

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-4-95-103

УДК 550.832:631.47

Э.И. Гусейнли (Государственный институт водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика)

ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИДАРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИТОЛОГИИ МАРШРУТА ПРОКЛАДКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Elmir I. Huseynli (State Research Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan)

ABOUT LIDAR USE FOR RESEARCH OF LITHOLOGY OF CONSTRUCTION MAIN PIPELINES ROUTE

Введение

Средства авиационного дистанционного зондирования послужили технической базой для формирования нового подхода к проведению топографического предпроектного обследования при проектировании различных инженерных коммуникаций, в том числе магистральных трубопроводов.

В статье рассмотрены вопросы использования лидара для исследования литологии маршрута прокладки магистральных трубопроводов.

Проведенный обзор известных результатов экспериментальных лидарных исследований литологии возможной трассы предполагаемой прокладки магистрального трубопровода показал существенную зависимость интенсивности отраженного луча лидара как от угла падения луча, так и от материала поверхности исследуемого объекта, а также от яркостного показателя поверхности исследуемого объекта.

Background

The means of aviation remote sensing served as the technical basis for the formation of a new approach to conducting a topographical pre-project survey in the design of various engineering communications, including main pipelines.

The article deals with the use of lidar to study the lithology of piping route.

A review of the known results of experimental lidar studies of the lithology of a possible route of the proposed laying of the main pipeline showed a significant dependence of the intensity of the reflected lidar beam both on the angle of incidence of the beam and on the surface material of the object under study, as well as on the brightness index of the object surface.

Цели и задачи

Целью работы является рассмотрение методологических вопросов создания авиационных информационно-измерительных систем, предназначенных для лидарного обследования литологии зоны предполагаемой трассы прохождения магистрального трубопровода. Задачей исследования является оценка информативности лидарных систем дистанционного зондирования, функционирующих в режиме обследования избранной трассы.

Результаты

Сформулирована оптимизационная задача, позволяющая выбрать наилучший режим проведения лидарных измерений в целях исследования литологии зоны предполагаемой прокладки магистрального трубопровода.

Решение сформулированной оптимизационной задачи позволило выработать практические рекомендации для построения оптимизационной бортовой информационно-измерительной системы для осуществления лидарного исследования литологии по предполагаемой трассе прокладки труб.

Aims and Objectives

The aim of the work is to consider the methodological issues of creating aviation information-measuring systems intended for lidar examination of the lithology of the main pipeline proposed route area. The task of the study is to assess the informativeness of lidar remote sensing systems operating in the survey mode of the selected route.

Results

An optimization problem has been formulated that allows one to choose the best mode for carrying out lidar measurements in order to study the lithology of the main pipeline proposed laying zone.

The solution of the formulated optimization problem allowed us to develop practical recommendations for the construction of an onboard information-measuring system for the implementation of lidar research of lithology on the intended piping route.

Ключевые слова: лидар; литология; трубопровод; оптимизация; трасса прокладки; коэффициент отражения; информационно-измерительная система

Key words: lidar; lithology; pipeline; optimization; strip laying; reflection coefficient; information-measuring system

Как отмечается в работе [1], средства авиационного дистанционного зондирования послужили технической базой для формирования нового подхода к проведению топографического предпроектного обследования при проектировании различных инженерных коммуникаций, в том числе магистральных трубопроводов.

Согласно [1], авиационные методы позволяют осуществить сбор данных, необходимых для проектирования, на дистанции в сотни километров за день, а точность их привязки составляет 10-20 см. При этом ставится вопрос о разработке бортового информационно-измерительного комплекса, реали-

зующего лазерно-локационные методы съёмки, в сочетании с цифровым фотографированием высокого разрешения, а также наземной и бортовой GPS поддержкой.

Как отмечается в работе [2], тесная связь, существующая между природой и магистральными трубопроводами, позволяет рассматривать их в качестве своеобразной природно-технической системы.

