

УДК [528.721.221.6:528.8.042]+62  
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-2-26-39

## Расчет параметров наземного лазерного сканирования промышленных объектов

А. А. Шарафутдинова<sup>1,2\*</sup>, М. Я. Брынь<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Триметари Консалтинг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* e-mail: anzhelikaalexeevna@gmail.com

**Аннотация.** Наземное лазерное сканирование промышленных объектов имеет ряд особенностей, среди которых можно выделить: большое количество установок лазерного сканера, короткие расстояния между станциями, сложная геометрия и различия в отражательной способности материалов объектов измерений, а также большой массив данных, получаемых в результате работ. Для достижения требуемой точности в решении различных задач перечисленные особенности необходимо учитывать при выполнении измерений и обработке результатов измерений. Для этого на основании проведенного анализа предложена обобщенная технологическая схема наземного лазерного сканирования промышленных объектов. Выполнен расчет параметров лазерного сканирования, включающих выбор разрешения сканирования, выбор расстояния до объекта и допустимого угла падения лазерного луча на поверхность измеряемого объекта. Также даны предложения по выполнению взаимного и внешнего ориентирования дискретных точечных моделей с применением итерационного алгоритма ближайших точек. Выполненные исследования могут быть полезны для предрасчета точности результатов наземного лазерного сканирования промышленных объектов.

**Ключевые слова:** взаимное ориентирование, внешнее ориентирование, наземное лазерное сканирование, ошибки измерений, параметры сканирования

### *Введение*

Технологическая схема наземного лазерного сканирования (НЛС), как правило, зависит от требований к составу и точности результатов измерений, которые должны быть определены в техническом задании или проекте производства геодезических работ. На основе анализа исследований [1–10] предложена обобщенная технологическая схема НЛС промышленных объектов, которая представляет собой комплекс работ, состоящий из последовательных этапов: рекогносцировка, проектирование и построение геодезической сети, лазерное сканирование объекта, обработка результатов измерений (рис. 1).

Отметим, что НЛС промышленных объектов имеет ряд особенностей, которые в свою очередь влияют на точность конечного результата, среди них можно выделить: большое количество установок лазерного сканера, короткие расстояния между станциями, сложная геометрия и различия в отражательной способности материалов объектов измерений, а также большой массив данных, получаемых в результате работ. В связи с этим проанализируем отдельные этапы технологической схемы, которые, по мнению авторов, имеют важное значение при лазерном сканировании промышленных объектов.

### *Анализ этапов технологической схемы НЛС промышленных объектов*

*Определение мест установки станций лазерного сканирования* зависит от требуемого состава и детализации объектов измерений, угла падения лазерного луча на поверхность объекта и типа поверхности объекта [5, 11–14].

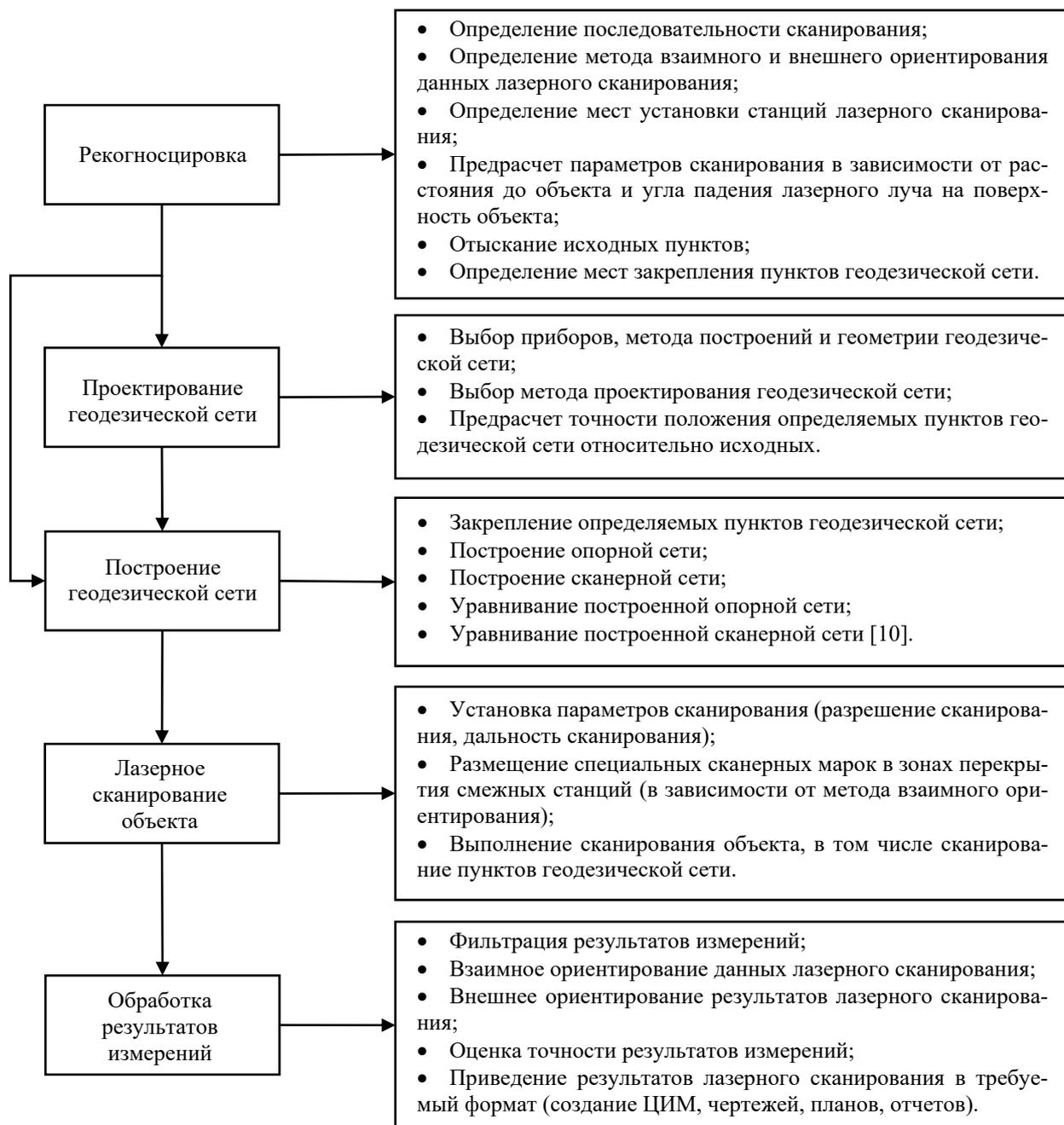


Рис. 1. Обобщенная технологическая схема наземного лазерного сканирования промышленных объектов

