

Федерация. Программный комплекс моделирования управления судном, снабженным двумя винто-рулевыми колонками (азиподами): № 2018664433: заявл. 14.12.2018: опубл. 24.12.2018 / С. В. Пашенцев, В. Ю. Егоров ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»)

10. Презентация «Руководство по маневрированию» [Электронный ресурс]: <https://www.vumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>

References

- Masik, I. P. Innovacionnye sistemy podderzhki sudovozhdeniya / I. P. Masik, D. P. Kolomic // Vodnyj transport. – 2014. – № 3(21). – S. 83-89.
- Ben', A. P. Konceptual'nye osnovy sozdaniya sistem podderzhki prinyatiya reshenij v sudovozhdenii / A. P. Ben' // Iskusstvennyj intellekt. – 2012. – № 3. – S. 222-227.
- V.G. SHerstyuk, A.P. Ben' Gibridnaya intellektual'naya SPPR dlya upravleniya sudnom. «Iskusstvennyj intellekt» 3'2008
- Kobylnski, L. (2013). Problems of Handling Ships Equipped with Azipod Propulsion Systems. Prace naukowe politechniki warszawskiej, 95, 232–245. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/PROBLEMS-OF-HANDLING-SHIPS-EQUIPPED-WITH-AZIPOD-Kobyli-Propellers/07eb3bed2d83392609caff50dda787a656f025a8>
- Golikov V. V. Metodologicheskie osnovy upravleniya sudnoms dvumya povorotnymi kolonkami azipod / V. V. Golikov // Sudovozhdenie. - 2013. - Вып. 23. - S. 56-64. - Rezhim dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sudovozhdenie_2013_23_10
- Sistemy AZIPOD: novye formy vzaimodejstviya hodovogo mostika i mashinnogo otdeleniya Elektronnyj resurs <http://www.morvesti.ru/themes/1696/88123/>
- Boran-Keshish'yan, S. L. Avtomaticheskie i avtomatizirovannye sistemy shvartovki sudov, kak ergaticheskij kompleks upravleniya sudnom i buksirnoj gruppoj / S. L. Boran-Keshish'yan // Transportnoe delo Rossii. – 2020. – № 4. – S. 122-128.
- Pashencev, S. V. Analiz manevrirovaniya sudna, snabzhennogo dvumya azipodami, s pomoshch'yu ego matematicheskoy modeli / S. V. Pashencev, V. YU. Egorov // Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2019. – T. 22. – № 4. – S. 461-470. – DOI 10.21443/1560-9278-2019-22-4-461-470
- Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2018666912 Rossijskaya Federaciya. Programmnyj kompleks modelirovaniya upravleniya sudnom, snabzhennym dvumya vinto-rulevymi kolonkami (azipodami): № 2018664433: zayavl. 14.12.2018: opubl. 24.12.2018 / S. V. Pashencev, V. YU. Egorov ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Murmanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet»(FGBOU VO «MGTU»)
- Prezentaciya «Rukovodstvo po manevrirovaniyu» Elektronnyj resurs]: <https://www.vumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>

УДК 528.7

DOI: 10.34046/aumsuomt102/10

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КАРТИРОВАНИЯ ДНА НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ БАТИМЕТРИИ

А.А. Гаджиев, аспирант (Азербайджанская Республика)

Статья посвящена вопросам разработки методики картирования дна неглубоких водоемов методом лазерной батиметрии. Сформулирована и решена задача разработки способа картирования рельефа дна неглубоководных водоемов. В качестве излучателя используется лазер, установленный на борту летательного аппарата. На основе геометрического представления хода оптических лучей в лазерной батиметрии и анализа известных результатов измерений предложена ступенчатая модель дна водоема, высота и ширина ступенек которой изменяются в широких пределах. На основе известного метода картирования дна неглубоководного водоема с одной точки предложен способ двухточечного измерения с применением ступенчатой модели дна. Проведенные модельные исследования показали, что погрешность измерения предложенного способа находится в пределах $\pm 4.5\%$.

