

УДК 551.462

ПОДВОДНАЯ МОРФОСТРУКТУРА ВАЛААМСКОГО АРХИПЕЛАГА В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ: ПЕРВЫЕ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ

© 2022 г. М. А. Науменко^{1,*}, В. В. Гузиватый¹, Д. С. Дудакова¹, М. О. Дудаков¹, В. М. Анохин¹

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 16.06.2022 г.

Поступило 17.06.2022 г.

После доработки 21.07.2022 г.

Принято к публикации 22.07.2022 г.

На основе впервые созданной цифровой модели Валаамского архипелага (Ладожское озеро) с пространственным разрешением 25×25 м проведена количественная оценка пространственного распределения глубин и уклонов дна. Построены гипсографическая и объемная кривые, а также гистограммы и пространственные корреляционные функции, свидетельствующие о том, что статистически значимые связи между морфометрическими параметрами существуют на расстояниях не более 1.5 км для глубин и не более 260 м для уклонов дна. Видеофотосъемка самого крутого склона о. Валаам выявила его морфометрические особенности и структуру пород, слагающих склон с признаками сейсмической активности территории.

Ключевые слова: морфоструктура дна озера, статистика глубин и уклонов, фотографии подводного склона, Валаамский архипелаг, Ладожское озеро

DOI: 10.31857/S268673972260117X

Батиметрические градиенты играют фундаментальную роль в переносе энергии через подводный озерный ландшафт. Формы подводного рельефа, параметры его пространственной изменчивости, определяемые различным происхождением и развитием, оказывают значимое влияние на неоднородность седиментационных процессов и их трансформацию в озерных бассейнах. Постоянные и периодические придонные течения во многом определяются пространственными морфоструктурными особенностями распределения глубин дна и подводного рельефа. Визуализация подводного рельефа возможна только после получения видеоизображений и проведения специализированных эхолотных измерений, а также применения обоснованных методов интерпретации батиметрических данных, причем детализация изображения зависит от пространственной дискретности натурных измерений. Количественная характеристика подводного рельефа островов Ладожского озера ограничена из-за отсутствия подробных цифровых батимет-

рических карт, позволяющих провести соответствующие вычисления, в том числе уклонов дна. Настоящая статья имеет своей целью продолжить и конкретизировать исследования подводного рельефа Валаамского архипелага, начатые авторами на основе эхолотных измерений в северо-западной части о. Валаам, где были выявлены уклоны, достигающие 60° и зафиксированы подводные оползни [1]. В настоящее время с использованием доступных карт и непосредственных измерений создана цифровая модель Валаамского архипелага в пределах 61.3° – 61.5° с.ш. и 30.7° – 31.4° в.д. (рис. 1). Эта модель является основой для количественных оценок распределения глубин и уклонов подводного рельефа указанного района Ладожского озера. Она включает в себя высоты, глубины и максимальные уклоны с пространственным разрешением 25×25 м (общее количество узлов – 405 581). Абсолютная разница между высшей точкой островов Валаамского архипелага 52 м и наибольшей глубиной 164 м исследуемого района составила 216 м.

Все чаще для изучения элементов подводного рельефа Ладожского озера используется фотовидеосъемка [2]. В полевой сезон 2020 г. впервые была проведена видеосъемка самого крутого подводного склона юго-западной части о. Валаам, позволившая детально наблюдать его структуру от поверхности до дна. Съемка производилась на

¹ Институт озероведения Российской академии наук, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: m.a.naumenko@mail.ru