Угол падения лазерного луча на поверхность объекта – это угол между перпендикуляром к поверхности (нормалью) и исходным лазерным лучом (рис. 2). Ошибка измерения  $\Delta D$  расстояния, зависящая от угла падения лазерного луча, расстояния до объекта и угла расхождения лазерного луча, имеет систематический характер и, согласно [15, 16], может быть вычислена по формуле:

$$\Delta D = \frac{D\psi}{2} \operatorname{tg} \gamma, \quad (1)$$

где  $D$  – расстояние до объекта;  
 $\psi$  – угол расхождения лазерного луча;  
 $\gamma$  – угол падения лазерного луча.

Угол падения лазерного луча на поверхность колеблется от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Соответственно ошибка измерений возрастает в зависимости от увеличения угла падения лазерного луча.

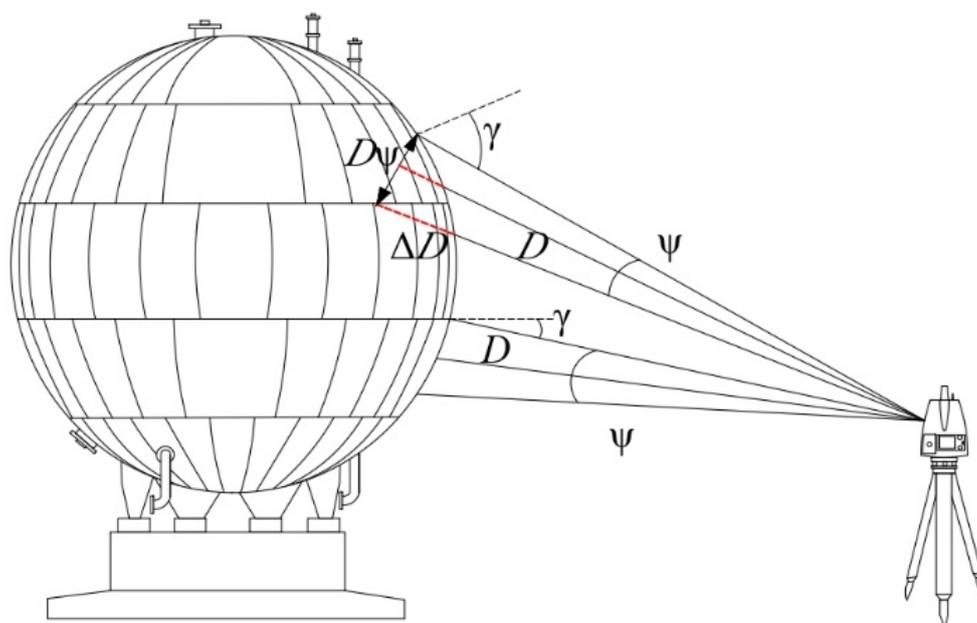


Рис. 2. Графическое представление ошибки измерения расстояния

Материал поверхности объекта влияет на интенсивность отраженного сигнала, что, в свою очередь, влияет на качество результатов лазерного сканирования [13]. Взаимосвязь между интенсивностью  $I$  отраженного сигнала и коэффициентом  $r$  отражающей поверхности в геометрической оптике определяется выражением Ламберта [17]:

$$I \approx \frac{r \cos \gamma}{D^2}.$$

Известно, что измерения объектов из материалов с высоким коэффициентом отражения в результате дают более надежные и точные результаты [17]. При этом объекты измерений промышленных объектов имеют, как правило, различную интенсивность отраженного сигнала. На таких объектах преобладают такие материалы, как сталь, оцинкованное железо, чугун, бетон и кирпич. При этом различия в отражательной способности этих материалов имеют большой диапазон. Следовательно, для вычисления возможной ошибки, связанной с интенсивностью отраженного сигнала, необходимы предварительные вычисления.

*Анализ методов взаимного и внешнего ориентирования.* В практике лазерного сканирования можно выделить два основных ме-

тода взаимного ориентирования дискретных точечных моделей:

- с использованием специальных марок, которые устанавливаются на объекте до начала измерений с учетом обеспечения их видимости с различных станций лазерного сканирования [1, 18–26];

- с использованием точек сканирования, при котором взаимное ориентирование двух моделей выполняется с помощью итерационного алгоритма ближайших точек [21, 27–30].

Для внешнего ориентирования точечных моделей в практике лазерного сканирования наибольшее распространение получили два метода [1, 20–25, 30]:

- прямой: линейные и угловые элементы внешнего ориентирования определяются в результате центрирования, горизонтирования лазерного сканера над точкой с известными координатами и ориентирования прибора по заданному направлению;

- аналитический: линейные и угловые элементы внешнего ориентирования вычисляются математически после сканирования специальных марок, координаты которых известны.

На практике, как правило, при лазерном сканировании промышленных объектов, все полевые измерения выполняются в условной

системе координат, и дальнейшее внешнее ориентирование происходит в процессе камеральной обработки через стандартную процедуру преобразования координат. При этом каждая модель обрабатывается отдельно и затем трансформируется в заданную систему координат, или выполняется взаимное ориентирование всех моделей, и полученная единая модель трансформируется в заданную систему координат [30].

*Вычисление параметров сканирования.* Одним из основных параметров лазерного сканирования является разрешение, которое определяется в зависимости от технических характеристик прибора, сложности объекта, необходимой детальности и точности измерения объекта. В соответствии с этим, разрешение сканирования устанавливается таким образом, чтобы измерений поверхности было достаточно для идентификации минимально требуемого размера конструктивного элемента. Согласно [30], необходимое угловое разрешение сканирования  $\Delta\varphi(\Delta\theta)_{\text{угл}}$  по горизонтали и вертикали можно определить по формуле:

$$\Delta\varphi(\Delta\theta)_{\text{угл}} = \frac{d \cos \gamma}{D\sqrt{2}} r, \quad (2)$$

где  $d$  – размер наименьшего конструктивного элемента,

На основании проведенного анализа обобщенной технологической схемы наземного лазерного сканирования, а также практического опыта выполним предрасчет параметров сканирования и сформируем предложения по выполнению НЛС промышленного объекта.