Ключевые слова: батиметрия, лазер, картирование, погрешность, летательный аппарат.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MAPPING THE BOTTOM OF SHALLOW WATER BODIES BY THE METHOD OF LASER BATHYMETRY

A.A. Gadzhiev

The article is devoted to the development of methods for mapping the bottom of shallow water bodies by laser bathymetry. The problem of developing a method for mapping the topography of the bottom of shallow water

bodies has been formulated and solved. The emitter is a laser mounted on board the aircraft. Based on the geometric representation of the path of optical beams in laser bathymetry and the analysis of known measurement results, a stepped model of the bottom of a reservoir is proposed, the height and width of the steps of which vary over a wide range. Based on the well-known method of mapping the bottom of a shallow water body from one point, a two-point measurement method using a stepped bottom model is proposed. The conducted modeling studies have shown that the measurement error of the proposed method is within $\pm 4.5\%$.

Key words: bathymetry, laser, mapping, error, airborne apparatus.

1. Введение

В настоящее время к батиметрии неглубоководных береговых зон посвящено достаточно большое количество работ [1-10]. В работе [1] показано, что в общем балансе следует также учитывать отражение от взвешенных частиц загрязненной водной массы во всей толще воды неглубоководных зон. В работе [2] рассмотрены вопросы повышения точности батиметрических измерений при использовании спутниковых многоволновых лидаров. Вопросам совместного использования лазеров зеленой зоны (532 нм) и NIR диапазона (1064 нм) посвящена работа [3]. При этом указывается, что в то время как зеленая зона длин волн бесспорно вне конкуренции в плане проникновения вглубь водной массы, однако, в плане регистрации отраженного от поверхности воды оптического сигнала использование NIR диапазона может быть довольно полезным.

В работе [4] подтверждается все вышесказанное, т.е. идеи, изложенные в работах [1-3] в плане учета взвешенных частиц и использования NIR диапазона. В работе [5] рассмотрены возможности комбинирования методов пассивного ди-

станционного зондирования и лазерной батиметрии для более полного учета влияния неровности морского дна. В работе [6] рассмотрены вопросы детального исследования дна неглубоководных водоемов с использованием двух лазеров с разными длинами волн.

В работе [7], рассмотрены вопросы оптимального сочетания методов активного и пассивного зондирования дна неглубоководных зон.

В работе [8] сделана попытка построения точной геометрической модели распространения лазерного импульса в водной среде в практике самолетной лазерной батиметрии.

2. Вопросы выбора модели дна водоема

Одной из основных проблем в вышерассмотренных работах является вопрос о моделировании морского дна. В то время как поверхность различных водоемов моделируются различными непрерывными функциями, такими как полиномы Эрмита, В – сплайны, и т.д., моделирование отражения со дна водоема в основном ограничивается диффузной моделью, т.е. дно рассматривается в качестве Ламбертового отражателя [8]. Типичная форма профиля рельефа дна водоема показана на рис. 1 [5].

