

УДК 551.46.08

© В. А. Глухов^{1,2}, Ю. А. Гольдин¹, М. А. Родионов¹, Б. А. Гуреев¹, О. В. Глитко¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург
vl.glukhov@inbox.ru

АВИАЦИОННАЯ ЛИДАРНАЯ БАТИМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЁМКА ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ С БОЛЬШОЙ ВЫСОТЫ

Статья поступила в редакцию 29.08.2019, после доработки 27.10.2019

Выполнена авиационная лидарная батиметрическая съёмка акватории Бечевинской бухты, отличающейся сложными условиями полета (узкая бухта окружена высокими сопками). Высота полёта самолета при проведении съёмки менялась в диапазоне 500—1200 м. Съёмка выполнялась с использованием Авиационного Поляризационного Лидара АПЛ-3 (энергия зондирующего импульса 40 мДж, длительность зондирующего импульса 7 нс, диаметр приемной оптической системы 100 мм). Максимальная глубина зондирования дна с высоты 500 м составила 21.5 м, с высоты 1200 м — 17.5 м. Выполнены оценки энергии зондирующего импульса, требуемой для локации дна с разных высот. Для локации дна до глубины 25 м с безопасной для полетов над всей акваторией бухты высоты 2500 м необходимо увеличить энергию зондирующего импульса более чем в 20 раз. Увеличение высоты съёмки с 200 до 2500 м в данных условиях для регистрации эхо-сигнала от дна при глубине 25 м требует увеличения энергии зондирующего импульса почти в 150 раз.

Ключевые слова: лидар, батиметрическая съёмка, энергия зондирующего импульса, высота полёта.

Glukhov V. A.^{1,2}, *Goldin Yu. A.*¹, *Rodionov M. A.*¹, *Gureev B. A.*¹, *Glitko O. V.*¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

AIRBORNE LIDAR BATHYMETRY OF COASTAL AREAS AT NIGHT FLIGHT ALTITUDE

Received 29.08.2019, in final form 27.10.2019

Airborne lidar bathymetry survey of Bechevinsky Bay is distinguished by difficult flight conditions (the narrow bay is surrounded by high hills). The flight altitude of the aircraft during survey varied within the range of 500 to 1200 m. The survey was performed using the Airborne Polarization Lidar APL-3 (probe pulse energy is 40 mJ, duration of probe pulse 7 ns, diameter of the receiving optical system is 100 mm). The maximum depth of sounding of the bottom from altitude of 500 m was 21.5 m, from altitude of 1200 m — 17.5 m. The energy of the probe pulse required to obtain bottom return from different altitudes is estimated. It is necessary to increase the pulse energy by 20 times to locate the bottom of 25 m depth from a safe for flying altitude of 2500 m. An increase of survey flight altitude from 200 m to 2500 m under these conditions for obtain bottom return at a depth of 25 m requires a 150-fold increase of the pulse energy.

Key words: Airborne lidar bathymetry, probe pulse energy, flight altitude.

1. Введение

В настоящее время радиометрические лидары активно применяются для съёмки рельефа дна прибрежных морских акваторий и внутренних водоемов [1—4]. Такие лидары производят зондирование дна через толщу воды коротким лазерным импульсом сине-зеленого диапазона спектра, а приемная система регистрирует временную зависимость интенсивности эхо-сигнала на несмещенной частоте. Регистрируемый эхо-сигнал формируется процессами упругого рассеяния и поглощения света морской водой, а также отражением от находящихся в толще воды объектов и дна. Батиметрические

Ссылка для цитирования: Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А., Гуреев Б.А., Глитко О.В. Авиационная лидарная батиметрическая съёмка прибрежных акваторий с большой высоты // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 85—93.

For citation: *Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Rodionov M.A., Gureev B.A., Glitko O.V.* Airborne lidar bathymetry of coastal areas at night flight altitude. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 4, 85—93.

DOI: 10.7868/S2073667319040105

лидары могут быть размещены как на судне, так и на авианосителе — самолете, вертолете или беспилотном летательном аппарате [5]. К достоинствам авиационной лидарной батиметрии относятся высокая производительность, оперативность, возможность проведения съёмки на акваториях со сложными условиями судоходства. Максимальные глубины лидарного зондирования дна определяются в основном оптическими характеристиками воды и меняются в диапазоне ~70 м [6, 7] в прозрачных водах до единиц метров и менее в мутных.