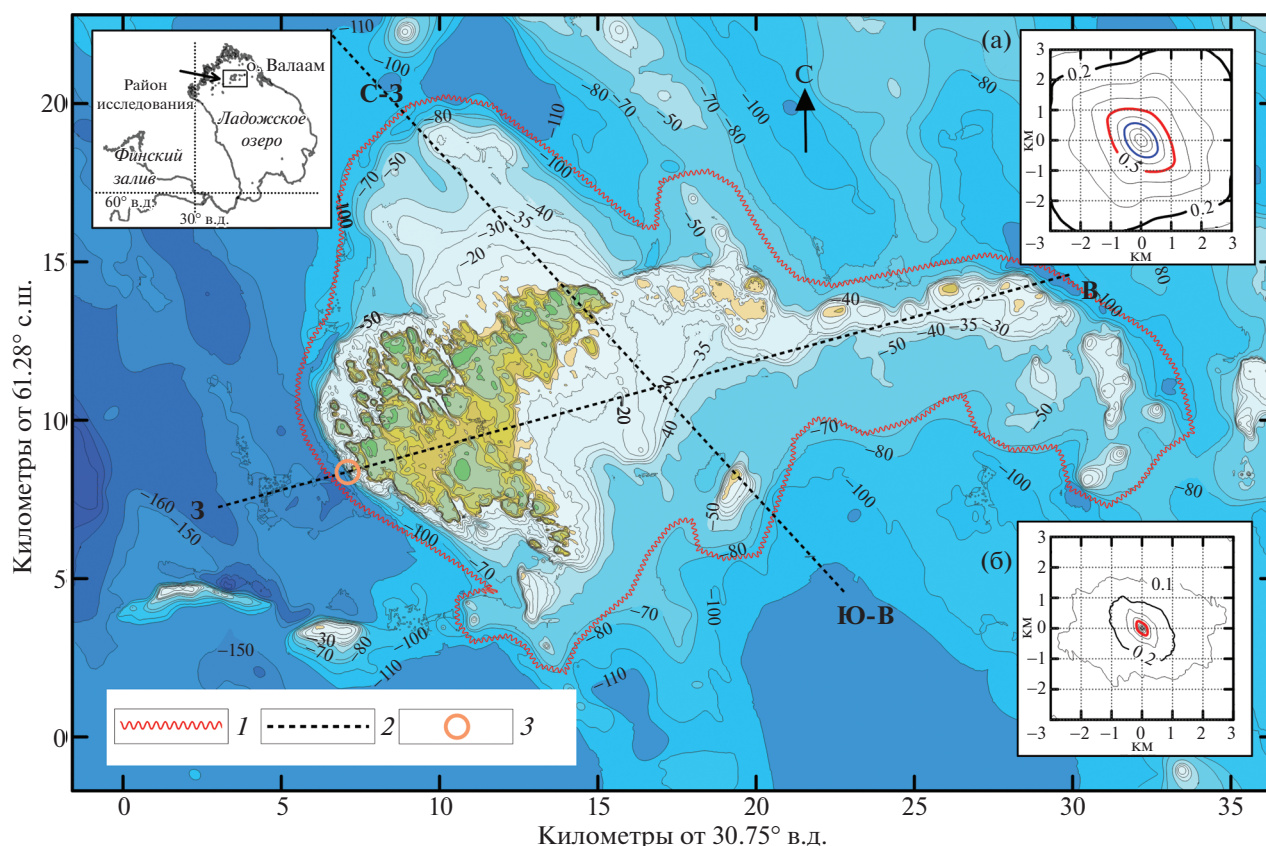


Рис. 1. Валаамский архипелаг и предполагаемая граница силла. 1 – предполагаемая граница силла, 2 – положение разрезов, представленных на рис. 2, 3 – район проведения фотосъемки подводного склона. На врезке к рис. 1 представлены: район исследований, двумерная пространственная корреляционная функция глубин Валаамского архипелага – (а) и уклонов – (б).

подводную камеру с разрешением 2704×1520 пикселей и частотой 25 кадров/сек. Было выполнено три прохода вверх по профилю от подошвы до бровки на глубине 35–40 м с расстояниями между ними не более 200 м. В реальных условиях Ладожского озера низкая горизонтальная прозрачность воды (2–3 м) накладывает жесткие ограничения на максимальную дистанцию между объективом и объектом съемки. Ширина охвата дна на полученных фотографиях примерно 1–2 м.

С геологической точки зрения все острова Валаамско-Салминской островной гряды имеют общее происхождение – это интрузивный рифейский силл, сложенный преимущественно габродиабазами, тектонически раздробленный на разновеликие блоки [3] и подверженный неравномерному поднятию со скоростью около 3 мм/год [4]. Для визуализации его предположительные границы показаны красной линией (площадь 253.5 км^2) (рис. 1), располагающейся на глубинах от 56 до 164 м при средней глубине 91.9 ± 0.3 м. Рисунок 2 а свидетельствует об исключительно больших уклонах на внешних границах Валаамского архипелага, особенно вдоль субмеридио-

нального направления. Превышение над дном составляет 100 м на расстоянии несколько сотен метров.