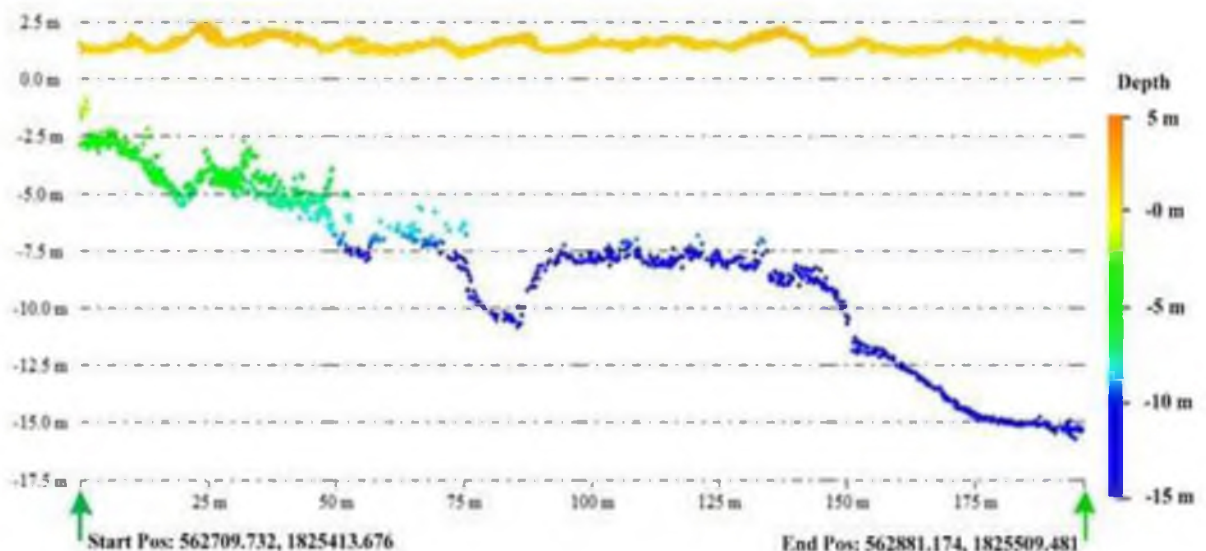


Рисунок 1 – Типичная форма профиля рельефа формы дна водоема [5]

В тоже время, как показано в работе [9], неровность водной поверхности, моделируемая микрофасетной моделью Кука – Торранса, а также, эффекты дивергенции лазерного луча и диффузного отражения как от дна, так и водной

взвеси приводит к усредненной оценке батиметрической глубины в исследуемой точке водоема (рис. 2).

При этом, сигнал формируемый на приемном телескопе лидара представляется в качестве

случайно распределенных точек, значения которых соответствуют усредненной величине глубины дна водоема (рис. 3).

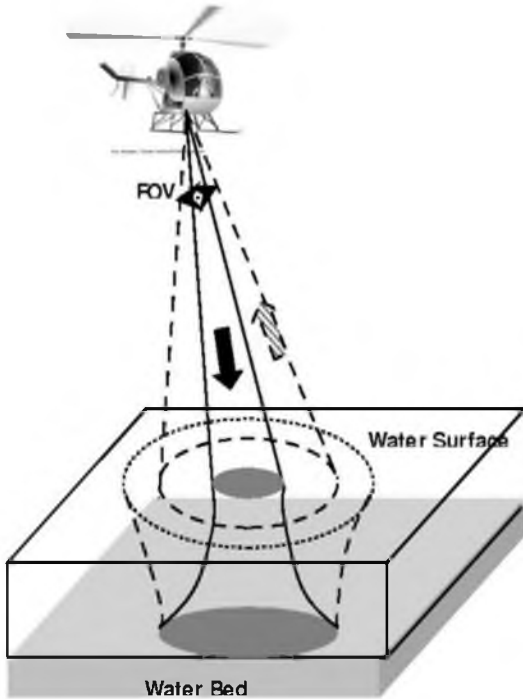


Рисунок 2 – Геометрическое представление формирования приемного оптического сигнала в дистанционной лазерной батиметрии [9]

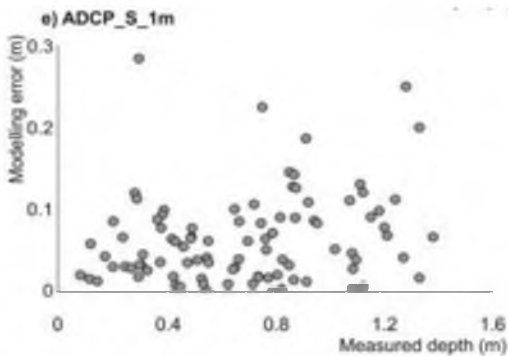


Рисунок 3 – Графическое представление соотношения измеренных глубин и погрешности батиметрических измерений [7]

Вышеизложенное позволяет использовать ступенчатую модель дна, в которой длина и высота ступенек являются непостоянными величинами (рис. 4).

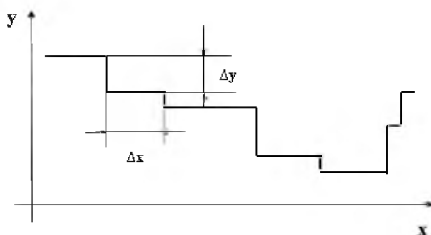


Рисунок 4 – Предлагаемая модель дна водоема:
 $\Delta y = var; \Delta x = var$

Вышеприведенные теоретические положения позволяют разработать новую методику картирования рельефа дна неглубоководных зон водоемов с помощью лазерного излучателя.