Известен целый ряд зарубежных лидарных батиметрических систем, например, SHOALS [8], RIEGL VQ-880-G [9], CZMIL-Nova [6, 10], Leica Chiroptera 4X [7]. Наряду с регулярной авиационной батиметрической съёмкой, выполняемой для решения практических задач, проводятся исследования, направленные на расширение возможностей лазерной батиметрии. Разрабатываются методы определения по форме отраженного от дна эхо-сигнала типа дна (песчаное, каменистое, покрытое водорослями) [11—13]. Проводятся исследования по развитию лазерной батиметрии мелководных районов, возможность измерения глубины которых затруднена многократным переотражением зондирующего импульса между дном и поверхностью [14]. Предложен оригинальный метод точного определения малых глубин (порядка единиц и первых десятков сантиметров) [15]. Интерес представляет исследование возможностей лазерной батиметрии в зависимости от высоты размещения лидара над поверхностью воды. Обычно авиационная лидарная батиметрическая съёмка выполняется при высотах полета авианосителя 200—400 м. На этих высотах обеспечиваются безопасность полета авианосителя, достаточно уверенный приём отраженного от дна эхо-сигнала, незначительное в большинстве случаев влияние атмосферного участка трассы зондирования и достаточно широкая полоса съёмки при сканировании. Иногда, например, при совмещении топографической съёмки прибрежных участков суши и батиметрической съёмки мелководных участков прибрежной акватории, выполняющихся с целью определения точного положения береговой линии, высоту полета авианосителя увеличивают до 500—600 м [1, 2, 16]. Однако в ряде случаев проведение авиационной съёмки на указанных высотах не представляется возможным, например, в Бечевинской бухте Авачинского залива полуострова Камчатка. Бухта со всех сторон окружена горами с высотами около одного километра. При этом ширина бухты не превышает двух километров. Поэтому для обеспечения безопасности полеты над всей акваторией бухты должны выполняться на высотах более 2500 м, при этом полеты над входом в бухту могут быть выполнены на меньших высотах.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований возможности батиметрической съёмки бухты при высотах полета самолета более 500 м и оценивается максимально возможная высота полета самолета, при которой может быть обеспечена регистрация отраженного от дна эхо-сигнала при заданной энергетике.

2. Аппаратура и методы исследований

Исследования выполнялись с использованием авиационного поляризационного лидара АПЛ-3 (совместная разработка Лаборатории оптики океана и атмосферы Санкт-Петербургского филиала ИО РАН и Лаборатории оптики океана ИО РАН). Лидар предназначен для зондирования толщи морской воды с целью дистанционной регистрации пространственных распределений гидрооптических характеристик.

Лидар состоит из оптического блока, блока накачки, блока охлаждения, блока управления и синхронизации и блока регистрации и визуализации. Источником зондирующих импульсов в АПЛ-3 служит твердотельный лазер с ламповой накачкой на АИГ:Nd с модуляцией добротности и преобразованием частоты излучения во вторую гармонику (длина волны излучения $\lambda = 532$ нм энергия зондирующего импульса 45 мДж, длительность зондирующего импульса по полувысоте 7 нс, исходная расходимость 5 мрад, частота повторения импульсов генерации от 1 до 30 Гц). Зондирующее лазерное излучение линейно поляризовано. Фотоприёмное устройство (ФПУ) включает в себя два идентичных по конструкции фотоприёмника, предназначенных для регистрации двух компонент эхо-сигнала с взаимно ортогональными поляризациями (совпадающей с исходной и ортогональной ей). В качестве приемной оптической системы в каждом канале использован длиннофокусный зеркальный объектив SAMYANG DX ($F = 800$ мм, диаметр входной линзы 100 мм). Поляризацион-

ная селекция осуществляется с помощью соответствующим образом ориентированных пленочных поляроидов, установленных на входе приёмных оптических систем. В качестве первичных фотоэлектронных преобразователей в ФПУ применены специально отобранные фотоэлектронные умножители типа ФЭУ-115М с малым последствием. На входе каждого фотоприёмника установлен интерференционный светофильтр с максимумом пропускания на длине волны $\lambda = 532$ нм и шириной полосы пропускания 10 нм, отсекающий фоновое излучение. Угол раскрытия приемных диаграмм оптических систем обоих каналов равен 1° . Для защиты ФПУ и последующих блоков приемного тракта от перегрузок, обусловленных постоянной фоновой засветкой, используется режим временного стробирования чувствительности ФЭУ. При работе в этом режиме ФЭУ «нормально» заперты и открываются только на время прихода эхо-сигналов от толщи воды. Длительность открывающего строба 30 мкс.

Аналоговые сигналы с ФПУ поступают на четырехканальный широкополосный цифровой осциллограф LeCroy Teledine HDO 4034. Оцифрованные сигналы передаются на ПК. Осциллограф позволяет записывать сигналы с частотой дискретизации 2.5 Гвыб/с при частоте следования эхо-сигналов до 30 Гц с динамическим диапазоном 14 бит. Для каждого эхо-сигнала формируется отдельный текстовый файл с точным указанием времени регистрации.

Позиционирование осуществляется с помощью навигационного модуля, регистрирующего пространственное положение самолета по данным спутниковых навигационных систем GPS, ГЛОНАСС и Galileo с точностью не хуже 3 м по горизонтали и не хуже 5 м по высоте полета. На основе данных о высоте полета самолета и угле зондирования рассчитывается положение импульса синхронизации, подающегося для запуска системы регистрации и оцифровки.