Количественная характеристика пространственного распределения глубин и уклонов дна в районе Валаамского архипелага может быть представлена на основе цифровой модели в виде гистограмм, корреляционных функций, а также гипсографической и объемной кривых. Все эти статистические оценки до настоящего времени отсутствовали. Гистограмма распределения глубин (рис. 2 в) имеет одновершинный отрицательно асимметричный вид с преобладанием глубин в диапазоне 55–65 м, плотность вероятности определяется логнормальным законом. Гистограммы распределения уклонов (рис. 2 г) соответствуют кривой экспоненциального распределения с положительной асимметрией.

Двумерная пространственная автокорреляционная функция как глубин, так и уклонов (рис. 1 а и рис. 1 б) указывает на незначительные расстояния L , на которых существует значимая статистическая связь с коэффициентом корреляции $k \geq 0.5$: для глубин L изменяется от 0.9 до 1.5 км, для укло-

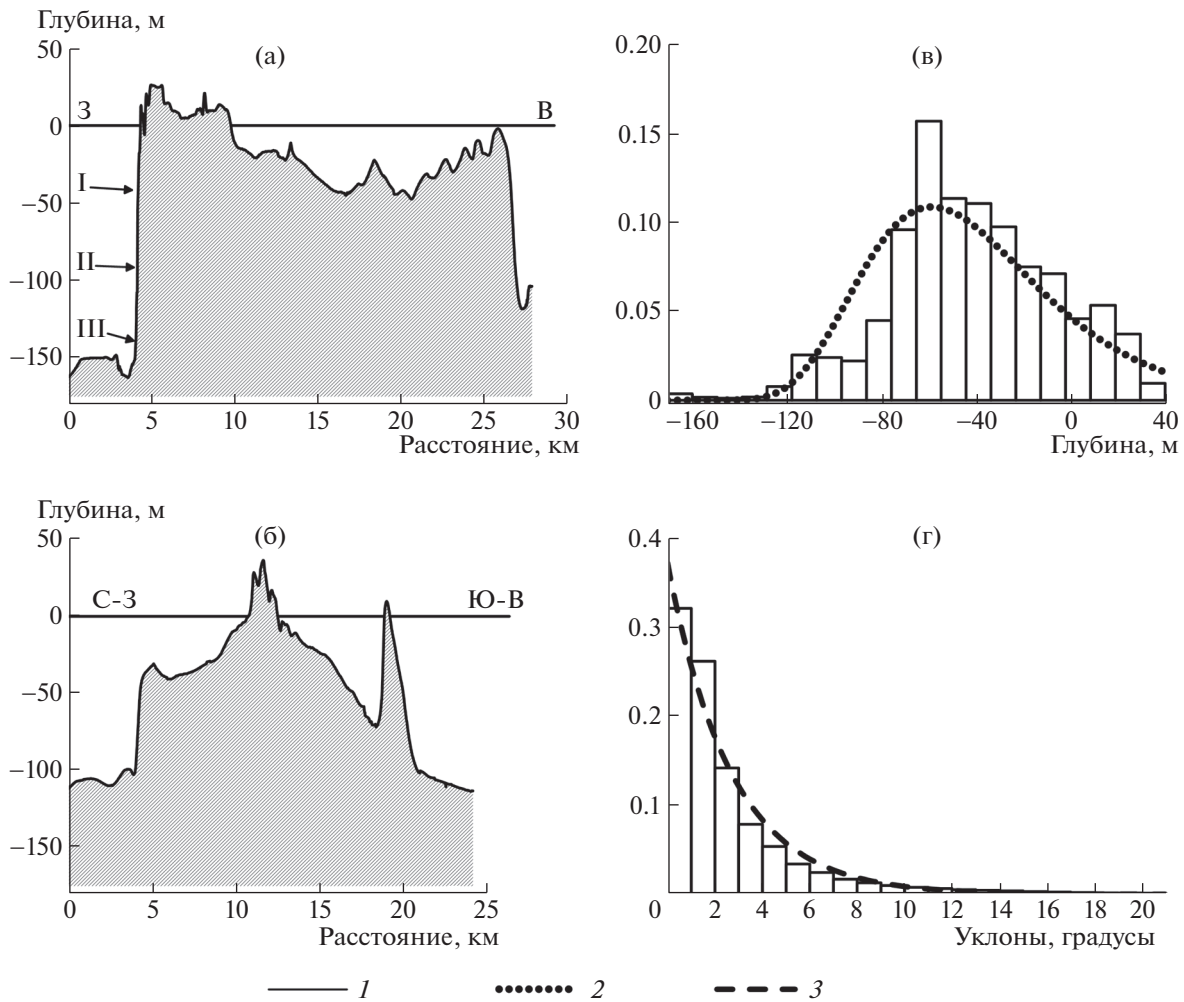


Рис. 2. Разрезы через Валаамский архипелаг – (а) и – (б); гистограмма распределения глубин – (в) и уклонов – (г). 1 – уровень Ладожского озера, 2 – функция плотности вероятности логнормального распределения глубин, 3 – функция плотности вероятности экспоненциального распределения уклонов. Римские цифры I, II, III обозначают местоположение фотографий подводного склона Валаама, представленных на рис. 4.

