

УДК 528.44
DOI 10.17513/use.38472

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ И ПАРАМЕТРАМ 3D-КАДАСТРОВОЙ СЪЕМКИ НА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Яковлева Н.Д.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: natashayakovleva24@gmail.com*

Актуальность исследования связана с развитием 3D-технологий в кадастровой деятельности. Цель работы – обоснование требований к точности и параметрам 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях с применением наземного лазерного сканирования. В статье были определены рекомендуемые параметры наземного лазерного сканирования для 3D-кадастровой съемки: дальность сканирования не более 30 м, угловое разрешение $\leq 0,02^\circ$, плотность облака точек ≥ 1500 точек/м² и средняя квадратическая ошибка регистрации координат точек между стойниками не более 0,006 м. Экспериментальные исследования показали, что при указанных параметрах достигается точность пространственного положения характерных точек на уровне 0,002 м. Была выявлена зависимость между параметрами съемки и точностью построения 3D-модели объекта недвижимости. Были предложены показатели качества: A – метрологические характеристики облака/регистрации, B – качество геометрических примитивов (плоскости, ребра, оси), C – качество пространственных данных объекта (контуры, модели помещений/этажей, объемы). А также был произведен предрасчет точности для показателей качества. По результатам исследования были сформулированы научно обоснованные требования к точности и параметрам выполнения 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях. Были обоснованы требования применения наземного лазерного сканирования с оптимизированными параметрами измерений и строгими критериями оценки достоверности пространственных данных.

Ключевые слова: 3D-кадастр, наземное лазерное сканирование, 3D-модель, параметры съемки, средняя квадратическая ошибка

SUBSTANTIATION OF ACCURACY REQUIREMENTS AND PARAMETERS FOR 3D-CADASTRAL SURVEYING IN URBAN AREAS USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Yakovleva N.D.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Saint Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I”,
Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: natashayakovleva24@gmail.com*

The relevance of the study is associated with the development of 3D technologies in cadastral activities. The aim of the work is to substantiate accuracy requirements and parameters for 3D cadastral surveying in urbanized areas using terrestrial laser scanning. The article defines recommended parameters for terrestrial laser scanning in 3D cadastral surveying: scanning range not exceeding 30 m, angular resolution $\leq 0,02^\circ$, point cloud density ≥ 1500 points/m², and a root mean square error of point coordinate registration between scan stations not exceeding 0.006 m. Experimental studies have shown that, with the specified parameters, the accuracy of the spatial position of characteristic points reaches 0.002 m. A relationship between survey parameters and the accuracy of constructing a 3D model of a real estate object was identified. Quality indicators were proposed: A – metrological characteristics of the point cloud/registration, B – quality of geometric primitives (planes, edges, axes), and C – quality of the object's spatial data (contours, room/floor models, volumes). A preliminary accuracy estimation for these quality indicators was also performed. Based on the results of the study, scientifically substantiated requirements for accuracy and parameters of 3D cadastral surveying in urbanized areas were formulated. The requirements for using terrestrial laser scanning with optimized measurement parameters and strict criteria for assessing the reliability of spatial data were justified.

Keywords: 3D-cadastre, terrestrial laser scanning, 3D-model, survey parameters, root mean square error

Введение

На сегодняшний день урбанизированные территории характеризуются высокой плотностью застройки, многоуровневой организацией пространства, активным использованием подземных и надземных сооружений. В таких условиях традиционный двумерный кадастр не обеспечивает полного и достоверного учета объектов,

что приводит к ошибкам при регистрации прав, налогообложении и управлении имущественным комплексом. Решением данной проблемы является переход к трехмерному (3D) кадастру, где объекты недвижимости будут представлены в виде трехмерных моделей. Пространственные данные для создания трехмерных моделей будут получены на основе применения современных геоде-

зических методов, включая спутниковые технологии, наземное и воздушное лазерное сканирование, фотограмметрические методы и геоинформационные системы.

При этом одной из главных задач становится разработка методик геодезического обеспечения 3D-кадастра, обеспечивающих требуемую точность съемки и определение объемно-площадных характеристик объектов недвижимости. Проблема особенно актуальна для городов, где высока стоимость земель и объектов капитального строительства и ошибки пространственных данных приводят к негативным экономическим и социальным последствиям.