Поляризационный метод обеспечивает при зондировании светорассеивающих слоев и локации дна ряд преимуществ [3, 17]. В связи с этим в данной работе при анализе экспериментов по локации морского дна рассматриваются, в основном, данные регистрации кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала.

Лидарная съемка производилась с борта самолета-лаборатории Ил-18Д.

3. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились в районе Бечевинской бухты. В ходе батиметрической съёмки было выполнено 4 галса самолета с высотой полета 500, 700, 900 и 1200 м. Пространственное положение галсов показано на рис. 1. Сложность полетов определяется окружающими бухту высокими горами. Условия безопасности полетов позволили выполнить измерения только на входе и в средней части бухты. Для галсов с высотой полета 900 м и 1200 м зондирование проводилось с частотой 20 Гц, что обеспечило пространственное разрешение вдоль трассы полета (расстояние между точками зондирования) ~ 4.4 м. Для галсов, выполненных на высоте 500 м и 700 м, зондирование проводилось с частотой 30 Гц, что соответствует пространственному разрешению ~ 2.9 м. Расстояние между галсами лидарной съёмки составляло 150—200 м. Погрешность определения глубины дна определяется длительностью фронта импульсной функции лидара и составляет величину не более 0.2 м.

При высоте полета 1200 м максимальная зарегистрированная глубина составила 17.5 м, а при высоте полета 500 м — 21.5 м. На рис. 2 представлены примеры эхо-сигналов, полученные с высот 500 и 1200 м для одной и той же зарегистрированной глубины дна $Z_b = 17.5$ м. Данные эхо-сигналы получены в близких по положению точках. Величина эхо-сигнала характеризуется напряжением U на пятидесятиомной нагрузке приемного ФЭУ.

По данным выполненной лидарной батиметрической съёмки построено трехмерное изображение рельефа дна Бечевинской бухты (рис. 3).

Полученные экспериментальные данные позволяют выполнить оценки зависимости величины отраженного от дна эхо-сигнала U_b от высоты лидара над поверхностью воды H , а также максимально возможных для батиметрической съёмки в данных условиях высот полета. Экспериментальные значения U_b , зарегистрированные при глубинах дна 10 и 15 м с разных высот, представлены на рис. 4.

Сплошными линиями на рисунке показаны графики аппроксимирующей функции $U_b(H)$, вид которой следует из лидарного уравнения [3]. Величина U_b прямо пропорциональна мощности эхо-сигналов P_b .