### Предрасчет параметров НЛС промышленных объектов

*Расчет допустимого угла падения лазерного луча на поверхность объекта.* Для расчета влияния угла падения лазерного луча  $\gamma$  на поверхность объекта и расстояния  $D$  до объекта воспользуемся формулой (1) для вычисления ошибки  $\Delta D$  измерения расстояний. Результаты вычислений представим на рис. 3 и в табл. 1.

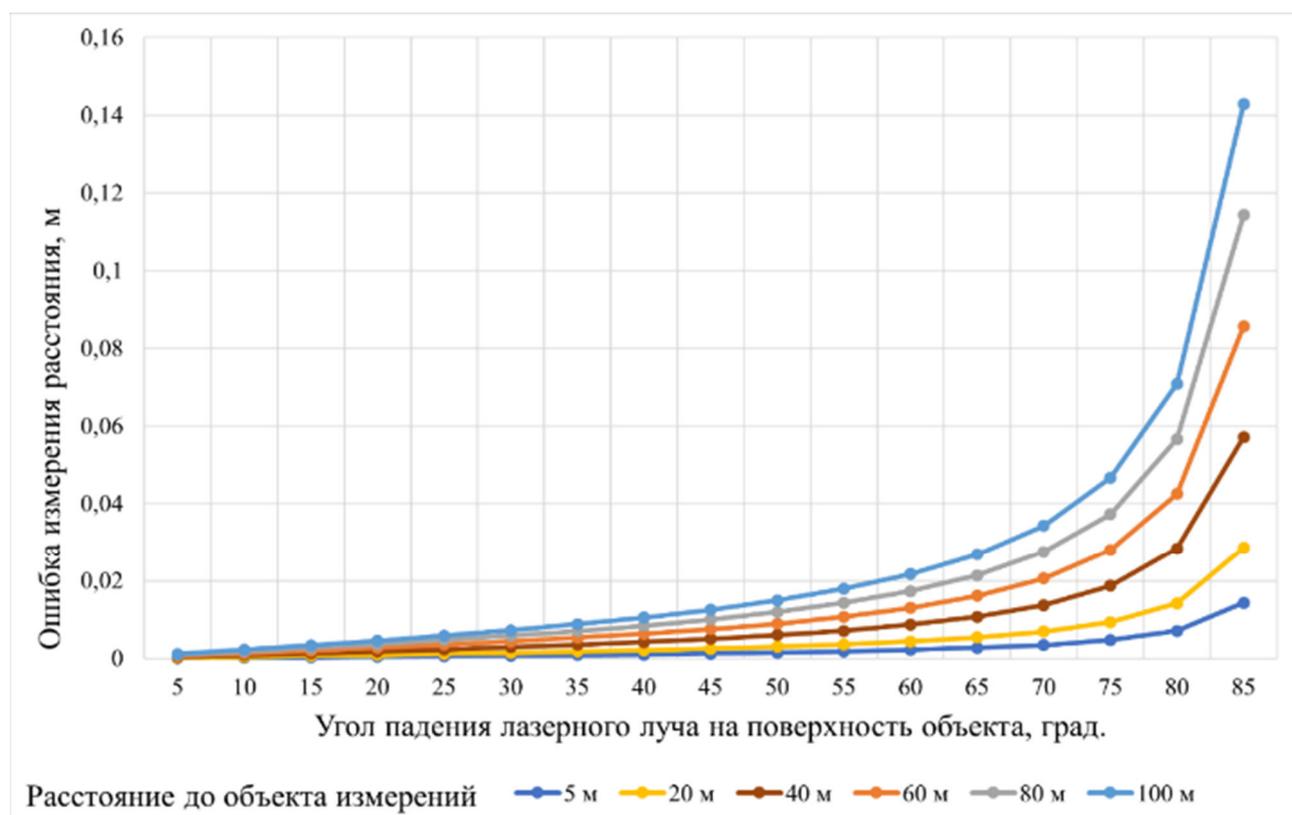


Рис. 3. Зависимость ошибки измерения расстояний от угла падения лазерного луча и расстояния до объекта