Вопросы применения наземного лазерного сканирования (далее – НЛС) для кадастровых и геодезических задач активно рассматриваются в научных исследованиях последних десятилетий. Анализ российской и зарубежной литературы последних лет показал, что НЛС обеспечивает сплошной сбор геометрических характеристик зданий и сооружений с точностью до 0,1 м и с высокой производительностью, что делает актуальной технологию для получения 3D-моделей объектов недвижимости и внедрения 3D-кадастра [1–3].

В работах М.Я. Брыня [4; 5] была рассмотрена необходимость повышения точности исходной геодезической основы и рационального проектирования геодезических ходов и сетей. Вопросы содержания геодезического обеспечения также были рассмотрены в работах В.В. Озnamца [6; 7]. Полученные авторами выводы, хотя и не ориентированы исключительно на применение НЛС, являются актуальными для регистрации облаков точек НЛС и трансформации 3D-моделей в кадастровые системы координат.

В работах Е.И. Аврунева [8; 9] и в монографии [10, с. 45–52] были рассмотрены вопросы геоинформационного сопровождения кадастровых работ. Автором было показано, что применение наземного лазерного сканирования позволяет формировать высокоточные трехмерные модели зданий, необходимые для постановки на кадастровый учет в условиях плотной городской застройки.

В исследованиях А.В. Чернова [11–13] было акцентировано внимание на алгоритмах регистрации и объединения облаков точек. Показано, что качествостыковки сканов является определяющим фактором при получении реалистичной 3D-модели объекта недвижимости.

В международной практике применение лазерного сканирования для геодезического обеспечения кадастра регламентируется стандартами ISO 19152 (Land Administration Domain Model – LADM) и инициативой INSPIRE Европейского Союза [14; 15]. Эти документы закладывают концептуальные основы для перехода от 2D-кадастра к полному 3Dпредставлению объектов недвижимости.

В России нормативная база пока не полностью учитывает возможности НЛС для создания 3D-моделей для целей кадастра. Федеральный закон № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости» [16] закрепляет необходимость точного определения границ объектов для двумерного кадастра, однако методики 3D-учета находятся на стадии апробации. ГОСТ Р 70689-2023 [17] регламентирует применение лазерного сканирования в инженерных изысканиях, что может служить основой для формирования нормативно-правовых актов в сфере 3D-кадастрового учета. Однако требуется углубление и детализация технического регулирования в области лазерного сканирования, поскольку существующие документы долгое время не охватывали все аспекты применения наземных и воздушных систем [18].

Цель исследования – обоснование требований к точности и параметрам 3D-кадастровой съемки на городских территориях с использованием наземного лазерного сканирования.

Материалы и методы исследования

Точность НЛС определяется несколькими составляющими: точностью измерения дальности σ_R и угловой точностью сканера $\sigma_\theta, \sigma_\phi$.

Была рассмотрена теоретическая модель погрешностей НЛС для 3D-кадастра.

В сферической системе координат сканера измеряются дальность R , горизонтальный угол θ и угол наклона ϕ . Пусть их средние квадратические ошибки (далее – СКО): $\sigma_R, \sigma_\theta, \sigma_\phi$. Декартовы координаты точки в системе координат сканера [19]:

$$x = R \cos \phi \cos \theta,$$

$$y = R \cos \phi \sin \theta,$$

$$z = R \sin \phi.$$

Было принято, что результаты измерений независимы, в связи с чем ковариационная матрица $K_{x,y,z}$ координат была определена следующим образом:

$$K_{x,y,z} = JK_{R,\theta,\varphi} J^T,$$

где $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial R} & \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial y}{\partial R} & \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial z}{\partial R} & \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} \end{bmatrix}$,

$$K_{R,\theta,\varphi} = \begin{bmatrix} \sigma_R^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varphi^2 \end{bmatrix}.$$