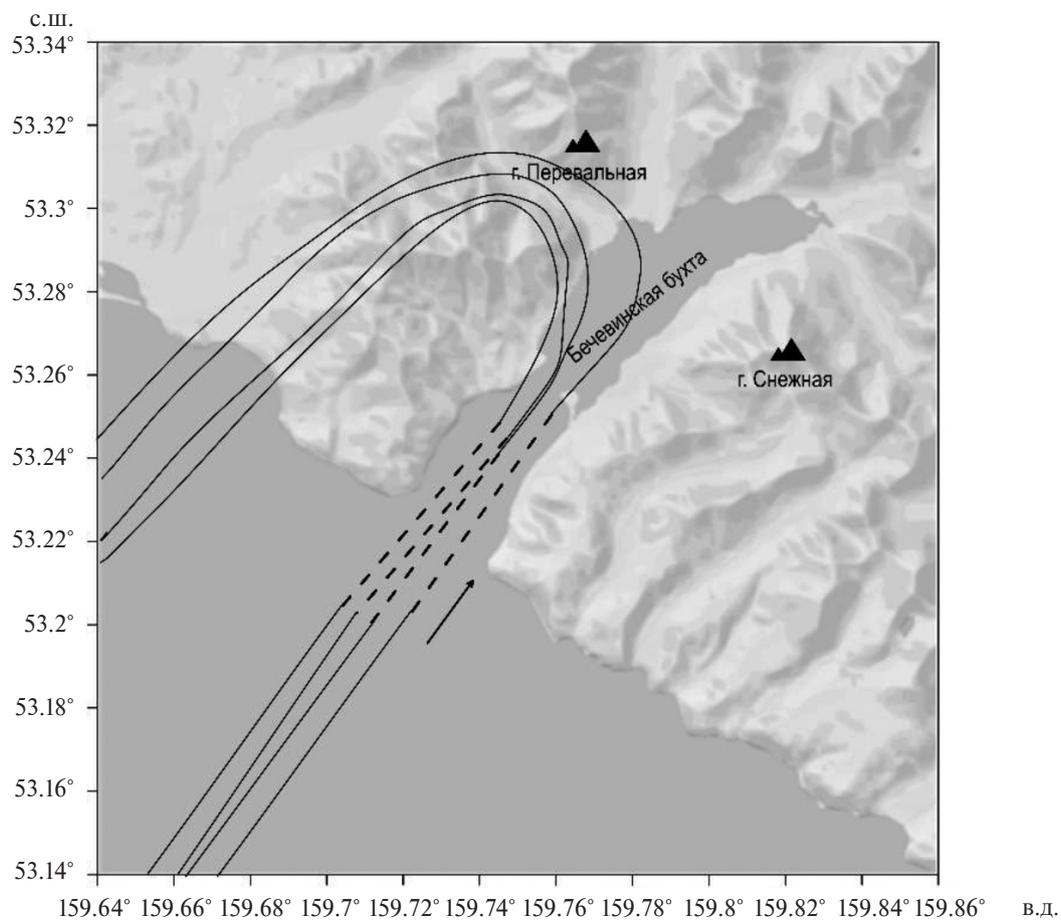


Рис. 1. Схема полетов над акваторией Бечеви́нской бухты. Пунктиром показаны участки, на которых производилось лидарное зондирование. Стрелкой показано направления полета на галсах.

Fig. 1. Flight chart over Bechevinsky Bay. Dotted lines show the areas of ALB sounding. The arrow shows the direction of flight.

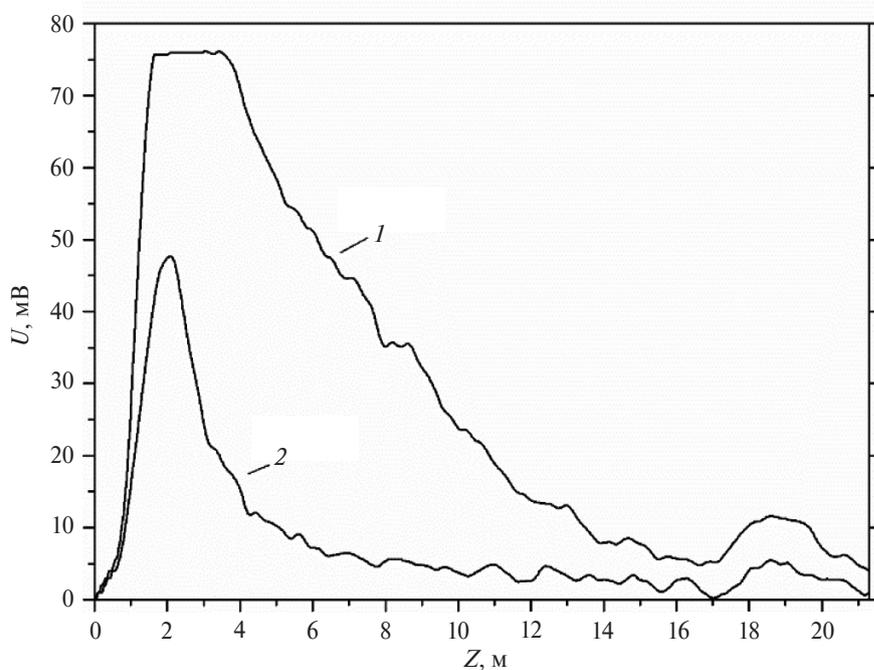


Рис. 2. Лидарные эхо-сигналы, соответствующие глубине дна 17.5 м для высоты полета 1200 м (1) и 500 м (2).

Fig. 2. Lidar echo signals corresponding to a bottom depth of 17.5 m for a flight altitude of 1200 m (1) and 500 m (2).

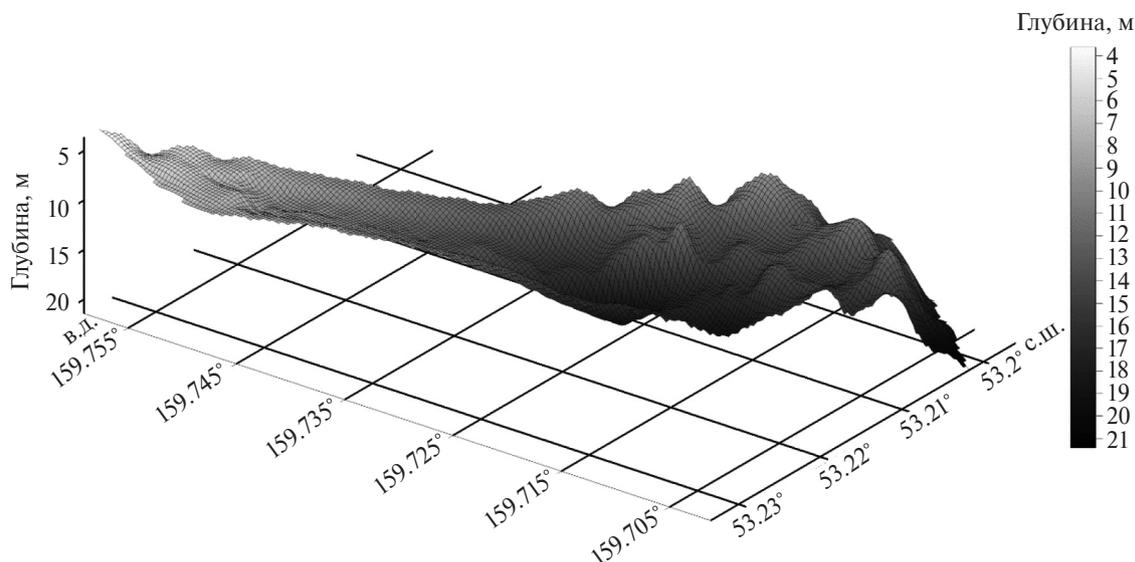


Рис. 3. Трехмерное изображение рельефа дна Бечевинской бухты, построенное по данным лидарной батиметрической съемки с самолета.