Таблица 1

Расчет влияния угла падения лазерного луча на ошибку измерения расстояний

Расстояние до объекта измерений, м	Ошибка $\Delta D$ измерения расстояний (м), при различных углах $\gamma$ падения лазерного луча на поверхность объекта								
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
5	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0004	0,0005	0,0006
10	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005	0,0006	0,0007	0,0009	0,0010	0,0012
15	0,0002	0,0003	0,0005	0,0007	0,0009	0,0011	0,0013	0,0016	0,0019
20	0,0002	0,0004	0,0007	0,0009	0,0012	0,0014	0,0018	0,0021	0,0025
25	0,0003	0,0006	0,0008	0,0011	0,0015	0,0018	0,0022	0,0026	0,0031
30	0,0003	0,0007	0,0010	0,0014	0,0017	0,0022	0,0026	0,0031	0,0037
35	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,0020	0,0025	0,0031	0,0037	0,0044
40	0,0004	0,0009	0,0013	0,0018	0,0023	0,0029	0,0035	0,0042	0,0050
45	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0026	0,0032	0,0039	0,0047	0,0056
50	0,0005	0,0011	0,0017	0,0023	0,0029	0,0036	0,0044	0,0052	0,0062
55	0,0006	0,0012	0,0018	0,0025	0,0032	0,0040	0,0048	0,0058	0,0069
60	0,0007	0,0013	0,0020	0,0027	0,0035	0,0043	0,0053	0,0063	0,0075
65	0,0007	0,0014	0,0022	0,0030	0,0038	0,0047	0,0057	0,0068	0,0081
70	0,0008	0,0015	0,0023	0,0032	0,0041	0,0051	0,0061	0,0073	0,0087
75	0,0008	0,0017	0,0025	0,0034	0,0044	0,0054	0,0066	0,0079	0,0094
80	0,0009	0,0018	0,0027	0,0036	0,0047	0,0058	0,0070	0,0084	0,0100
85	0,0009	0,0019	0,0028	0,0039	0,0050	0,0061	0,0074	0,0089	0,0106
90	0,0010	0,0020	0,0030	0,0041	0,0052	0,0065	0,0079	0,0094	0,0112
95	0,0010	0,0021	0,0032	0,0043	0,0055	0,0069	0,0083	0,0100	0,0119
100	0,0011	0,0022	0,0033	0,0045	0,0058	0,0072	0,0088	0,0105	0,0125
Расстояние до объекта измерений, м	Ошибка $\Delta R$ измерения расстояний (м), при различных углах $\gamma$ падения лазерного луча на поверхность объекта								
	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	89°
5	0,0007	0,0009	0,0011	0,0013	0,0017	0,0023	0,0035	0,0071	0,0358
10	0,0015	0,0018	0,0022	0,0027	0,0034	0,0047	0,0071	0,0143	0,0716
15	0,0022	0,0027	0,0032	0,0040	0,0052	0,0070	0,0106	0,0214	0,1074
20	0,0030	0,0036	0,0043	0,0054	0,0069	0,0093	0,0142	0,0286	0,1432
25	0,0037	0,0045	0,0054	0,0067	0,0086	0,0117	0,0177	0,0357	0,1790
30	0,0045	0,0054	0,0065	0,0080	0,0103	0,0140	0,0213	0,0429	0,2148
35	0,0052	0,0062	0,0076	0,0094	0,0120	0,0163	0,0248	0,0500	0,2506
40	0,0060	0,0071	0,0087	0,0107	0,0137	0,0187	0,0284	0,0572	0,2864
45	0,0067	0,0080	0,0097	0,0121	0,0155	0,0210	0,0319	0,0643	0,3222
50	0,0074	0,0089	0,0108	0,0134	0,0172	0,0233	0,0354	0,0714	0,3580
55	0,0082	0,0098	0,0119	0,0147	0,0189	0,0257	0,0390	0,0786	0,3938
60	0,0089	0,0107	0,0130	0,0161	0,0206	0,0280	0,0425	0,0857	0,4296
65	0,0097	0,0116	0,0141	0,0174	0,0223	0,0303	0,0461	0,0929	0,4654
70	0,0104	0,0125	0,0152	0,0188	0,0240	0,0327	0,0496	0,1000	0,5012
75	0,0112	0,0134	0,0162	0,0201	0,0258	0,0350	0,0532	0,1072	0,5370
80	0,0119	0,0143	0,0173	0,0214	0,0275	0,0373	0,0567	0,1143	0,5728
85	0,0127	0,0152	0,0184	0,0228	0,0292	0,0397	0,0603	0,1214	0,6086
90	0,0134	0,0161	0,0195	0,0241	0,0309	0,0420	0,0638	0,1286	0,6444
95	0,0142	0,0170	0,0206	0,0255	0,0326	0,0443	0,0673	0,1357	0,6802
100	0,0149	0,0179	0,0217	0,0268	0,0343	0,0467	0,0709	0,1429	0,7160

Анализ полученных результатов позволяет определить допустимый угол  $\gamma$  и расстояние до объекта, при которых ошибка измерения расстояний не превышает 1 мм, что соответствует техническим характеристикам большинства современных наземных лазерных сканеров:

- $\gamma$  до  $55^\circ$  при  $D$  до 5 м;
- $\gamma$  до  $30^\circ$  при  $D$  до 15 м;
- $\gamma$  до  $15^\circ$  при  $D$  30 м;
- $\gamma$  до  $5^\circ$  при  $D$  до 100 м.

Следовательно, в процессе подготовки к проведению НЛС необходимо учитывать указанную зависимость для удовлетворения требований к точности результатов измерений.

*Расчет необходимого разрешения сканирования при съемке промышленных объектов.* Как было отмечено ранее, разрешение сканирования устанавливается таким образом, чтобы было возможно идентифицировать минимально требуемый размер (согласно техническому заданию) конструктив-

ного элемента. Как правило, при съемке промышленных объектов особую сложность представляет измерение трубопроводов диаметром менее 50 мм, анкерных болтов и точек подключения электрооборудования. Как было отмечено ранее, в условиях НЛС промышленных установок объекты измерений выполнены из различных материалов и соответственно имеют различную интенсивность отраженного сигнала. В связи с этим выполнен расчет необходимого линейного разрешения сканирования  $\Delta\varphi(\Delta\theta)_л$  (табл. 2) в зависимости от коэффициента отражения поверхности объекта  $r$ , расстояния до объекта  $D$  и угла  $\gamma$  падения лазерного луча на поверхность объекта по формуле (2) и следующей формуле:

$$\Delta\varphi(\Delta\theta)_л = 2D \sin\left(\frac{\Delta\varphi(\Delta\theta)_{угл}}{2}\right), \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi(\Delta\theta)_{угл}$  – угловое разрешение сканирования, вычисляемое по формуле (2).

Таблица 2

Требуемое разрешение сканирования

Коэффициент отражения поверхности объекта, %	Требуемое разрешение сканирования в зависимости от наименьшего измеряемого объекта, м				
	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050
0,10 (чугун, кирпич)	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035
0,30 (бетон)	0,0021	0,0042	0,0063	0,0084	0,0105
0,50 (железобетон)	0,0035	0,0070	0,0105	0,0141	0,0176
0,70 (сталь, оцинкованное железо, белая краска)	0,0049	0,0098	0,0148	0,0197	0,0247

Практический опыт авторов показывает, что при НЛС объектов менее 50 мм, съемку необходимо выполнять не менее чем с двух станций лазерного сканирования для увеличения точек сканирования на поверхности объекта и, соответственно, более точной идентификации.

*Расчет допустимого расстояния между станциями лазерного сканирования.* В практике НЛС промышленных объектов взаимное ориентирование точечных моделей часто выполняется с применением итерационного алгоритма ближайших точек. Однако для кор-

ректной работы указанного алгоритма необходимо соблюдение определенных условий. Так, на основании исследования практических результатов взаимного ориентирования с использованием алгоритма ближайших точек, приведенных в работе авторов [10], предлагается при установке станций лазерного сканирования соблюдать расстояние между соседними станциями, не превышающее 25 м. При этом отметим, что необходимо обеспечивать видимость объекта съемки с двух смежных станций лазерного сканирования для достаточного перекрытия двух точечных моделей.