В развернутом виде (для малых σ_θ , σ_φ в радианах) были получены

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \sigma_R^2 + (R \cos \varphi)^2 \sigma_\theta^2 + (R \sin \varphi)^2 \sigma_\varphi^2, \\ \sigma_y^2 &= \sigma_R^2 + (R \cos \varphi)^2 \sigma_\theta^2 + (R \sin \varphi)^2 \sigma_\varphi^2, \\ \sigma_z^2 &= \sigma_R^2 (R \sigma_\varphi)^2. \end{aligned}$$

Тем самым ошибки измерения горизонтальных углов возрастают пропорционально $R\sigma_\theta$, радиальная – σ_R , вертикальная – $R\sigma_\varphi$. Типичные величины составляют $\sigma_R \sim 1-3$ мм, $\sigma_\theta, \sigma_\varphi \sim 10-60''$. При $R = 30$ м вклад угловых ошибок дает $\approx 1,5-9$ мм в плане/по высоте, что сопоставимо с σ_R [15].

Для углового шага сканирования $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ шаг между соседними лучами на расстоянии R :

$$s_\theta = R\Delta\theta, \quad s_\varphi = R\Delta\varphi$$

а средняя точечная плотность p на фронтальной поверхности составит

$$p \approx \frac{1}{s_\theta s_\varphi} \approx \frac{1}{R^2 \Delta\theta \Delta\varphi}.$$

Эта зависимость определяет минимально допустимые $\Delta\theta$, $\Delta\varphi$ для обеспечения, например, двукратной избыточности точек на характерных линиях/кромках фасада заданной толщины [20].

Пусть требуется минимальная дискретизация деталей δ (например, кромка наличника шириной 0,02 м) с двукратной избыточностью точек (по критерию Найквиста для детектирования/обобщения). Тогда

$$s_\theta \leq \frac{\delta}{2}, \quad s_\varphi \leq \frac{\delta}{2} \Rightarrow \Delta\theta \leq \frac{\delta}{2R}, \quad \Delta\varphi \leq \frac{\delta}{2R}.$$

Например, при $R = 25$ м и $\delta = 0,002$ м, и получаем $\Delta\theta, \Delta\varphi \leq 0,0004$ рад $\approx 0,023''$. Это соответствует «средне-плотным» нормативным значениям многих НЛС [21, с. 120–135].

Величина σ_{plane} – это среднеквадратическая ошибка ортогональных отклонений точек от аппроксимирующей плоскости, то есть она показывает, насколько «ровно» облако точек ложится на плоскость. На практике σ_{plane} служит операционным показателем для нормирования результатов НЛС на фасадах и внутренних стенах [22].

Для плоскости, аппроксимируемой методом наименьших квадратов по n точкам, СКО:

$$\sigma_{plane} = \sqrt{\frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n d_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь d_i – ортогональное расстояние от i -й точки до плоскости, n – количество точек в облаке, 3 – число оцениваемых параметров плоскости, по методу наименьших квадратов.

Регистрация (сшивка) двух или более облаков точек приводит к дополнительным ошибкам трансформации (поворот r и сдвиг t). Любые ошибки в оценке параметров трансформации дает систематическое смещение всех точек локального облака.

Модель жесткого преобразования точки $p(x,y,z)$:

$$p' = t + rp,$$

где t – вектор сдвига, r – ортогональная матрица поворота.

Для анализа ошибок удобно перейти к малым приращениям параметров трансформации (малые углы поворота). Пусть параметры трансформирования представлены вектором:

$$q = [t_x \quad t_y \quad t_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T,$$

где $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – малые углы поворота.

При малых углах:

$$p' = p + t + \omega p.$$

Малое приращение параметров δq дает малое приращение координат точки $\delta p'$:

$$\delta p' = J_p \delta q,$$

где J_p – якобиан для точки $p(x,y,z)^T$:

$$J_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z & -y \\ 0 & 1 & 0 & -z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & y & -x & 0 \end{bmatrix}.$$

Пусть ковариационная матрица параметров трансформации равна K_q , тогда вклад погрешности трансформации в ковариацию координат отдельно взятой точки равен

$$K_{p,trans} = J_p K_q J_p^T.$$

Если исходная ковариация координат точки в локальной системе равна K_p , то итоговая ковариационная матрица преобразованной точки:

$$K_{p'} = r K_p r^T + J_p K_q J_p^T.$$

Первое слагаемое, перенос шумов изменения самой точки, описывает перенос собственных погрешностей измерения точки (шум дальности и углов); второе, «глобальная» ошибка регистрации, отражает влияние неточности параметров трансформации (смещений и углов поворота), возникающих при регистрации облаков точек. Данная формула описывает, как меняется неопределенность координат точки при переходе из локальной системы сканера в общую систему координат после регистрации (сшивки) облака.