Fig. 3. 3D-image of the bottom of Bechevinsky Bay made with ALB data.

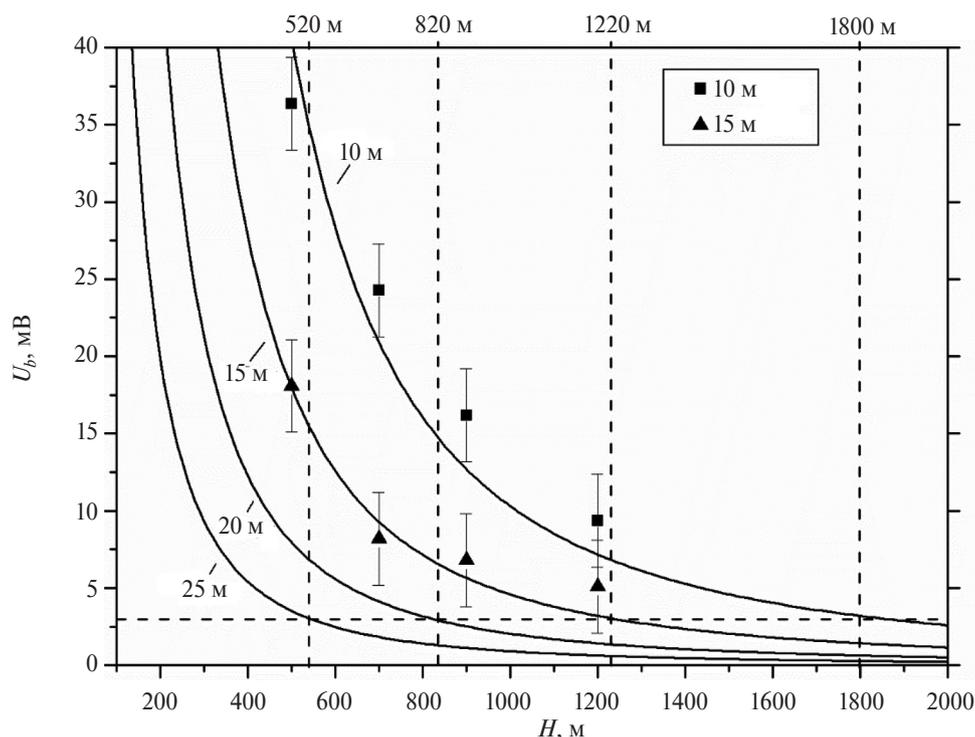


Рис. 4. Зависимость величины отраженного от дна эхо-сигнала $U_b(H)$ при разных глубинах дна.

Fig. 4. Dependence of $U_b(H)$ at different bottom depths.

$$U_b(H) = a \cdot \frac{\exp(-b \cdot c_w t)}{\left(H + \frac{c_w t}{2n}\right)^2}, \quad (1)$$

где a , b – параметры аппроксимации, c_w – скорость света в воде, t – время, отсчитываемое от момента пересечения зондирующим импульсом поверхности воды, n – показатель преломления морской воды. Физический смысл параметров аппроксимации следует из лидарного уравнения. Коэффициент a не