3. Предлагаемая методика

В качестве основы предлагаемого способа картирования рельефа дна неглубоководной зоны водоемов использован метод лазерного обнаружения изменения глубины водоемов, изложенный в работе [10]. В основе лежат следующие положения:

Сигнал на входе приемного телескопа лазерного излучателя определяется по формуле

$$P_R = P_T \cdot W \cdot \rho \cdot f(\theta_{11}) \cdot g(\theta_{21}) \exp(-2kD_1) \quad (1)$$

где P_R – мощность приемного сигнала; P_T – мощность излучаемого сигнала; W – постоянная оптической системы; ρ – коэффициент отражения от дна; $f(\theta_1)$ – коэффициент коррекции из – за неровности морского дна, приводящей к изменению конфигурации поперечного сечения отраженного луча; $g(\theta_2)$ – коэффициент коррекции из – за изменения надирного угла исходного лазерного луча.

Определение углов θ_1 и θ_2 приведено на рис. 5. Корректирующие коэффициенты $f(\theta_1)$ и $g(\theta_2)$ согласно [10] определяются следующим образом:

$$f(\theta_1) = -0.0123\theta_1 + 1.086 \text{ при } 0^\circ < |\theta_1| < 90^\circ \quad (2)$$

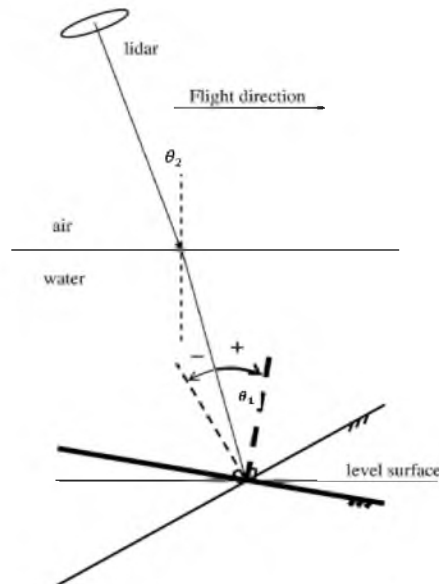


Рисунок 5 – Рисунок, поясняющий расположение углов коррекции θ_1 и θ_2 [10]

$$g(\theta_2) = \begin{cases} 0.965 \exp(0.0457\theta_2) & \text{при } -90^\circ < \theta_2 \leq 0^\circ \\ 1.002 \exp(-0.0359\theta_2) & \text{при } 0^\circ \leq \theta_2 < 90^\circ \end{cases} \quad (3)$$

С учетом базовых формул (1)–(3) метода, изложенного в [10], и выше предложенной ступенчатой модели дна водоема можно предложить следующий способ картирования рельефа неровности дна.

1. Измерения проводятся применительно к двум пространственным точкам, применительно к которым следует определить разность в глубине водоема.

2. Измерения проводятся с помощью лазерного луча неизменной мощности и при неизменных надирных углах (рис. 6), т.е. выполняется условие

$$\theta_{21} = \theta_{22} \quad (4)$$

3. С учетом принятой ступенчатой модели дна полагаем выполнения условия

$$\theta_{11} = \theta_{12} \quad (5)$$

Дадим математическое обоснование предлагаемого способа. При запуске лазерного импульса с точки 1 (рис. 6) сигнал на выходе приемного телескопа лазера определим, как

$$P_{R1} = P_{01} \cdot W \cdot \rho \cdot f(\theta_{11}) \cdot g(\theta_{21}) \exp(-2kD_1) \quad (6)$$

При запуске лазерного импульса с точки 2 на выходе телескопа лазера получим сигнал

$$P_{R2} = P_{02} \cdot W \cdot \rho \cdot f(\theta_{12}) \cdot g(\theta_{22}) \exp(-2kD_2) \quad (7)$$