Проектирование магистральных трубопроводов включает два этапа: выбор трассы и проектирование с прочностным расчетом. При этом возникновение таких опасных явлений, как заболачивание по выбранной трассе трубопровода зависит от типа местности, ли-

тологии территории. Учет этих факторов позволяет уже на этапе проектирования скорректировать методику выбора трассы, определить методику прочностного расчета [2]. При этом информация об изменении природных условий во времени при взаимодействии трубопровода с окружающей средой может быть получена путем дистанционного исследования трассы, используя такие средства, как спектрометры, лидары и др.

Настоящая статья посвящена методологическим вопросам создания авиационных информационно-измерительных систем, предназначенных для лидарного обследования литологии зоны предполагаемой трассы прохождения магистрального трубопровода. Задачей исследования является оценка информативности лидарных систем дистанционного зондирования, функционирующих в режиме обследования избранной трассы.

Как отмечается в работе [3], лидарное уравнение имеет вид

$$P_r = \frac{P_t \cdot D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} \cdot \eta_{sys} \cdot \eta_{atm} \cdot \sigma_{cross} \cdot t, \quad (1)$$

где P_t - мощность посылаемого лазерного луча;

P - мощность приемного сигнала;

D_r - апертурный диаметр TLS сенсора;

R - расстояние между сенсором и сканируемым объектом.

B_t - ширина лазерного луча.

η_{sys} - системный коэффициент передачи сенсора.

η_{atm} - коэффициент ослабления атмосферы.

Если размеры гомогенной цели больше диаметра лазерного луча, а поверхность цели является диффузным отражателем, то поперечное сечение σ_{cross} может быть вычислено как

$$\sigma_{cross} = \pi \cdot \rho_\lambda \cdot R^2 \cdot \beta_t^2 \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

где θ - угол падения луча;

ρ_λ - поверхностное отражение цели на длине волны λ .

С учетом (1) и (2) получим

$$P_r = \frac{P_t \cdot D_r^2 \cdot \rho_\lambda \cdot \cos \theta}{4R^2} \cdot \eta_{sys} \cdot \eta_{atm} \cdot \quad (3)$$

Таким образом, как видно из выражения (3), мощность принимаемого сигнала зависит, в частности, от ρ_λ и θ .

В научно-технической литературе можно встретить многочисленные описания результатов экспериментальных исследований, где зависимость P_r от ρ_λ и θ подтверждается. Также можно встретить труды экспериментаторов, где приведены результаты исследований зависимости коэффициента отражения от угла падения и от яркости поверхности объекта. Например, на рисунке 1 приведены графические зависимости [4] коэффициента отражения PVC материала при коэффициентах яркости поверхности 70 %, 50 % и 26 %.

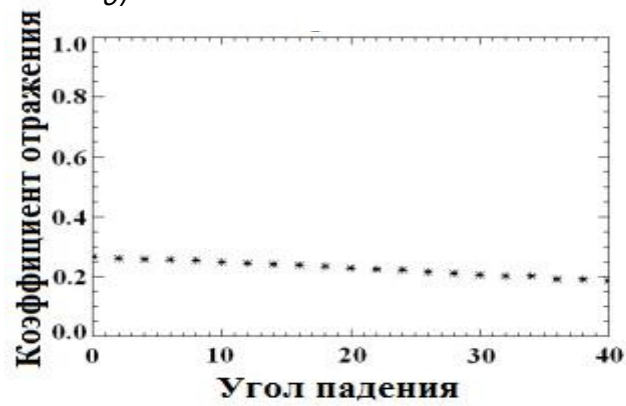
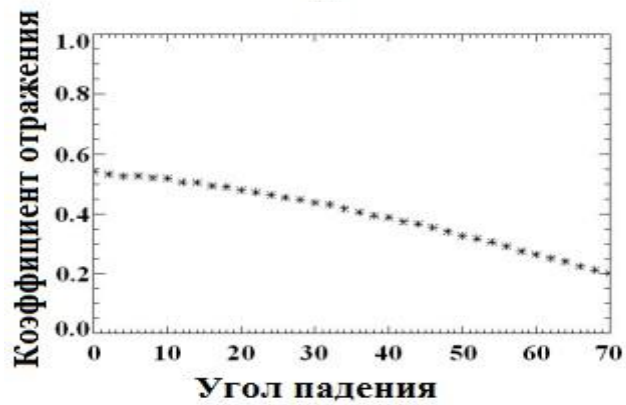
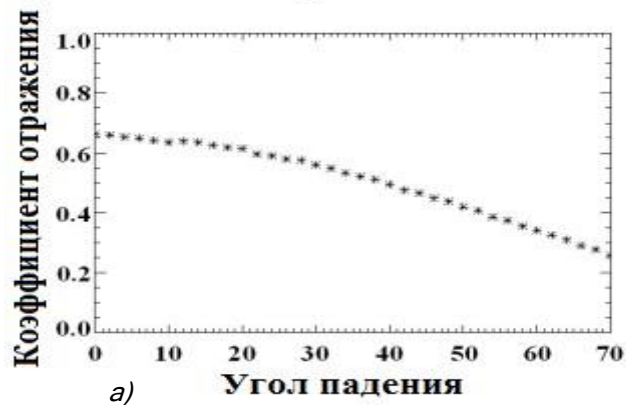
На рисунке 2 приведены кривые зависимости интенсивности отраженного сигнала от угла падения луча при разных значениях коэффициента яркости поверхности объекта исследования [5].