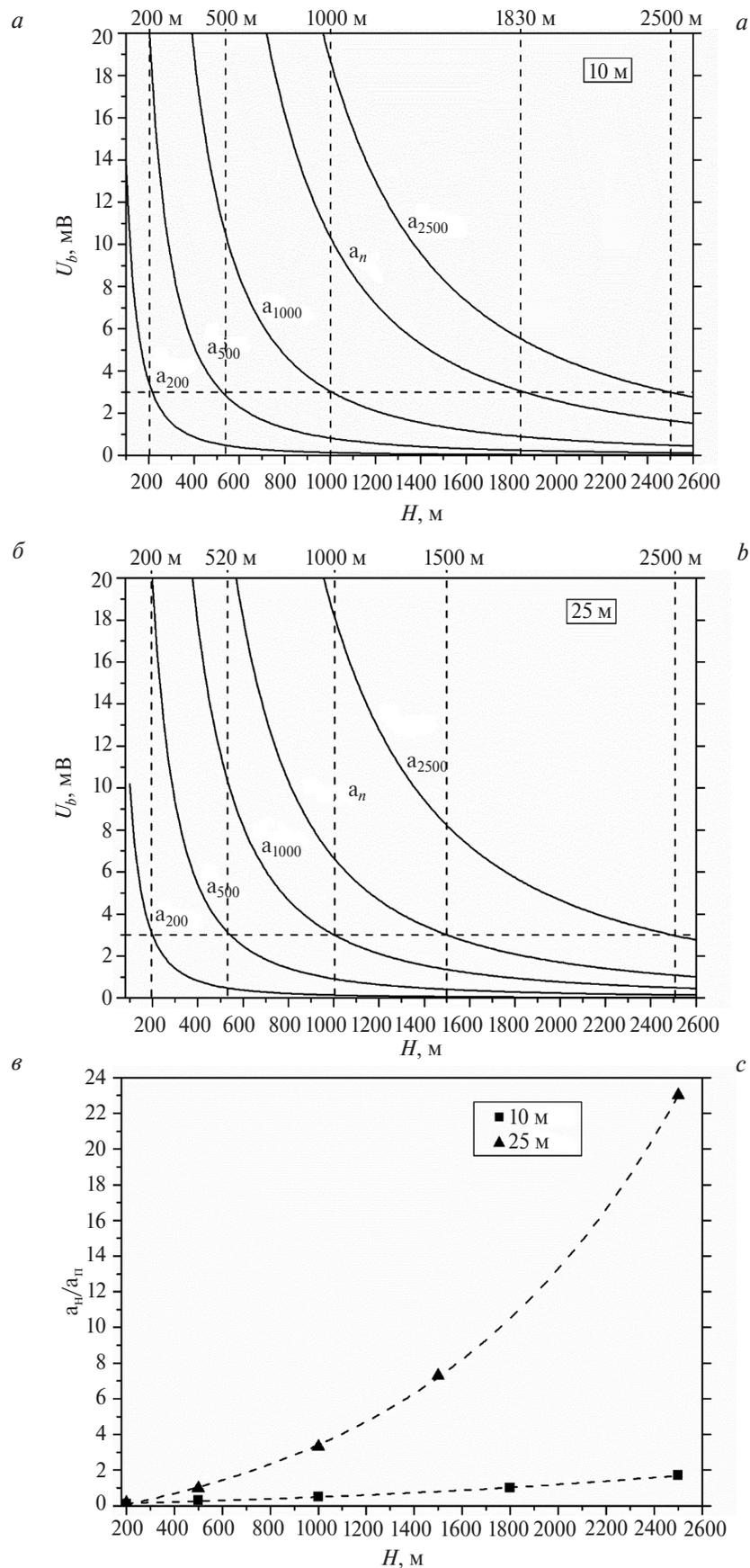


Рис. 5. Зависимости $U_b(H)$ при различных значениях параметра a для $Z_b = 10$ м (а), $Z_b = 25$ м (б) и зависимости отношения a_H/a_n от высоты расположения лидара для указанных глубин (в).

Fig. 5. Dependences of $U_b(H)$ at various values of the parameter a for $Z_b = 10$ m (a), $Z_b = 25$ m (b) and the dependence of the ratio a_H/a_n on the flight altitude for the indicated depths (c).

зависит от времени и определяется характеристиками лидара, в частности линейно зависит от энергии зондирующего импульса W , площади приемной оптики S , коэффициента пропускания приемной оптики T . Также коэффициент a зависит от коэффициента отражения дна R_b и коэффициента пропускания водной поверхности $(1-R)^2$, где R – коэффициент отражения поверхности [3]. Варьируя указанные характеристики аппаратуры, можно изменять величину параметра a . Параметр b – показатель ослабления лидарного сигнала, равный $a_w + 2b_b$, где a_w – показатель поглощения морской воды, b_b – показатель обратного рассеяния [18]. Параметры аппроксимации определены методом наименьших квадратов для экспериментальных значений U_b , зарегистрированных при $Z_b = 10$ м и $Z_b = 15$ м и разных высот полета. Использование данной аппроксимации экспериментальных данных предполагает, что коэффициент отражения дна и показатель ослабления света морской водой во всех точках зондирования одинаковы. Допустимость этого предположения основана на близости положения точек зондирования для соответствующих глубин дна для всех высот полета. Все последующие оценки для глубин больше 15 м выполнены для оптических характеристик морской воды, определяющих значение параметра b , соответствующих месту бухты с глубиной 15 м. Пунктирная горизонтальная прямая показывает пороговый уровень регистрируемого сигнала, определяемый шумами регистрирующей системы лидара АПЛ-3. Пунктирные вертикальные прямые отмечают максимально возможную высоту полета H_m , при которой эхо-сигнал от дна на соответствующей глубине Z_b может быть зарегистрирован. Как следует из рис. 4, максимальная высота зондирования H_m сильно зависит от глубины дна Z_b . Для $Z_b = 10$ м максимальная возможная высота полета составляет $H_m \approx 1800$ м. При увеличении Z_b до 25 м максимально возможная высота полета уменьшается до ~ 520 м.