нов L изменяется от 140 до 260 м. Длинная ось “эллипсов анизотропии” имеет направление северо-запад–юго-восток, что соответствует направлениям линеаментов [5], разрывных нарушений [3] и подтверждено с использованием длительных GPS-измерений [4] и натуральных моделей [6].

Оценить площади надводной и подводной частей архипелага позволили гипсометрическая и объемные кривые (рис. 3 а). Надводная часть вдоль среднего уровня воды составляет 37.1 км^2 , а объем соответственно – 0.57 км^3 . Площадь на глубине 60 м – 195.5 км^2 , объем – 6.8 км^3 . Площадь на этой глубине в 5.3 раза больше площади надводной части, а объем – почти в 11 раз.

С помощью цифровой модели удалось оценить соотношение между уклонами, вычисленными в направлении из наибольших значений, и

глубинами (высотами) всего архипелага. На рис. 3 б с очевидностью выявляются два экстремума степени изменчивости распределения глубин (среднеквадратического отклонения глубин (СКО)), характеризующие интенсивность процессов рельефообразования: в диапазоне от 20 м выше уреза воды до 20 м ниже него со средними уклонами около 5° и второй максимум с большими СКО на глубинах 130–140 м, где уклоны дна изменяются от 5° до 10° и маркируют подножье силла.

Особое внимание было уделено самому крутому склону Валаамского архипелага, показанному на рис. 1 и 2 а, с координатами – 61.358° с.ш. и 30.885° в.д. Он хорошо выражен на дневной поверхности в виде тектонического уступа, в западной и юго-западной части обнаруживаются столбчато-призматические отдельности, указывающие на конвективные процессы в базальтовом расплаве [3, 7]. Видеосъемка подводной ча-