Соблюдение предлагаемых условий при взаимном ориентировании точечных моделей позволяет определить достаточное количество соответствующих пар точек, что, в свою очередь, позволяет получить среднюю квадратическую ошибку (СКО) взаимного ориентирования в пределах 10 мм. Предрасчет точности взаимного ориентирования  $m_{\text{Вз.ор}}$  предлагается выполнять по подобранной аппроксимирующей функции методом наименьших квадратов исходя из исследования зависимости значений СКО взаимного ориентирования от расстояния между смежными станциями сканирования (рис. 4):

$$m_{\text{Вз.ор}} = 5 \cdot 10^{-9} D^3 + 2 \cdot 10^{-6} D^2 + 6 \cdot 10^{-5} D + 0,0112.$$

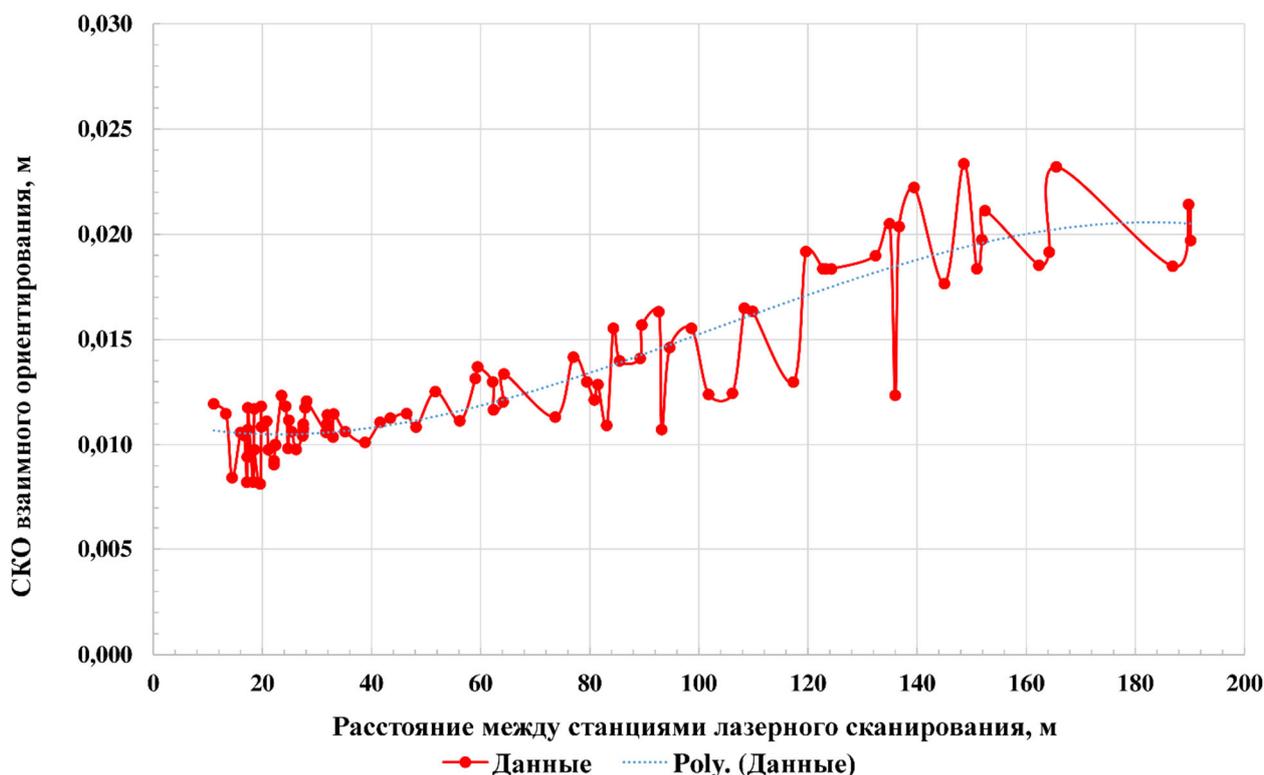


Рис. 4. Уравнение тренда зависимости значений СКО взаимного ориентирования от расстояния между смежными станциями сканирования

#### ***Предложения по выполнению взаимного и внешнего ориентирования дискретных точечных моделей***

При объединении массива измерений со всех станций возникает задача взаимного ориентирования моделей в единую модель с ее последующим внешним ориентированием в заданную систему координат. Следует отметить, что НЛС промышленного объекта предполагает собой съемку больших площадей технологических установок с плотной застройкой. В связи с этим предла-

гается выполнять измерения и их дальнейшее взаимное ориентирование отдельно для каждого технологического блока, входящего в состав технологической установки. Отметим также, что взаимное ориентирование предлагается выполнять с учетом «замыкания» сети станций лазерного сканирования и создания дополнительных «узловых станций» (рис. 5).

Таким образом, при выполнении измерений объекта получается сеть взаимосвязанных станций, которая повышает точность определения положения станций лазерного

сканирования. Соблюдение указанного предложения позволяет в ходе выполнения взаимного ориентирования отдельных бло-

ков внутри технологической установки избежать коллизий двух моделей отдельных блоков.



Рис. 5. Схема расположения станций лазерного сканирования при выполнении измерений технологического блока

Для выполнения взаимного ориентирования отдельных технологических блоков в единую модель технологической установки предлагается использовать станции сканерной сети, предложенной в работе авторов [10]. Согласно разработанной методике построения сканерной сети, установка станций выполняется по периметру каждого из технологических блоков.

В ходе уравнивания геодезической сети вычисляются координаты станций сканерной сети и, соответственно, координаты каждой измеренной точки объекта в заданной системе координат. Тогда при выполнении взаимного ориентирования точечных моделей отдельного технологического блока предлагается включать в обработку измерения с ближайших станций сканерной сети (рис. 6).

При этом процесс взаимного ориентирования предполагает, что точечная модель, принадлежащая станции сканерной сети, принимается истинной и остается неподвижной, а ближайшая станция, принадлежащая модели технологического блока, является подвижной и стремится занять положение, наиболее близкое к истинной модели. В итоге получим модели всех технологических блоков, включающих станции сканерной сети с известными координатами. Дальнейший процесс объединения всех технологических блоков в единую модель технологической установки предлагается выполнять путем совмещения точечной модели сканерной сети и точечных моделей технологических блоков, где и в первой, и во второй модели имеются одинаковые станции.