Приведенные выше оценки справедливы для энергетических характеристик АПЛ-3. Значения максимально возможной высоты съемки можно менять варьируя характеристики лидара, определяющие величину параметра a . Его величина линейно зависит от энергии зондирующего импульса W при фиксированной длительности зондирующего импульса и площади приемной оптики. Аналогичного эффекта можно достичь, меняя площадь приемной оптики или пропускание оптического канала. Далее в тексте под изменением энергии подразумевается изменение одного из этих параметров лидара.

На рис. 5 показаны графики зависимости величины эхо-сигнала от дна U_b от высоты расположения лидара при различных значениях параметра a для $Z_b = 10$ м (*а*) и $Z_b = 25$ м (*б*). Индексы у параметра a_H указывают, с какой высоты при данном значении параметра возможна регистрация эхо-сигнала от дна. Параметр a_n соответствует энергетическим характеристикам лидара АПЛ-3. На рис. 5, *в* представлены графики зависимости отношения a_H/a_n от высоты расположения лидара. Выполненные оценки показывают, что для регистрации эхо-сигнала от дна при глубине 10 м с высоты 2500 м энергию зондирующего импульса необходимо увеличить в 1.7 раз.

Для $Z_b = 25$ м необходимое увеличение W составляет 23 раза. В то же время при снижении высоты съемки до 200 м W может быть уменьшена по сравнению с энергией зондирующего импульса АПЛ-3 в 86 раз для 10 м и в 6 раз для 25 м. Увеличение высоты с 200 до 2500 м требует для регистрации эхо-сигнала от дна при глубине 25 м увеличения W примерно в 150 раз.

Следует отметить, что приведенные оценки носят приближенный характер. Для точных расчетов необходим анализ шумов регистрирующей системы лидара.

4. Заключение

Необходимость авиационной лидарной батиметрической съемки с большой высоты возникает из-за сложных условий полета на малых высотах над акваторией съемки, при удаленности исследуемых акваторий от мест базирования малых маневренных авианосителей, а также при совмещении батиметрической съемки с выполнением других работ, требующих достаточно большой высоты полета. Выполненная батиметрическая съемка Бечевинской бухты Авачинского залива продемонстрировала возможность увеличения высоты полета при съемке до 1200 м. Проведение батиметрической съемки до глубин ~ 25 м с безопасной для всей акватории бухты высоты полета 2500 м требует более чем двадцатикратного увеличения энергии зондирующего импульса по сравнению с имеющейся у лидара АПЛ-3. Оценки показывают сильную зависимость требуемой для батиметрической съемки энергии зондирующего импульса от высоты полета. Минимальная высота для проведения батиметрической съемки составляет 200 м. Высота, безопасная для полетов над всей акваторией Бечевинской бухты, – не менее 2500 м. При повышении высоты полета с 200 до 2500 м величина требуемой энергии

зондирующего импульса при зондировании до глубин 25 м увеличивается почти в 150 раз. Выполненные в работе энергетические оценки носят приближенный характер и справедливы для длительности зондирующего импульса 5—7 нс. При продолжении исследований необходимо провести оценки для различных оптических характеристик морской воды.

Авторы выражают благодарность летному экипажу ЛЛ Ил-18Д НПП «Мир» в составе: Иванишко С.Э., Виноградову В.В., Лыткину Б.В. и Черному В.Ф. за проведение сложных полетов в Бечевинской бухте и Сбитному М.Л. за организацию полетов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме № 0149-2019-0015.