Опираясь на исследования в области трехмерного моделирования [23] и анализ точности НЛС, было предложено разделить показатели качества на три уровня: *A* – метрологические характеристики облака/регистрации, *B* – качество геометрических примитивов (плоскости, ребра, оси), *C* – качество пространственных данных объекта (контуры, модели помещений/этажей, объемы). Был выполнен предрасчет точности для показателей качества.

Показатель качества *A* (метрология облака/регистрации):

1. σ_{plane} для фасадов/помещений $\leq 0,003 - 0,005$ м при $R \leq 30$ м.

2. СКО регистрации координат точек между стоянками: $\leq 0,006$ м.

3. Максимальный локальный перекос на длинных коридорах/фасадах: $\leq 0,01$ м на 30 м (контролируется привязкой к опорной сети).

Показатель качества *B* (качество геометрических примитивов):

1. СКО положения плоскости стен/межквартирных перегородок: $\leq 0,005$ м.

2. СКО положения кромок фасада после детектирования и обобщения: $\leq 0,01$ м.

3. СКО положения характерных точек (углы, откосы, простенки): $\leq 0,01$ м.

Показатель качества *C* (качество пространственных данных объекта):

1. Погрешность контура помещения $\leq 0,01$ м.

2. Погрешность высотных отметок (например, уровни перекрытий, подоконники, парапеты) $\leq 0,002$ м.

3. СКО объема 3D-модели, $\leq 2-3\%$.

Такие нормы обеспечивают требуемую точность для последующей регистрации прав и ограничений в 3D-кадастре [10–12]. Аналогичные выводы приведены в работе [13].

Интеграция НЛС в трехмерный кадастр была представлена в виде следующих процессов:

1. Получение пространственных данных для построения 3D-моделей с применением НЛС.

2. Формализация «пространственных характеристик» 3D-объектов (иерархия «здание – часть здания – помещение – технический объем»).

3. Хранение/отображение 3D-моделей в системе кадастра (НСПД) и их правовых характеристик.

Был рассмотрен пример расчета параметров НЛС для 3D-кадастровой съемки на урбанизированной территории. Объект – жилой дом, 9 этажей, длина фасада – 42 м, высота – 27 м, глубина двора – 18 м. Требуется создать 3D-модель фасадов и внутренних помещений первого этажа для целей трехмерного кадастрового учета. В рамках исследования было предложено использовать лазерный сканер средней точности (погрешность дальности $\sigma_r = 0,002$ м, угловая точность $\sigma_\theta = 60''$).

Фасад длиной 42 м и высотой 27 м покрывается при расстоянии сканирования $R = 25$ м. Чтобы обеспечить перекрытие не менее 40%, требуется не менее четырех стоянок на фасад (с базисом 12 м). Внутри двора достаточно трех стоянок на продольный ряд с перекрытием 30%. Итого 7 стоянок для фасада и 4 для помещений, 11 стоянок. Схема размещения (рисунок) стоянок S1–S4 вдоль главного фасада через 12 м, S5–S7 во дворе, S8–S11 внутри помещений.

Минимальная деталь – толщина пропенка/наличника $\delta = 0,0015$ м. На расстоянии $R = 25$ м шаг между соседними лучами:

$$s = R \cdot \Delta\theta.$$

Критерий Найквиста:

$$\Delta\theta \leq \frac{0,0015}{2 \cdot 25} = 0,0003 \text{ рад} = 0,017^\circ$$

Был принят режим сканирования с угловым шагом $0,02^\circ$, что соответствует «средненеплотной» съемке.

Был рассмотрен случай, когда угол наклона $\varphi = 0$.