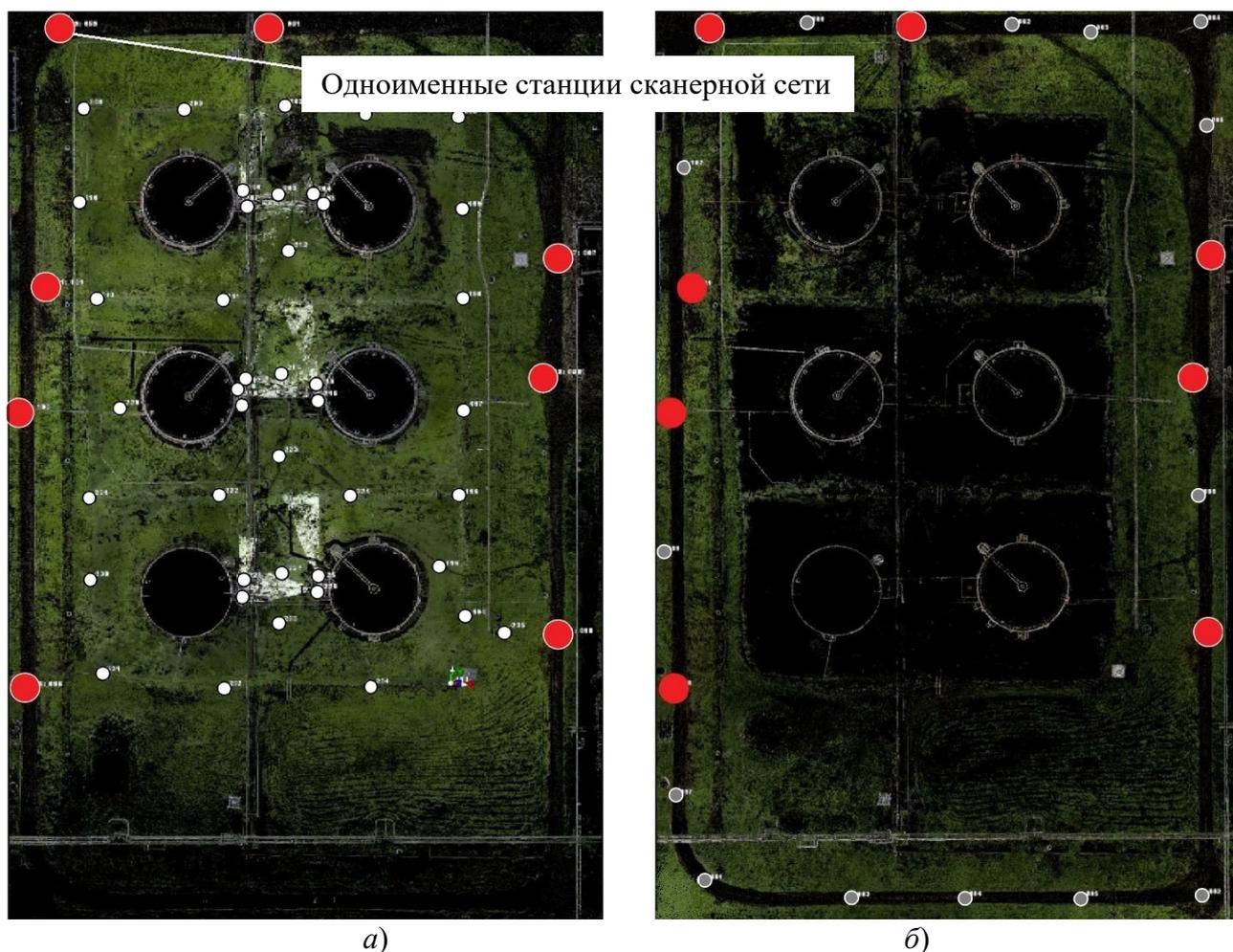


Рис. 6. Схема расположения станций лазерного сканирования технологического блока:  
 а) фрагмент схемы НЛС технологического блока; б) фрагмент станций сканерной сети

### Выводы

В результате проведенного исследования предложена технологическая схема НЛС, учитывающая особенности съемки промышленных объектов.

Выполнен анализ этапов технологической схемы имеющих важное значение при НЛС промышленных объектов, таких как определение мест установки станций лазерного сканирования, установка параметров сканирования, взаимное и внешнее ориентирование дискретных точечных моделей.

На основании проведенного анализа выполнен предрасчет параметров НЛС промышленных объектов, таких как:

- допустимый угол падения лазерного луча на поверхность объекта и ошибки измерения расстояний;

- разрешение сканирования в зависимости от размера наименьшего объекта измерений, расстояния до объекта, коэффициента отражения поверхности и угла падения лазерного луча.

Выполнен расчет максимально допустимого расстояния между станциями лазерного сканирования с учетом взаимного ориентирования итерационным алгоритмом ближайших точек.

Предложено взаимное ориентирование точечных моделей выполнять с учетом «замыкания» сети станций лазерного сканирования и создания дополнительных «узловых станций», что позволит повысить точность определения положения станций лазерного сканирования и избежать коллизий двух моделей отдельных блоков.

Для выполнения взаимного ориентирования отдельных технологических блоков

единую модель технологической установки предложено включить в обработку измерения со станций сканерной сети. При этом процесс объединения всех технологических блоков в единую модель технологической установки предлагается выполнять путем совмещения точечной модели сканерной сети и точечных

моделей технологических блоков, где и в первой, и во второй модели имеются одинаковые станции.