Литература

1. Kutalmis Saylam, John R. Hupp, Aaron R. Averett, William F. Gutelius & Brent W. Gelhar Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples // *International Journal of Remote Sensing*. 2018. 39:8. P. 2518—2542. DOI: 10.1080/01431161.2018.1430916
2. Chust G., Grande M., Galparsoro I., Uriarte A., Borja Á. Capabilities of the bathymetric hawk eye LiDAR for coastal habitat mapping: a case study within a Basque estuary // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2010. 89. P. 200—213.
3. Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A., Hoge F.E., Swift R.N., Wright C.W. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. P. 4353—4364.
4. Costa B.M., Battista T.A., Pittman S.J. Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SONAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems // *Remote Sensing of Environment*. 2009. 113. P. 1082—1100.
5. Gisler A., Thayer J.P., Nderson C., Crowley G. The First UAV-Borne Scanning Topographic and Bathymetric Lidar System for Mapping Coastal Regions // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2018*, abstract #EP52D-33.
6. CZMIL Airborne Bathymetric Lidar Summary Specification Sheet URL: <http://www.gstdubai.com/downloads/CZMIL-Specsheet-140814-WEB.pdf> (дата обращения: 12.05.2019).
7. Leica Chiroptera 4X Bathymetric & Topographic LiDAR. URL: <https://leica-geosystems.com/en-gb/products/airborne-systems/bathymetric-lidar-sensors/leica-chiroptera> (дата обращения: 12.05.2019).
8. Irish J.L., McClung J.K., Lillycrop W.J. Airborne Lidar Bathymetry: The SHOALS System // *US Army Engineer District - Mobile. Mobile, United States*, 2016.
9. RIEGL VQ-880-G Specification Sheet URL: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Infosheet_VQ-880-G_2016-05-23.pdf (дата обращения: 12.05.2019).
10. Kim M. et al. Modeling of airborne bathymetric lidar waveforms // *Journal of Coastal Research*. 2016. T. 76, SI. P. 18—30.
11. Firat Erena, Shachak Pe'erib, Yuri Rzhanov, Larry Ward. Bottom characterization by using airborne lidar bathymetry (ALB) waveform features obtained from bottom return residual analysis // *Remote Sensing of Environment*. 2018. 206. P. 260—274.
12. Collin A., Archambault P., Long B. Mapping the shallow water seabed habitat with the SHOALS // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008. 46. P. 2947—2955.
13. Tulldahl H.M., Wikström S.A. Classification of aquatic macrovegetation and substrates with airborne lidar // *Remote Sens. Environ.* 2012. 121. P. 347—357.
14. Pe'eri S., Philpot W. Increasing the existence of very shallow-water LIDAR measurements using the red-channel waveforms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007. 45. P. 1217—1223.
15. Dolin L.S. Optical Bathymetry Based on Halo effect // *Proceeding of IX All Russia Conference Current problems in optics of natural waters ONW'2017*, Saint-Petersburg, 2017. P. 102—107.
16. Gao Jay. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations // *Progress in Physical Geography*. 2009. 33(1). P. 103—116.
17. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 41—48.
18. Долина И.С., Долин Л.С. Моделирование лидарных изображений нелинейных внутренних волн в мелком море // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 1. С. 31—36.

References

1. Kutalmis Saylam, John R. Hupp, Aaron R. Averett, William F. Gutelius & Brent W. Gelhar Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples. *International Journal of Remote Sensing*. 2018, 39:8, 2518—2542. DOI: 10.1080/01431161.2018.1430916
2. Chust G., Grande M., Galparsoro I., Uriarte A., Borja Á. Capabilities of the bathymetric hawk eye LiDAR for coastal habitat mapping: a case study within a Basque estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2010, 89, 200—213.

3. Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A., Hoge F.E., Swift R.N., Wright C.W. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean. *Appl. Opt.* 2001, 40, 4353—4364.
4. Costa B.M., Battista T.A., Pittman S.J. Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 2009, 113, 1082—1100.
5. Gisler A., Thayer J.P., Nderson C., Crowley G. The First UAV-Borne Scanning Topographic and Bathymetric Lidar System for Mapping Coastal Regions. *American Geophysical Union*, Fall Meeting 2018, abstract #EP52D-33.
6. CZMIL Airborne Bathymetric Lidar Summary Specification Sheet URL: <http://www.gstdubai.com/downloads/CZMIL-Specsheet-140814-WEB.pdf> (date of access: 12.05.2019).
7. Leica Chiroptera 4X Bathymetric & Topographic LiDAR. URL: <https://leica-geosystems.com/en-gb/products/airborne-systems/bathymetric-lidar-sensors/leica-chiroptera> (date of access: 12.05.2019).
8. Irish J.L., McClung J.K., Lillycrop W.J. Airborne Lidar Bathymetry: The SHOALS System. *US Army Engineer District - Mobile. Mobile, United States*, 2016.
9. RIEGL VQ-880-G Specification Sheet URL: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Infosheet_VQ-880-G_2016-05-23.pdf (date of access: 12.05.2019).
10. Kim M. et al. Modeling of airborne bathymetric lidar waveforms. *Journal of Coastal Research*. 2016, 76, SI, 18—30.
11. Firat Erena, Shachak Pe'erib, Yuri Rzhanov, Larry Ward. Bottom characterization by using airborne lidar bathymetry (ALB) waveform features obtained from bottom return residual analysis. *Remote Sensing of Environment*. 2018, 206, 260—274.
12. Collin A., Archambault P., Long B. Mapping the shallow water seabed habitat with the SHOALS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008, 46, 2947—2955.
13. Tulldahl H.M., Wikström S.A. Classification of aquatic macrovegetation and substrates with airborne lidar. *Remote Sens. Environ.* 2012, 121, 347—357.
14. Pe'eri S., Philpot W. Increasing the existence of very shallow-water LIDAR measurements using the red-channel waveforms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007, 45, 1217—1223.
15. Dolin L.S. Optical Bathymetry Based on Halo effect. *Proceeding of IX All Russia Conference Current problems in optics of natural waters ONW'2017*. Saint-Petersburg, 2017, 102—107.
16. Gao Jay. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*. 2009, 33(1), 103—116.
17. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Rodionov M.A. Experimental estimation of the capabilities of the lidar PLD-1 for the registration of various hydro-optical irregularities of the sea water column. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 2, 41—48.
18. Dolina I.S., Dolin L.S. Simulation of lidar images of nonlinear internal waves in the shallow sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 1, 31—36.