Аналогичные результаты приведены в работах [6, 7].

В работе [8] приведены результаты экспериментальных исследований, доказывающих возможность применения лидара в целях литологических исследований. На рисунке 3 показаны зависимости интенсивности приемного сигнала лидара в зависимости от весового содержания доломита, глины и полевого шпата в исследуемом материале.

Таким образом, вышеприведенный краткий обзор результатов известных экспериментальных исследований *подтверждает возможность использования лидара в целях проведения литологических исследований по трассе прокладки трубопроводов.*

Как было отмечено выше, для проведения экспериментальных работ по исследованию литологии вдоль трассы трубопровода *необходимо разработать бортовую информационно-измерительную систему, содержащую лидар, узел управления и вычислений, дисплей, а также блок питания.* Блок-схема системы показана на рисунке 4.



- а) коэффициент яркости 70 %;
- б) коэффициент яркости 50 %;
- в) коэффициент яркости 26 %

Рисунок 1. Кривые зависимости коэффициента отражения сигнала лидара от угла падения и яркости поверхности объекта исследования [4]

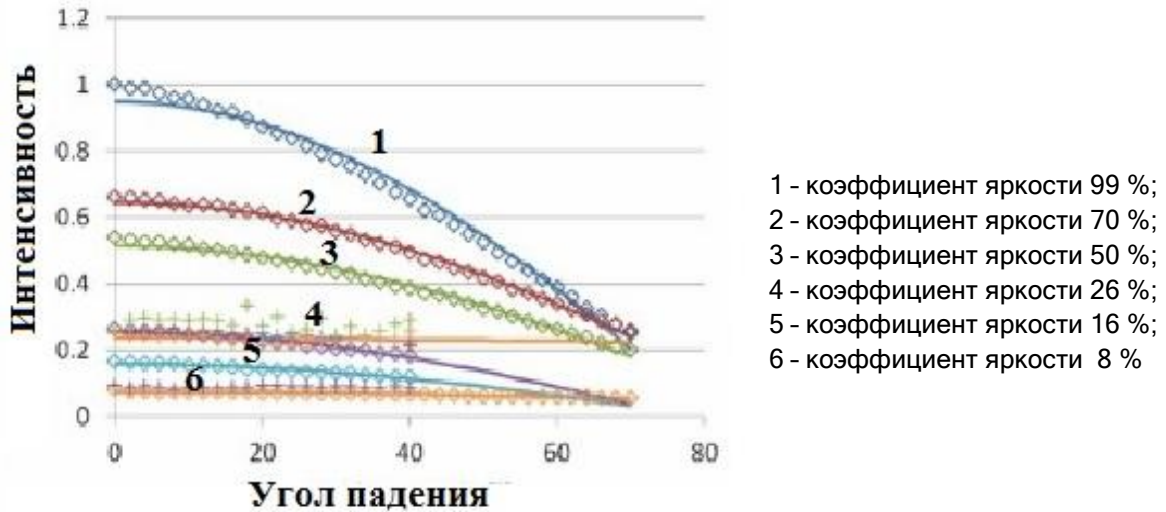


Рисунок 2. Кривые зависимости интенсивности отраженного луча лидара от угла падения и коэффициента яркости исследуемого объекта [5]