Вычислим отношение P_{R1}/P_{R2} . С учетом (4) и (5), а также $P_{01} = P_{02}$, а также выражения (6) и (7) получим

$$\frac{P_{R1}}{P_{R2}} = \frac{\exp(-2kD_1)}{\exp(-2kD_2)} \quad (8)$$

Приняв

$$\Delta D = D_2 - D_1 \quad (9)$$

а также обозначив

$$\eta = \frac{P_{R1}}{P_{R2}} \quad (10)$$

Из (8)÷(10) окончательно получаем:

$$\eta = \exp(2k\Delta D) \quad (11)$$

Из (11) находим

$$\Delta D = \frac{\ln \eta}{2k} \quad (13)$$

Таким образом, выражение (13) позволяет картировать рельеф неглубоководной части водоемов с использованием метода лазерной батиметрии.

4. Модельные исследования

Для проверки верности полученной формулы (13) воспользуемся результатами, полученными при исследовании неглубоководной части водоема в двух зонах (табл. 1) [10].

Таблица 1

	Глубина (м)	2.5	3.0	3.5	4
Зона 1	Средняя величина	-	8.50	8.38	8.39
	с.к.о	-	0.42	0.22	0.24
Зона 2	Средняя величина	7.85	8.59	8.28	7.98
	с.к.о	0.43	0.18	0.12	0.13

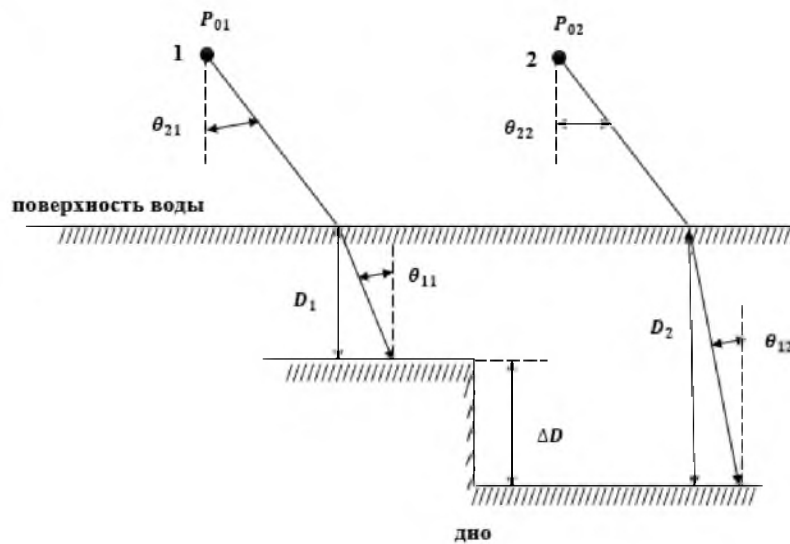


Рисунок 6 – Рисунок поясняющий предлагаемый метод картирования рельефа дна водоема

Методика проводимого контроля верности формулы (13) заключается в следующем:

Рассмотрим данные первой зоны: Рассматриваются результаты измерений на глубинах 3.0 м и 3.5 м.

Имеем

$$\eta = \frac{P_{R1}}{P_{R2}} = \frac{8.50}{8.38} \quad (14)$$

Следовательно, согласно (13) и (14) запишем

$$0.5\text{м} = \frac{\ln\left(\frac{8.50}{8.38}\right)}{2k_{11}} \quad (15)$$

Из (15) вычисляем значение k

$$k_{11} = \frac{\ln\left(\frac{8.50}{8.38}\right)}{2 \cdot 0.5} (\text{м}^{-1}) \quad (16)$$

Рассмотрим глубины 3.5 м и 4.0 м. Соответственно вышеизложенному получим

$$k_{21} = \frac{\ln\left(\frac{8.38}{8.39}\right)}{2 \cdot 0.5} (M^{-1}) \quad (17)$$

Рассмотрим данные второй зоны. Рассматриваются результаты измерений на глубинах 3.0 м и 3.5 м.

