на сохранность арматуры // *Проблемы строительного комплекса России: Материалы 19 Международной научно-технической конференции*. Уфа. Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2015. С. 66-70.

8. Жадан М.П. Разработка методики автоматизированного дистанционного обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений // *Инженерный вестник Дона*. 2009. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/127.

9. Гермак О.В., Качалачева Н.А, Гугуева О.А. Возможности неметрических цифровых камер в наземной фотограмметрии // *Инженерный вестник Дона*. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2089.

10. Barazzetti L., Scaioni M. Crack measurement: development, testing and applications of an automatic image-based algorithm // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2009. № 64. P. 285–296.

11. Hampel, U.A., Maas, H.G. Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2009. Т. 64. №4.

P. 345-350.

References

1. Gryaznov N. A. *Nanotekhnologii. Ekologiya. Proizvodstvo*. 2012. № 6(19). pp. 30-31.



2. Nazarov R. A. Sovremennye issledovaniya v naukakh o Zemle: retrospektiva, aktual'nye trendy i perspektivy vnedreniya: Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2022. pp. 41-48.
3. Piriniyazova B.A., Esenova A.I., Garadzhaev B.U., Orazova A.N. Simvol nauki. 2024. T. 2. № 3-2. pp. 53-54.
4. Leonova A.N., Fedotova E.A., Akopyan K.A. Nauka. Tekhnika. Tekhnologii. 2020. № 1. pp. 336-338.
5. Zolotukhin D.P. Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. 2018: Materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2018. pp. 328-329.
6. Kazakov V.V., Kovalev V.S., Zhumadilov K.B., Shnayder S.V. Universum Humanitarium. 2016. № 2. pp. 65-72.
7. Gilmutdinov T.Z., Latypov R.R., Latypov V.M., Fedorov P.A. Problemy stroitel'nogo kompleksa Rossii: Materialy 19 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2015. P. 66-70.
8. Zhadan M.P. Inzhenernyi vestnik Dona. 2009. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/127.
9. Germak O.V., Kachalacheva N.A., Gugueva O.A. Inzhenernyi vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2089.
10. Barazzetti L., Scaioni M. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. № 64. pp. 285–296.
11. Hampel U.A., Maas H.G. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2009. T. 64. №4. pp. 345-350.

Дата поступления: 28.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025