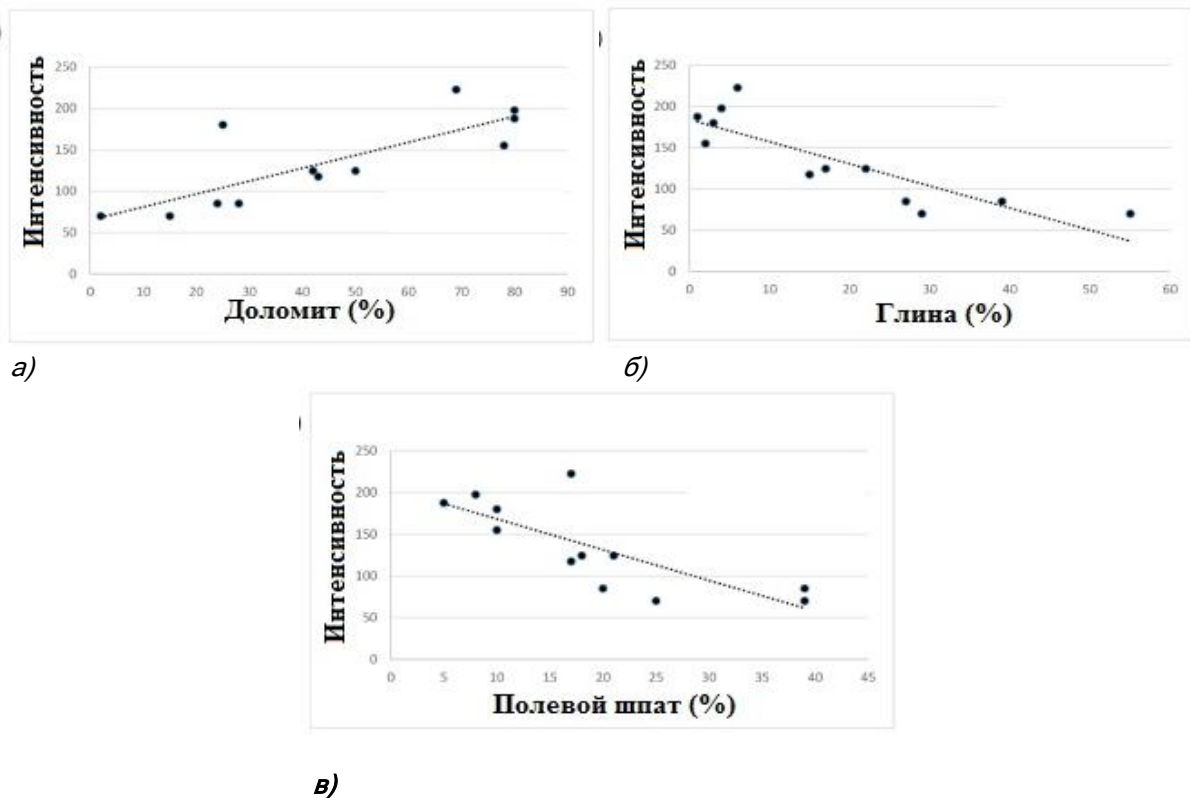
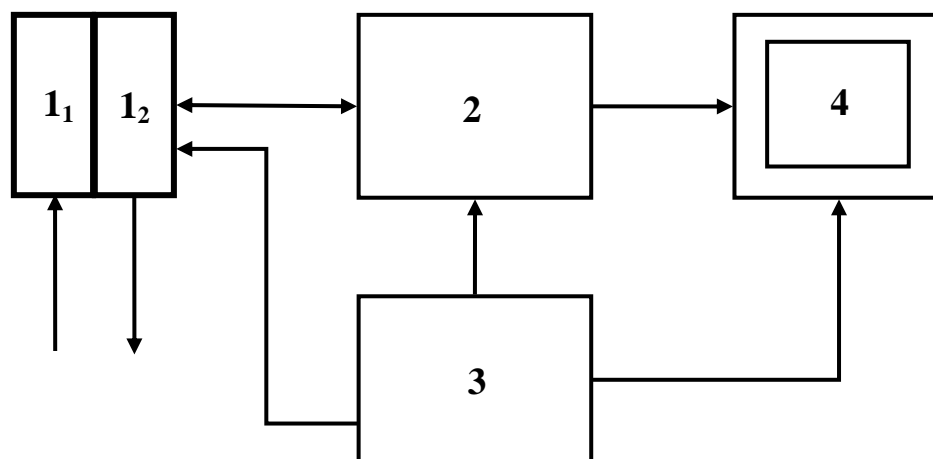