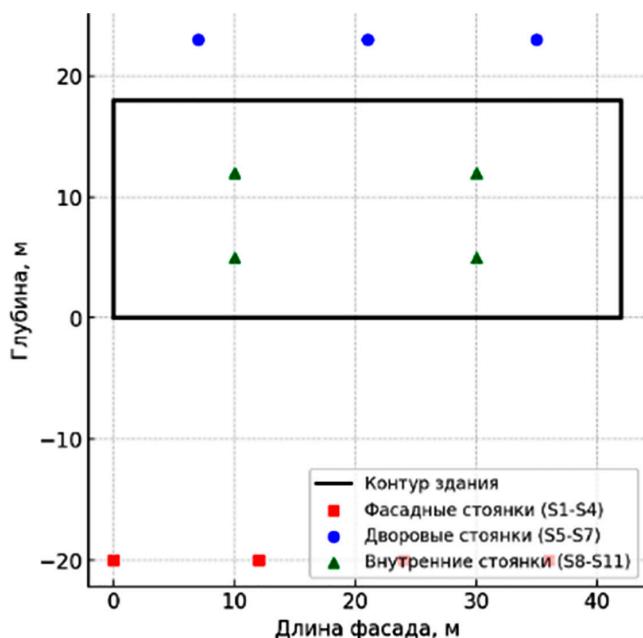


Схема размещения стоянок сканера для фасада, двора и помещений здания
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Оценка точности пространственных координат:

$$\sigma_x^2 = 0,002^2 + 25^2 (3 \cdot 10^{-5})^2, \\ \sigma_x = 0,0021 \text{ м.}$$

$$\sigma_y^2 = 0,002^2 + 25^2 (3 \cdot 10^{-5})^2, \\ \sigma_y = 0,0021 \text{ м.}$$

$$\sigma_z^2 = 0,002^2 + 25^2 (3 \cdot 10^{-5})^2, \\ \sigma_z = 0,0021 \text{ м.}$$

Таким образом, ожидаемая точность положения единичной точки $\leq 0,003$ м.

Для проверки качества после обработки выполнено следующее:

– Рассчитана $\sigma_{plane} = 0,004$ мм на шести участках фасада.

– Рассчитана СКО трансформации по пяти целям: 0,006 м.

– Выполнено сравнение результатов тахеометрической съемки на 12 контрольных точках по фасаду, среднее расхождение составило 0,007 м, максимальное – 0,009 м.

Таким образом, исходя из проведенного анализа и ранних выводов о необходимости повышения точности исходной геодезической основы урбанизированных территорий был предложен следующий регламент (для городских объектов при расстояниях до 30 м и приборах средней точности/высокоточных):

При планировании съемки НЛС для целей трехмерного кадастра было рекомендовано устанавливать следующие нормативные значения:

– Дальность $R \leq 0,03$ м на фасадах; $R \leq 20$ м в помещениях.

– Угловой шаг $\Delta\theta = 0,02^\circ$, при наименьшей детали съемки 0,0015 м.

– Перекрытия между стоянками: $\geq 30\%$ (в помещении) и $\geq 40\%$ (фасады со сложной архитектурой).

Для контроля качества съемки, следующие нормативные значения:

– $\sigma_{plane} \leq 0,005$ м на контрольных плоскостях.

– СКО регистрации трансформации между станциями $\leq 0,006$ м.

– СКО положения точек $\leq 0,01$ м.

При обработке полученных данных и подготовке модели объекта было рекомендовано выполнять топологическую проверку 3D-объектов (замкнутость, отсутствие самопересечений).

Результаты исследования и их обсуждение

Для обеспечения достоверности трехмерных кадастровых данных было предложено установить следующие предельные нормативные значения точности в зависимости от пространственного положения и функционального типа объекта недвижимости.