Имеем

$$\eta = \frac{8.59}{8.28} \quad (18)$$

По аналогии с (15) получим

$$0.5 = \frac{\ln\left(\frac{8.59}{8.28}\right)}{2k_{12}} \quad (19)$$

Из (19) получим

$$k_{12} = \frac{\ln\left(\frac{8.59}{8.28}\right)}{2 \cdot 0.5} (M^{-1}) \quad (20)$$

Рассмотрим глубины 3.5 м и 4.0 м. Соответственно (20) получим

$$k_{22} = \frac{\ln\left(\frac{8.28}{7.98}\right)}{2 \cdot 0.5} (M^{-1}) \quad (21)$$

Как показали проведенные вычисления коэффициентов k_{11} , k_{21} , k_{12} и k_{22} разница в вычисленных их значениях не превышало $\pm 465\%$. Следовательно, можно заключить, что погрешность предлагаемого способа картирования глубины рельефа дна не будет превышать $\pm 4,5\%$.

5. Заключение

Сформирована и решена задача разработки способа картирования рельефа дна неглубоководных водоемов с помощью лазерного излучателя, установленного на борту летательного аппарата. На основе геометрического представления хода оптических лучей в лазерной батиметрии и анализа известных результатов измерений предложена ступенчатая модель дна водоема, где высота и ширина ступенек изменяются в широких пределах. На основе известного метода картирования дна неглубоководного водоема с одной точки предложен способ двухточечного измерения с применением ступенчатой модели дна. Проведенные модельные исследования показали, что погрешность измерения предложенного способа находится в пределах $\pm 4,5\%$.

УДК 551.463

DOI: 10.34046/aumsuomt102/11

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ ОБНАРУЖИВАЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ НА МАЛОЙ ГЛУБИНЕ ВОДОЕМОВ

А.А. Гаджиев, аспирант (Азербайджанская Республика)

Р.А. Эминов, доцент, (Азербайджанская Республика)

Х.Г. Асадов, доктор технических наук, профессор (Азербайджанская Республика)

Сформулирована и решена задача незаметного для лазерного батиметрического обнаружителя размещения объектов на дне водоемов малой глубины. Предполагается что батиметрический обнаружитель установлен на летательном аппарате. Рассматривается среднеинтегральная модель батиметрического

Литература

1. Long B. F., Aucoin F., Montreuil S., Robitaille V., Xharde R. Airborne LIDAR bathymetry applied to coastal hydrodynamic processes.
2. Lee Z., Shanguan M., Garcia R. A., Lai W., Lu X., Wang J., Yan X. Confidence measure of the shallow – water bathymetry map obtained through the fusion of lidar and multiband image data// Journal of Remote Sensing. 2021. ID 9841804. Pp. 16. <https://doi.org/10.34133/2021/9841804>.
3. Mandlbürger G., Pfennigbauer M., Pfeifer N. Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry – a case study at the river Pielach// Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013. Vol. II-5/W2. ISPRS Workshop Laser Scanning 2013 11-13 November, Antalya, Turkey.
4. Zhao J., Zhao X., Zhang H., Zhou F. Shallow water measurements using a single green laser corrected by building a near water surface penetration model// Remote Sensing.
5. Zhang Z., Zhang J., Ma Y., Tian H., Jiang T. Retrieval of Nearshore bathymetry around Ganquan Island from LIDAR waveform and quickbird image// Applied Science.
6. Zdravcheva N., Todorov P. Airborne laser (LIDAR) bathymetry for precision capture and survey of river beds and belonging territories.
7. Kasvi E., Salmela J., Lotsari E., Kumpula T., Lane S. N. Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers//Geomorphology. 2019. Vol. 333. Pp. 180-197. www.elsevier.com/locate/geomorph.
8. Richter K., Mader D., Westfeld P., Maas H-G. Refined geometric modeling of laser pulse propagation in airborne LIDAR bathymetry// PFG. 2021. Vol. 89. Pp. 121-137. <https://doi.org/10.1007/s41064-021-00146-z>.
9. Allouis T., Bailly J. S., Feurer D. Assessing water surface effects on LIDAR bathymetric measurements in very shallow rivers: a theoretical study.
10. Wang C. K., Philpot W. D. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters// Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 106. Pp. 123-135.