Рисунок 3. Кривые зависимости интенсивности приемного сигнала лидара от весового содержания в исследуемом материале: доломита (а), глины (б), полевого шпата (в)



- 1₁ - приемная часть лидара;
- 1₂ - передающая часть лидара;
- 2 - узел управления и вычислений;
- 3 - блок питания;
- 4 - монитор

Рисунок 4. Блок-схема бортовой информационно-измерительной системы для проведения дистанционных литологических исследований

Представим анализ информационной емкости проводимых лидарных измерений.

Покажем, что количество информации, получаемой при проведении лидарных измерений, обладает экстремальным свойством, что является важной особенностью, имеющей практическое значение при разработке бортовой лидарной системы.

В качестве исходных данных воспользуемся результатами исследований зависимости нормализованной интенсивности приемного оптического сигнала лидара от угла падения и среднеквадратического отклонения угла склона в радианах (рисунок 5) [3].

Как видно из рисунка 5, характер приведенных кривых позволяет в первом приближении принять равенство значений площадей, находящихся под этими кривыми.

Указанное свойство этих кривых математически выражается следующим образом:

$$\int_0^{\theta_{max}} I(\theta) = C = const, \quad (4)$$

где θ_{max} - максимальная величина угла падения луча;

$I(\theta)$ - интенсивность приемного луча лидара.

Если учесть, что $I(\theta)$ также зависит от яркости поверхности изучаемого объекта, то $I(\theta)$ вполне обоснованно можно рассмотреть в качестве случайной величины.

При этом количество информации, получаемое при проведении $N(\theta)$ числа измерений при фиксированном угле склона θ , может быть вычислено по формуле

$$M(\theta) = N(\theta) \log_2 \frac{I(\theta)}{\sigma} \text{ при } \frac{I(\theta)}{\sigma} \gg 1, \quad (5)$$

где σ - суммарные шумы в канале измерений.

Суммируя (5) по всем значениям θ , т.е. при $0 \leq \theta \leq \theta_{max}$ получим

$$M(\theta)_{ин} = \int_0^{\theta_{max}} N(\theta) \log_2 \frac{I(\theta)}{\sigma} d\theta. \quad (6)$$

Выражения (4) и (6) позволяют сформулировать задачу поиска оптимальной функции $I(\theta)$, при которой нижеприведенный целевой функционал достиг бы экстремального значения

$$F = \int_0^{\theta_{max}} \left[N(\theta) \log_2 \frac{I(\theta)}{\sigma} + \lambda \cdot I(\theta) \right] d\theta, \quad (7)$$

где λ - множитель Лагранжа.

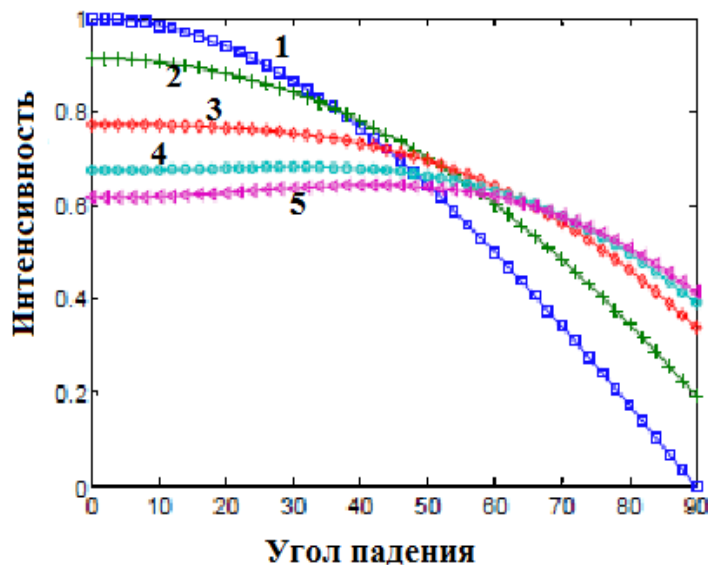
Решение оптимизационной задачи (7) по методу Эйлера дало