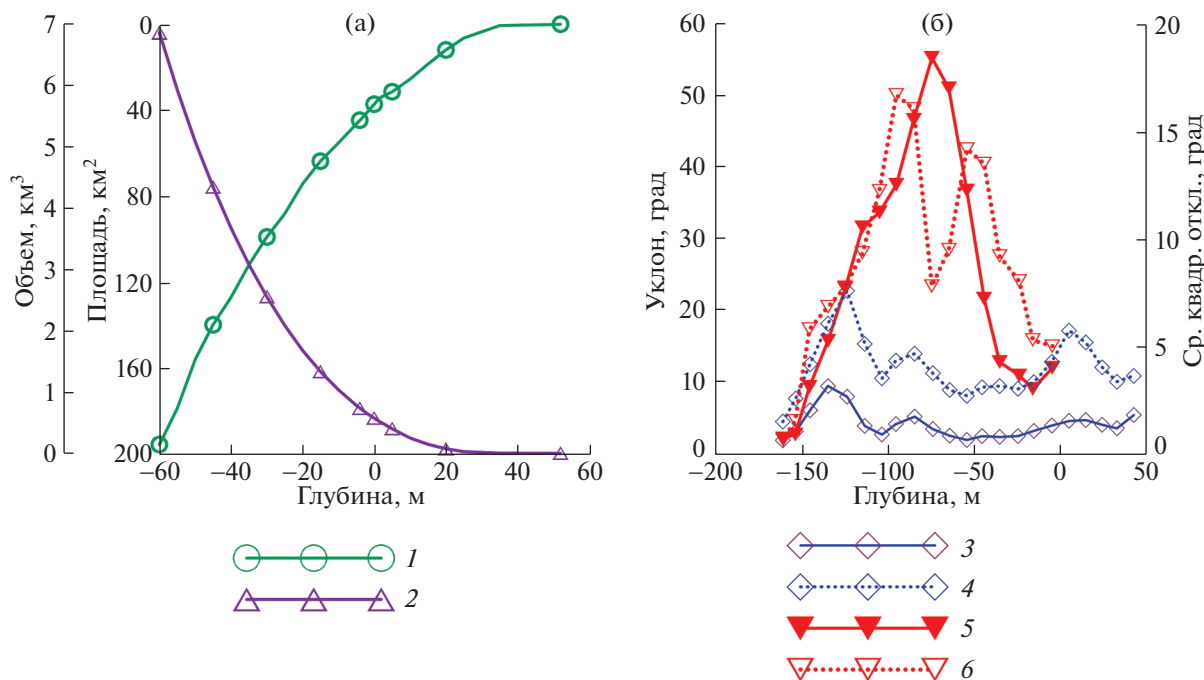


Рис. 3. Характеристики морфоструктуры Валаамского архипелага. (а) — гипсометрическая (1) и объемная (2) кривая; (б) — зависимость уклонов (3) и СКО уклонов (4) всего архипелага от глубины; зависимость уклонов (5) и СКО уклонов (6) самого крутого склона от глубины.

сти юго-западной части острова позволила дать описание структуры пород, слагающих склон (рис. 4).

На основе визуальных экспертных наблюдений в береговых скальных выходах обнаружены крупнозернистые обнажения габродолеритов (феррогаббро), которые необходимо уточнить опробованием. Они прослеживаются от кромки воды на полого наклонную площадку до уступа на глубине 40–45 м. Площадка слабо обнажена и перекрыта крупноглыбовым материалом, представленным габродолеритами и полимиктовыми конгломератами.

Геологический разрез в интервале глубин 45–120 м складывается прочными, устойчивыми к выветриванию, красноцветными с переходами к кирпично-красным, реже желтовато-серыми и зеленовато-серыми рифейскими разнозернистыми песчаниками, гравелитами и алевролитами. Присутствуют прослои кавернозных песчаников с карбонатным цементом. Слоистость пород горизонтальная, присутствуют косослоистые серии. Наблюдаются кварц-полевошпатовые (гранофириновые) жилы, встречаются мелкие кварцевые жёлоды. Сочетание горизонтальных трещин, субсогласных со слоистостью осадков, с вертикальными трещинами формирует ступенчатый профиль склона.

Площадка у подножья склона на глубинах 120 м сложена светло-серым лейкократовым долеритом,

участками — розовато-серым за счет монцитизации.

На трехмерном изображении подводного склона ниже бровки (глубины 40–45 м) ясно видны выпуклые борозды [1], свидетельствующие о возможных движениях породы вдоль склона к его подошве. Действительно, на этом выпукло-вогнутом склоне можно наблюдать все факторы, способствующие формированию обвалов: склон с уклонами до 60° и горизонтальной протяженностью несколько сотен метров, слоистость и трещиноватость пород, которые могут сползать под действием силы тяжести при локальных землетрясениях по ложбинам стока. Информация о землетрясениях, произошедших в районе Ладожского озера, приведена в [8]. На подводных фотографиях отчетливо идентифицируются остроугольные края склона, что позволяет сделать вывод о происшедших здесь недавних землетрясениях и сейсмической активности территории.

Осадочный материал, перемещающийся вниз по склону, должен накапливаться в самой глубокой части с малыми уклонами на некотором расстоянии от подножья склона, что требует дополнительных исследований.