Результаты работы могут быть полезными для специалистов и исследователей, применяющих НЛС для решения различных задач на промышленных объектах.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азаров Б. Ф., Филипченко И. А. Применение наземного лазерного сканирования для разработки проектной и исполнительной информационной модели строящегося здания // Ползуновский альманах. – 2021. – № 1. – С. 11–13.
2. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 121–139.
3. Богданов А. Н., Листратов Я. А. Строительный контроль методом наземного лазерного сканирования // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 4 (50). – С. 401–409.
4. Вербная В. П., Хорошилов В. С., Комиссаров А. В. Оптимальный метод выбора лазерного сканера для различных видов инженерно-технических работ. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Международ. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 204–208.
5. Кемербаев Н. Т., Шоломицкий А. А. Новые задачи геодезии в автоматизированной системе управления промышленным предприятием // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Международ. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Т. 1. – С. 35–39.
6. Комиссаров А. В., Калинина М. С. Методика совместного получения и обработки данных наземного лазерного сканирования и цифровой съемки // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 39–42.
7. Горбань Н. Н., Васильев Г. Г., Сальников А. П., Шитов С. И. Разработка схемы размещения сканерных станций при наземном лазерном сканировании резервуаров с учетом требований к погрешности результатов измерений // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 74–78.
8. Середович А. В., Дементьева О. А. Применение наземного лазерного сканирования в комплексе изыскательских работ по реконструкции технологических объектов // Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 1, ч. 1. – С. 144–148.
9. Хатум Х. М., Мустафин М. Г. Проектирование и оценка геодезических наблюдений за деформациями обнажений выемки при строительстве станции метрополитена // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 45–57.
10. Шарафутдинова А. А., Брынь М. Я. Методика проектирования и построения геодезической сети при наземном лазерном сканировании крупных промышленных объектов // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 72–85.
11. Ворошилов А. П., Караченцев Ю. А. Выбор местоположения станций при наземном лазерном сканировании зданий и сооружений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2009. – № 16 (149). – С. 20–22.
12. Мустафин М. Г., Шокер Х. М. Оценка влияния линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки на точность построения модели объекта // Маркшейдерский вестник. – 2020. – № 6 (139). – С. 42–50.
13. Юнусов А. Г., Джидид А. Д., Бегляров Н. С., Елшеви М. А. Оценка влияния изменения плотности облака точек на точность автоматической сегментации // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81, № 7. – С. 47–55.
14. Соломатин В. А. Оценка точности наземных лазерных сканеров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 5. – С. 110–114.
15. Lichti D. D. Angular resolution measure for terrestrial laser scanners // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences. – 2006. – Vol. 21, No.114. – P. 141–160.

16. Lichti D. D. The impact of angle parameterisation on terrestrial laser scanner self-calibration // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. – 2009. – Vol. 38, No. 3. – P. 171–176.
17. Hancock J. A. Laser intensity-based obstacle detection and tracking : Doctoral dissertation, technical report CMU-RI-TR-99-01. – Pittsburgh, Pennsylvania, 1999. – 180 p.
18. Reshetyuk Y. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning : Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy. – Stockholm, 2009. – 174 p.
19. Азаров Б. Ф., Алейникова Е. В. Оценка точности регистрации результатов сканирования на участке автомобильной дороги р-257 «Енисей» (КМ 299+900 КМ 304+900) // Ползуновский альманах. – 2020. – Т. 1, № 2. – С. 4–9.
20. Азаров Б. Ф. К вопросу о методике контроля точности регистрации сканерных станций при выполнении инженерно-геодезических изысканий автодорог // Ползуновский вестник. – 2016. – № 4–2. – С. 125–128.
21. Алтынцев М. А., Алтынцева М. А. Применение технологии лазерного сканирования для контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 377–393.
22. Азаров Б. Ф., Карелина И. В., Опара В. В. Статистическая обработка результатов регистрации сканерных станций при производстве исполнительных съемок строительных конструкций // Ползуновский альманах. – 2019. – № 2–1. – С. 3–7.
23. Выстрчил М. Г. Определение критерия граничной интенсивности для дешифрации марок внешнего ориентирования при производстве наземной лазерно-сканирующей съемки // Маркшейдерский вестник. – 2014. – № 1 (99). – С. 27–29.
24. Выстрчил М. Г., Гусев В. Н. Погрешность определения положения цилиндрических марок внешнего ориентирования относительно лазерно-сканирующей системы // Маркшейдерский вестник. – 2014. – № 1 (99). – С. 30–35.
25. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
26. Яковлев А. Н., Токмаков Е. В., Павлов О. В. и др. Применение наземного лазерного сканирования и трехмерного информационного моделирования для неразрушающего контроля // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 12–2. – С. 72–75.
27. Велижев А. Б. Разработка и исследование алгоритмов автоматического взаимного ориентирования трехмерных дискретных моделей объектов, полученных в результате лазерного сканирования : дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 78 с.
28. Выстрчил М. Г. Обоснование способов внешнего ориентирования цифровых моделей горных выработок, получаемых по результатам съемок лазерно-сканирующими системами : дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2014. – 167 с.
29. Чибуничев А. Г., Велижев А. Б. Автоматическое сопоставление облаков точек, полученных в результате наземного лазерного сканирования, с использованием ориентационных гистограмм // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 3. – С. 112–119.
30. Шульц Р. В. Наземное лазерное сканирование в задачах инженерной геодезии. – Кишинев : Palmarium Academic Publishing, 2013. – 348 с.

### Об авторах

*Анжелика Алексеевна Шарафутдинова* – аспирант кафедры инженерной геодезии, ведущий инженер.

*Михаил Ярославович Брынь* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии.

Получено 22.12.2022

© А. А. Шарафутдинова, М. Я. Брынь, 2023

## Calculating the parameters of terrestrial laser scanning of industrial object

A. A. Sharafutdinova<sup>1,2\*</sup>, M. Ja. Bryn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Trimetari Consulting LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* e-mail: anzhelikaalexeevna@gmail.com

**Abstract.** Terrestrial laser scanning of industrial facilities has a number of features, among which are: a large number of laser scanner installation stations, short distances between stations, complex geometry and differences in the reflectivity of the measurement objects materials, as well as a large amount of data derived from the work. To achieve the required accuracy in solving different tasks these features must be taken into account when performing measurements, as well as when processing measurement results. Based on the analysis early research and practical experience, authors propose a generalized technological scheme for terrestrial laser scanning of industrial facilities. In the article the scan settings also calculated, including setting of scan resolution, the choice of the distance to the object and the permissible beam incidence angle. Proposals are also given for the point cloud registration and datum transformation using an Iterative Closest Point Algorithm. The performed studies can be useful for precalculating the accuracy of the terrestrial laser scanning results.