$$I(\theta) = \frac{N(\theta) \cdot C}{\int_0^{\theta_{max}} N(\theta) d\theta}. \quad (8)$$

При этом при условии (8) целевой функционал (7) достигает максимальной величины.

Таким образом, с учетом (8) можно заключить, что для достижения наивысшей информативности проводимых измерений форма функции $N(\theta)$ должна повторять форму функции $I(\theta)$ с учетом масштабирующего коэффициента C_1 , где

$$C_1 = \frac{C}{\int_0^{\theta_{max}} N(\theta) d\theta}. \quad (9)$$



1 - $\varepsilon = 0^\circ$; 2 - $\varepsilon = 15^\circ$; 3 - $\varepsilon = 30^\circ$; 4 - $\varepsilon = 45^\circ$; 5 - $\varepsilon = 60^\circ$

Рисунок 5. Зависимость нормализованной интенсивности приемного сигнала лидара от угла падения луча и среднеквадратического отклонения распределения угла склона исследуемых точек (ε) на поверхности объекта

Следовательно, при малых углах падения лазерного луча следует проводить больше измерений, чем при больших углах.

Выполнение этого условия позволит максимизировать количество информации, получаемое при лидарных измерениях, проводимых для выяснения состояния литологии по предполагаемой трассе прокладки трубопровода.

С учетом выражений (6) и (8) определим общее количество информации, вырабатываемое при проведении серийных лидарных измерений

$$M(\theta)_{\text{ин макс}} = \int_0^{\theta_{\text{max}}} \frac{N(\theta) \cdot C}{\sigma \int_0^{\theta_{\text{max}}} N(\theta) d\theta} d\theta \quad (10)$$

Таким образом, при построении бортовой информационно-измерительной системы, блок-схема которой показана на рисунке 4, следует учесть возможность хранения и обработки массива информации, объем которого определяется по формуле (10).

Список литературы

1. Лазерная картография. Комплексные аэрофотографические работы по геоинформационному обеспечению. URL: http://loi.sccc.ru/gis/rlz/laser_survey/laser_survey.html (дата обращения: 12.04.2019).
2. Хренов Н.Н. Выявление закономерностей взаимодействия северных трубопроводов с геологической средой по материалам аэрокосмических съёмок. URL: <http://www.dissercat.com/content/vyyavlenie-zakonomernostei-vzaimodeistviya-severnykh-truboprovodov-s-geologicheskoi-sredoi-p> (дата обращения: 12.04.2019).
3. Teng Xu, Bingwei Yang, Xialou Li, Junen Yao. Terrestrial Laser Scanning Intensity Correction by Piecewise Fitting and Overlap-Driven Adjustment Remote Sens 2017. URL: www.mdpi.com/journal/remotesensing (дата обращения: 12.04.2019).
4. Antero Kukko. Mobile Laser Scanning - System Development, Performance and Applications. Kirkkonummi, 2013.
5. Sanna Kaasalainen, Anttoni Jaakkola, Mikko Kaasalainen, Anssi Krooks, Antero Kukko. Analysis of Incidence Angle and Distance Effects on Terrestrial

Выводы

1. Проведенный обзор известных результатов экспериментальных лидарных исследований литологии возможной трассы предполагаемой прокладки магистрального трубопровода показал существенную зависимость интенсивности отраженного луча лидара как от угла падения луча, так и от материала поверхности исследуемого объекта, а также от яркостного показателя поверхности исследуемого объекта.

2. Сформулирована оптимизационная задача, позволяющая выбрать наилучший режим проведения лидарных измерений в целях исследования литологии зоны предполагаемой прокладки магистрального трубопровода.