Соотношение между глубинами и уклонами на этом самом крутом подводном склоне о. Валаам показано на рис. 3 б, выявляются два значительных пика с наибольшими СКО уклонов на глубинах 45–50 м и 85–100 м, характеризующих про-



Рис. 4. Фотографии участков самого крутого подводного склона Валаамского архипелага, сделанные на разных глубинах и проходах а и б: I-а, I-б – кромка на глубине 40 м перед подводным склоном, II-а, II-б – подводный склон на глубине 90 м, III-а, III-б – сочленение дна и подножия склона на глубине 147 м.

странственную изменчивость в несколько раз большую, чем на этих глубинах всего Валаамского архипелага. Наиболее крутые участки с уклонами более 50° сосредоточены в средней части склона, между указанными интервалами глубин на глубинах 70–80 м. Следует подчеркнуть, что ступенчатый продольный и поперечный профиль дна, полученный при эхолотных промерах, а также отвесные рассеченные многочисленными трещинами уступы берегов западной части о. Валаам указывают на влияние разрывных нарушений в этих районах [5, 9, 10]. Сейсмообвалы могут локализоваться в зонах активных разломов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Проведенные исследования выполнены по госзаданию № 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бас-

сейна под воздействием природных и антропогенных факторов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко М.А., Гузватый В.В., Нестеров Н.А., Субетто Д.А. Морфометрические особенности подводного склона юго-западной части острова Валаам // ДАН. 2019. Т. 486. № 3. С. 371–374.
2. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Поздняков Ш.Р., Дудаков М.О., Юдин С.Н. Подводные ландшафты островов Мантсинсаари и Лункулансаари в зоне рифейских поднятий в восточной части Ладожского озера // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 433–445.
3. Свириденко Л.П., Светов А.П. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 123 с.

4. Галаганов О.Н., Горшков В.Л., Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Передерин В.П., Шербакова Н.В. Современные движения земной коры Ладожско-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений // Совр. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2011. № 8 (2). С. 130–136.
5. Анохин В.М., Науменко М.А., Нестеров Н.А. Рельеф дна Ладожского озера и его связь с дизъюнктивами // Известия Русского географического общества. 2016. Т. 148. № 2. С. 44–52.
6. Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Влияние активизированных докембрийских разрывных нарушений на рельеф котловины Ладожского озера. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 3. С. 99–105.
7. Чудов С.В. Столчатые базальты и конвекция Рэлея–Бенара. // Природа. 2017. № 6. С. 34–40.
8. Ассиновская Б.А., Карпинский В.В. Ладожские сейсмические явления. СПб: изд-во ВСЕГЕИ. (Федеральный исследовательский центр “Единая Геофизическая служба Российской академии наук”). 2020. С. 46.
9. Слинченков В.И., Константинов В.М., Николаев В.В. Новейшие разломы Ладожского озера, Кандакшского залива и о. Имандра по сейсмоакустическим и акустическим данным // Вопросы картирования прибрежного мелководья Баренцева и Белого морей. СПб. ГО “Севморгеология”. 1997. С. 22–41.
10. Lebas E., Gromig R., Krastel S., Wagner B., Fedorov G., Görtz C., Avers T., Subetto D., Naumenko M., Melles M. Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga // Quaternary Science Reviews. 2021. V. 251. P. 106637.

BOTTOM MORPHOSTRUCTURE OF THE VALAAM ARCHIPELAGO IN LAKE LADOGA: THE FIRST VIDEO IMAGES AND QUANTITATIVE ASSESSMENTS

M. A. Naumenko^{a, #}, V. V. Guzivaty^a, D. S. Dudakova^a, M. O. Dudakov^a, and V. M. Anokhin^a

^a St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

[#]E-mail: m.a.naumenko@mail.ru

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov June 16, 2022

Based on the first created digital model of the Valaam archipelago (Lake Ladoga) with a spatial resolution of 25 × 25 m, a quantitative assessment of the spatial distribution of depths and bottom slopes was carried out. Hypsographic and volumetric curves, as well as histograms and spatial correlation functions, have been constructed, indicating that statistically significant relationships between morphometric parameters exist at distances of no more than 1.5 km for depths and no more than 260 m for bottom slopes. Video filming of the steepest slope of Valaam Island revealed its morphometric features and the structure of the rocks that make up the slope with signs of seismic activity in the area.

Keywords: morphostructure of the lake bottom, statistics of depths and slopes, photos of the underwater slope, Valaam archipelago, Lake Ladoga