**Keywords:** point cloud registration, datum transformation, terrestrial laser scanning, measurement error, scan settings

### REFERENCES

1. Azarov, B. F., & Filipchenko, I. A. (2021). Application of terrestrial laser scanning for the development of an as-design and as-build BIM. *Polzunovskiy al'manakh [Polzunovskiy Almanac]*, 1, 11–13 [in Russian].
2. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). The technique for creating digital three-dimensional models of oil and gas manufacturing facility object infrastructure using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 121–139 [in Russian].
3. Bogdanov, A. N., & Listratov, Ya. A. (2019). Construction control by terrestrial laser scanning. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]*, 4(50), 401–409 [in Russian].
4. Verbnaya, V. P., Khoroshilov, V. S., & Komissarov, A. V. (2015). Laser scanner for different types of engineering: optimal choice techniques. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 204–208). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
5. Kemerbaev, N. T., & Sholomitsky, A. A. (2021). New surveying tasks in automated industrial enterprise management system. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2021: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2021: International Scientific Conference: Vol. 1 Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 35–39). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
6. Komissarov, A. V., & Kalinina, M. S. (2015). A technique for joint acquisition and processing of terrestrial laser scanning and digital survey data. *Izvestia vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 4, 39–42 [in Russian].
7. Gorban, N. N., Vasiliev, G. G., Salnikov, A. P., & Shitov, S. I. (2020). Development of a layout of scanner stations for ground-based laser scanning of tanks, taking into account the requirement; for the deviation in measurement. *Neftyanoye khozyaystvo [Oil Industry]*, 2, 74–78 [in Russian].
8. Sereдович, A. V., & Dementieva, O. A. (2009). Terrestrial laser scanning application in the complex of survey works on technological objects reconstruction. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2009: T. 1, ch. I [Proceedings of GEO-Siberia-2009: Vol. 1, Part I]* (pp. 144–148). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
9. Hatoum, H. M., & Mustafin, M. G. (2020). Methodology for designing and evaluating results of geodesic observations of engineering structures using the least square method. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(4), 45–57 [in Russian].

10. Sharafutdinova, A. A., & Bryn, M. Ya. (2022). Technique for designing and constructing a geodetic network when performing terrestrial laser scanning at industrial object. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(2), 72–85 [in Russian].
11. Voroshilov, A. P., & Karachentsev, Yu. A. (2009). Choice of station location at surface laser scanning of buildings and constructions. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture]*, 16(149), 20–22 [in Russian].
12. Mustafin, M. G., & Shoker, H. M. (2020). Estimation of the influences of the linear-angular parameters of the laser-scanning observation on the object model construction accuracy. *Marksheyderskiy vestnik [Mine Surveyor's Bulletin]*, 6(139), 42–50 [in Russian].
13. Yunusov, A. G., Dzhdid, A. D., Beglyarov, N. S., & Elshevi, M. A. (2020). Assessment of automatic segmentation accuracy with various point cloud density. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 81(7), 47–55 [in Russian].
14. Solomatin, V.A. (2012). Assessment of the accuracy of terrestrial laser scanners. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5, 110–114 [in Russian].
15. Lichti, D. D. (2006). Angular resolution measure for terrestrial laser scanners. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences*, 21(114), 141–160.
16. Lichti, D. D. (2009). The impact of angle parameterisation on terrestrial laser scanner self-calibration. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 38(3), 171–176.
17. Hancock, J. A. (1999). Laser intensity-based obstacle detection and tracking. Doctoral dissertation, technical report CMU-RI-TR-99-01. Pittsburgh, Pennsylvania, 180 p.
18. Reshetyuk, Y. (2009) Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy. Stockholm, 174 p.
19. Azarov, B. F., & Aleinikova, E. V. (2020). Evaluation of the recording accuracy the scanning results on the section of the highway r-257 «Yenisei» (KM 299+900 KM 304+900). *Polzunovskiy al'manakh [Polzunovskiy almanac]*, 1 (2), 4–9 [in Russian].
20. Azarov, B. F. (2016). On the question of the method of monitoring the accuracy of registration of scanner stations when performing engineering and geodetic surveys of roads. *Polzunovskiy al'manakh [Polzunovskiy almanac]*, 4(2), 125–128 [in Russian].
21. Altyntsev, M. A., & Altyntseva, M. A. (2021). Application of laser scanning technology to control the state of protective constructions when transferring oil products. *InterCarto. InterGIS*. 27(1), 377–393 [in Russian].
22. Azarov, B. F., Karelina, I. V., & Opara, V. V. (2019). Statistical processing of the results of registration of scanner stations in the production of executive surveys of building structures. *Polzunovskiy al'manakh [Polzunovskiy almanac]*, 2(1), 3–7 [in Russian].
23. Vystrechil, M. G. (2014). Determination of the boundary intensity criterion for deciphering exterior orientation marks in the production of terrestrial laser-scanning survey. *Marksheyderskiy vestnik [Mine surveyor's bulletin]*, 1(99), 27–29 [in Russian].
24. Vystrechil, M. G., & Gusev, V. N. (2014). The error in determining the position of external orientation cylindrical marks relative to the laser-scanning system. *Marksheyderskiy vestnik [Mine surveyor's bulletin]*, 1(99), 30–35 [in Russian].
25. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].
26. Yakovlev, A. N., Tokmakov, E. V., & Pavlov, O. V. (2013). Application of terrestrial laser scanning and 3D information modeling for non-destructive testing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika. [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Physics]*, 56(12–2), 72–75 [in Russian].
27. Velizhev, A. B. (2008). Development and research of algorithms for automatic relative orientation of three-dimensional discrete models of objects obtained as a result of laser scanning. Ph.D. thesis. Moscow, 78 p. [in Russian].
28. Vystrechil, M. G. (2014). Substantiation of methods of external orientation of digital models of mine workings, obtained from the results of surveys by laser scanning systems. Ph.D. thesis. Saint-Peterburg, 167 p. [in Russian].

29. Chibunichev, A. G., & Velizhev, A. B. (2008). Automatic comparison of point clouds obtained as a result of terrestrial laser scanning using orientational histograms. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 112–119 [in Russian].

30. Schulz, R. V. (2013). *Nazemnoye lazernoye skanirovaniye v zadachakh inzhenernoy ge-odezii [Terrestrial laser scanning in engineering geodesy]*. Kishinev: Palmarium Academic Publ., 348 p. [in Russian].

#### Author details

*Anzhelika A. Sharafutdinova* – Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy; Engineer.

*Michael Ja. Bryn* – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy.

Received 22.12.2022

© *A. A. Sharafutdinova, M. Ja. Bryn, 2023*