3. Решение сформулированной оптимизационной задачи позволило выработать практические рекомендации для построения оптимизационной бортовой информационно-измерительной системы для осуществления лидарного исследования литологии по предполагаемой трассе прокладки труб.

References

1. *Lazernaya kartografiya. Kompleksnyye aerotopograficheskie raboty po geoinformatsionnomu obespecheniyu* [Laser Mapping. Aerotopographic Comprehensive Work on Geo-Information Provision]. Available at: http://loi.sccc.ru/gis/rlz/laser_survey/laser_survey.html (accessed 12.04.2019). [in Russian].
2. Khrenov N.N. *Vyyavlenie zakonomernostei vzaimodeistviya severnykh truboprovodov s geologicheskoi sredoi po materialam aerokosmicheskikh s"emok* [Identification of Regularities of Interaction of Northern Pipelines with Geological Environment based on Aerospace Surveys]. Available at: <http://www.dissercat.com/content/vyyavlenie-zakonomernostei-vzaimodeistviya-severnykh-truboprovodov-s-geologicheskoi-sredoi-p> (accessed 12.04.2019). [in Russian].
3. Teng Xu, Bingwei Yang, Xialou Li, Junen Yao. Terrestrial Laser Scanning Intensity Correction by Piecewise Fitting and Overlap-Driven Adjustment Remote Sens 2017. Available at: www.mdpi.com/journal/remotesensing (accessed 12.04.2019).
4. Antero Kukko. *Mobile Laser Scanning - System Development, Performance and Applications*.

al Laser Scanner Intensity: Search for Correction Methods. *Remote Sens.* 2011. No. 3 (10). P. 2207-2221. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/3/10/2207/htm> (дата обращения: 12.04.2019).

6. Darrin Burton, Dallas Dunlap, Leslie Wood, Peter P. Flaig. Lidar Intensity as a Remote Sensor of Rock Properties // *Journal of Sedimentary Research*. 2011. Vol. 81. P. 339-347. URL: https://www.researchgate.net/publication/253166667_Lidar_Intensity_as_a_Remote_Sensor_of_Rock_Properties (дата обращения: 12.04.2019).

7. Pesci G.T. Effects of Surface Irregularities on Intensity Data from Laser Scanning: an Experimental Approach. URL: <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/4462> (дата обращения: 12.04.2019).

8. Relationship between Intensity and Lithology. URL: <https://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=5877&context=etd> (дата обращения: 12.04.2019).

Kirkkonommi, 2013.

5. Sanna Kaasalainen, Anttoni Jaakkola, Mikko Kaasalainen, Anssi Krooks, Antero Kukko. Analysis of Incidence Angle and Distance Effects on Terrestrial Laser Scanner Intensity: Search for Correction Methods. *Remote Sens.*, 2011, No. 3 (10), pp. 2207-2221. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/3/10/2207/htm> (accessed 12.04.2019).

6. Darrin Burton, Dallas Dunlap, Leslie Wood, Peter P. Flaig. Lidar Intensity as a Remote Sensor of Rock Properties. *Journal of Sedimentary Research*, 2011, Vol. 81, pp. 339-347. Available at: https://www.researchgate.net/publication/253166667_Lidar_Intensity_as_a_Remote_Sensor_of_Rock_Properties (accessed 12.04.2019).

7. Pesci G.T. Effects of Surface Irregularities on Intensity Data from Laser Scanning: an Experimental Approach. Available at: <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/4462> (accessed 12.04.2019).

8. Relationship between Intensity and Lithology. Available at: <https://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=5877&context=etd> (accessed 12.04.2019).

Автор

• Гусейнли Эльмир Имран оглы
Докторант Государственного института водных проблем
Азербайджанская Республика, AZ 1010, Баку,
пр. Азадлыг, 20
e-mail: elmir-huseynov_91@mail.ru

The Author

• Huseynli Elmir I.
Doctorant of State Research Institute
of Water Problems
20, Azadliq ave., Baku, Republic of Azerbaijan,
AZ 1010
e-mail: Elmir-Huseynov_91@mail.ru