Таблица 1

Рекомендуемые значения средних квадратических ошибок координат конструктивных элементов объектов недвижимости

Категория объекта	Средняя квадратическая ошибка планового положения, м	Средняя квадратическая ошибка высотного положения, м
Здания и сооружения (надземная часть)	$\leq 0,03$	$\leq 0,02$
Подземные сооружения, тоннели, подвалы	$\leq 0,05$	$\leq 0,03$
Помещения и этажные контуры	$\leq 0,02$	$\leq 0,01$
Архитектурные элементы (балконы, козырьки и др.)	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Рекомендуемые параметры выполнения НЛС

Параметры	Рекомендуемое значение
Максимальная рабочая дальность сканирования	≤ 30 м
Угловое разрешение сканирования	$\leq 0,02^\circ$
Точность измерения дальности (σ)	$\leq 0,003$ м
Средняя плотность облака точек на объекте	≥ 1500 точек/м ²
Средняя погрешность регистрации (стыковки) облаков	$\leq 0,006$ м
Количество станций сканирования для одного здания	не менее 6

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Данное разделение обусловлено особенностями геометрии объектов и их функциональной ролью в кадастре. Для объектов, характеризующихся сложной пространственной структурой, приоритетное значение приобретает точность высотного положения, поскольку даже незначительные ошибки по высоте (более 0,2–0,3 м) приводят к наложению трехмерных границ помещений и инженерных коммуникаций при формировании единого кадастрового слоя (табл. 1).

Для реализации вышеуказанных требований к точности было предложено устанавливать следующие параметры НЛС при проведении 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях (табл. 2).

Заключение

Проведенные исследования позволили сформировать научно обоснованные требования к точности и параметрам выполнения 3D-кадастровой съемки на урбанизированных территориях. Обоснованы требования применения наземного лазерного сканирования с оптимизированными параметрами измерений и строгими критериями оценки достоверности пространственных данных.

По результатам эксперимента были сделаны выводы, что при дальности сканирования не более 30 м, угловом разрешении $\leq 0,02^\circ$, плотности облака точек ≥ 1500 точек/м² и средней квадратической ошибки регистрации не более 0,006 м достигается пространственная точность положения точек $\sigma_{x,y,z} \leq 0,021$ м.

Были обоснованы количественные зависимости между параметрами съемки (дальностью, угловым шагом, плотностью точек) и точностью 3D-моделей.

Список литературы

1. Алтынов А.Е., Снежко И.И. Экономическое обоснование необходимой точности моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // Геодезия и картография. 2014. № 1. С. 38–41. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2014_1_38-41 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2014-883-1-38-41.
2. Пархоменко Д.В., Пархоменко И.В. Лазерное сканирование в государственном кадастре недвижимости: технологические и правовые аспекты // Вестник СГУГиТ. 2016. Вып. 1 (33). С. 114–124. URL: https://vestnik.sgugit.ru/upload/vestnik/sborniki/2016/331_2016_rus.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
3. Горобцов С.Р. Применение 3D-технологий для корректного учета объектов недвижимости // Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»,

- «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015». Новосибирск: СГУГиТ, Т. 3. С. 127–133. URL: <https://geosib.sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2015/Недропользование.-Горное-дело.-Направлени-я-и-технологии-поиска-Т.3.pdf> (дата обращения: 18.12.2025).
4. Шарафутдинова А.А., Брынь М.Я. Требования к точности наземного лазерного сканирования для решения инженерно-геодезических задач с помощью цифрового информационного моделирования // Геодезия и картография. 2021. № 8. С. 2–12. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2021_8_2-12 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2021-974-8-2-12.
5. Афонин Д.А., Брынь М.Я., Толстов Е.Г. Проектирование геометрических параметров наземного лазерного сканирования при контроле деформаций зданий и сооружений в условиях плотной застройки // Геодезия и картография. 2013. № 2. С. 2–7. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2013_2_2-7 (дата обращения: 18.12.2025).
6. Ознамец В.В. Ситуационное решение задачи пространственного размещения // Геодезия и картография. 2018. № 9. С. 45–51. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2018_9_45-51 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2018-939-9-45-51.
7. Ознамец В.В. Содержание геодезического обеспечения // Геодезия и картография. 2020. № 1. С. 2–6. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2020_1_2-6 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2020-955-1-2-6.
8. Аврунин Е.И., Гиннитов А.И. Концептуальный подход к геодезическому обеспечению 3D-кадастра // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25. № 34. С. 152–158. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-152-158. EDN: OJLOXM.
9. Аврунин Е.И., Гиннитов А.И. Технологическая схема создания геодезического обеспечения для целей трехмерного кадастра недвижимости // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. URL: <https://sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2022/tom-3/049-055.pdf> (дата обращения: 18.12.2025).
10. Аврунин Е.И. Разработка системы нормативных допусков при создании геодезического обоснования для выполнения кадастровых работ в формате 3D // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2023. Т. 67. № 3. С. 16–26. URL: https://www.miigaik.ru/journal/archive/2023/2023_67_3_RU/GiA-2023-020.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
11. Алтынцев М.А., Чернов А.В. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // Геодезия и картография. 2018. № 9. С. 52–63. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2018_9_52-63?ysclid=mjhe2mrzt6490669849 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2018-939-9-52-63.
12. Чернов А.В., Горобцов С.Р., Алтынцев М.А., Харазян А.А., Гоголев Д.В. Анализ методов получения и обработки данных для формирования 3D-модели генерального плана объекта недвижимости // Геодезия и картография. 2024. № 4. С. 30–40. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2024_4_30-40 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1006-4-30-40.
13. Харазян А.А., Чернов А.В. Место BIM-модели генерального плана объекта недвижимости в информационной структуре Единого государственного реестра недвижимости // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28. № 6. URL: <https://vestnik.sgugit.ru/arkhiv/mesto-bim-modeli-generalnogo-plana-objekta-nedvizhimiosti-v-informatsionnoy-strukture-edinogo-gosudars/> (дата обращения: 18.12.2025).
14. ISO 19152:2024 Land Administration Domain Model (LADM). Geneva, 2024. 56 p. URL: <https://www.iso.org/standard/81263.html> (дата обращения: 18.12.2025).
15. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council (14 March 2007) establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union, 2007. L108: 1–14. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/2/oj/eng> (дата обращения: 18.12.2025).
16. Федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182661/ (дата обращения: 18.12.2025).
17. ГОСТ Р 70689-2023. Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Общие требования к проведению работ. М.: ФАУ «РОСДОРНИЙ», 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302590894> (дата обращения: 18.12.2025).
18. Нехин С.С., Рубенок А.Н., Бабашкин Н.М., Ковров А.А. Техническое регулирование процессов лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2025. № 10. С. 45–54. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2025_10_45-54?ysclid=mjhe5qg7am600420819 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1024-10-45-54.
19. Шокер Х.М., Мустафин М.Г. Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия // Геодезия и картография. 2021. № 2. С. 2–10. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2021_2_2-10?ysclid=mjhe6z0eu4287769882 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10.
20. Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Самарин С.В., Беспятчук Д.А. Методика использования воздушного лазерного сканирования и нейросетевых технологий для обеспечения достоверными пространственными данными кадастра недвижимости // Геодезия и картография. 2025. № 6. С. 54–63. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2025_6_54-63?ysclid=mjhe7y0f7k792932874 (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1020-6-54-63.
21. Luhmann T., Robson S. Laser Scanning for 3D Surveying. Berlin: Wichmann, 2011. 421 p. URL: https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/oldenburg_2004_2.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
22. Гура Д.А., Ващенко Д.А., Беспятчук Д.А., Самарин С.В., Пшидаток С.К. Перспективы применения воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки для обеспечения пространственными данными 3D-кадастра // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2023. № 3. С. 179–183. URL: <https://panor.ru/articles/perspektivu-primeneniya-vozdushnogo-lazernogo-skanirovaniya-i-aerofotosemki-dlya-obespecheniya-prostranstvennymi-dannymi-3d-kadstra/91400.html#> (дата обращения: 18.12.2025).
23. Медведев В.И., Райкова Л.С. Программы для обработки данных лазерного сканирования местности // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2017. № 2 (9). С. 10–31. URL: [https://cadgis.ru/2017/9/CADGIS-2017-2\(9\)-02.Medvedev-Raijkova\(LIDAR-processing-apps\).pdf](https://cadgis.ru/2017/9/CADGIS-2017-2(9)-02.Medvedev-Raijkova(LIDAR-processing-apps).pdf) (дата обращения: 18.12.2025).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.