

Статья принята в печать и будет опубликована в журнале:
«Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле»

**Новая цифровая батиметрическая модель Онежского озера
(Верхне-Свирского водохранилища): разработка,
верификация, применение**

*Максим Сергеевич Потахин, Михаил Борисович Зобков, Павел
Юрьевич Беляев*



DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.105>

Дата получения рукописи: 09.12.2022

Дата принятия рукописи в печать: 10.11.2023

Для цитирования: Потахин, М. С., Зобков, М. Б., Беляев, П. Ю. (2024) Новая цифровая батиметрическая модель Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища): разработка, верификация, применение. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (1). DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.105>

Это неотредактированный файл принятой к публикации рукописи. До публикации в окончательном виде она будет подвергнута редактированию и верстке. Обратите внимание, что во время производственного процесса могут быть выявлены ошибки, влияющие на содержание. К данной рукописи применяются все правовые оговорки, относящиеся к журналу.

УДК 551.435.164:551.4:004.942(282.247.211)

Новая цифровая батиметрическая модель Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища): разработка, верификация, применение¹

Максим Сергеевич Потахин^{1,2}, Михаил Борисович Зобков¹, Павел Юрьевич Беляев^{1,3}

¹Карельский научный центр РАН, Российская Федерация, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

²Петрозаводский государственный университет, Российская Федерация, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, пр. Ленина, 33

³ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, Российская Федерация, 190121, Санкт-Петербург, Английский пр., 1

Потахин М.С.: mpotakhin@mail.ru

Зобков М.Б.: ya-mikhailz@yandex.ru

Беляев П.Ю.: borat78@yandex.com

Аннотация

На основе навигационных карт-лоций разработана новая цифровая батиметрическая модель Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Проведена верификация цифровой модели путем сравнения ее отметок с исходным картографическим материалом, результатами эхолотных промеров и ранее созданными моделями. Пространственное разрешение разработанной модели составило 50 м в плане и 2 м по глубине. Несмотря на выявленные отклонения, новая цифровая модель показала хорошее соответствие значений раstra и данных прямых наблюдений, что можно считать достаточным для проведения расчетов основных морфометрических характеристик озера и решения ряда других практических задач. С помощью цифровой модели получены новые значения морфометрических характеристик водоема (в границах озера и водохранилища) и его отдельных районов. Впервые на основе

¹Разработка и применение цифровой модели выполнено при поддержке гранта РНФ (18-17-00176), верификация — в рамках тем Госзадания Карельского научного центра РАН

цифровой модели уточнены показатели площади акватории, объема водной массы, средней и максимальной глубины, определены площади литорали (до изобат 2, 5 и 10 м) различных районов озера. Наибольшими по размеру акватории районами являются Центральное и Южное Онего, наиболее глубоководными — Большое Онего, Центральное Онего и Повенецкий залив. Наибольшими районами по значению показателя площади литорали — районы Южное и Центральное Онего, наибольшая доля литорали характерна для района Кижских шхер, а также для большинства заливов северной части озера. Цифровая батиметрическая модель нашла применение при реконструкциях развития водоема в послеледниковье, а также при картировании четвертичных отложений и геоморфологических особенностей озерной котловины. Цифровая модель может быть использована в качестве основы трехмерного моделирования геоморфологических, термогидродинамических и седиментационных процессов.

Ключевые слова: Онежское озеро, цифровая модель, рельеф дна, морфометрические характеристики, географические информационные системы

1. Введение

Цифровые батиметрические модели (ЦБМ) являются частным случаем цифровых моделей рельефа (ЦМР) и создаются в результате интерполяции данных о промерах глубин. ЦБМ нашли применение как при исследованиях акваторий Мирового океана (Никифоров и др., 2015; Либина, Никифоров, 2020 и др.), так и внутренних водных объектов (Науменко, 2000, 2013; Шерстянкин и др., 2006; Tibor et al., 2014; Выручалкина, 2020 и др.). Особое место в ряду ЦМР занимают модели, совмещающие подводный и надводный рельеф (Amante, Eakins, 2016; Сергеев, Глебова, 2017; Medeiros et al., 2017; Zhu et al., 2019 и др.).

Область использования ЦБМ широка, они применяются для построения карт глубин и специализированных карт; построения морфометрических схем рельефа (профили дна, гистограммы распределения глубин и др.); расчета и построения морфометрических характеристик на основе производных рельефа (карты углов наклона, расчлененности рельефа и др.). В сочетании с геолого-геофизическими данными ЦБМ могут использоваться при построении геоакустических моделей, создании морских ГИС различного назначения, планировании размещения различных подводных сооружений и коммуникаций, оценке вероятных георисков и т.д. (Либина, Никифоров, 2020).

Цифровые модели получили распространение в палеогеографических исследованиях для реконструкций развития приледниковых водоемов (Jakobsson et al., 2007; Vassiljev, Saarse, 2013; Gorlach et al., 2017 и др.). В частности, для целей реконструкций развития Онежского озера в позднеледниковые и голоцене, возникла необходимость в создании ЦМР водоема и прилегающей территории (Субетто и др., 2019; Zobkov et al., 2019). Единственная существующая на тот момент ЦБМ Онежского озера (Науменко, 2010) не отвечала поставленным задачам, т.к. имела очень низкое разрешение (0.253 точек/км²). Именно поэтому была поставлена задача разработки новой ЦБМ более высокого разрешения, которая послужила бы основой проведения палеореконструкций и позволила получить новые данные о морфометрических характеристиках водоема.

Таким образом, целью настоящей работы являлась разработка современной ЦБМ Онежского озера высокого разрешения, как основы моделирования изменения рельефа котловины в прошлом и трехмерного моделирования современных озерных процессов, а также для уточнения основных морфометрических характеристик водоема и его отдельных районов.

2. Материалы и методы

Онежское озеро расположено на Северо-Западе Российской Федерации и принадлежит к бассейну Балтийского моря (водосбор р. Нева, частный водосбор р. Свирь). Координаты географического центра озера: 62°42' с.ш., 35°25' в.д. Является вторым по величине пресноводным водоемом Европы и третьим — России. Согласно данным Государственного водного кадастра (по Филатов, 2010), площадь озера достигает 10 тыс. км² при среднемноголетней высоте уровня 33.0 м БС. Наибольшая длина водоема — 248 км, ширина — 96 км, объем водной массы — 295 км³, средняя и максимальная глубина — 30 и 120 м соответственно. Площадь водосбора превышает 53 тыс. км². Особенности строения котловины озера определяются рядом факторов и, в первую очередь, расположением ее в восточной периферии Фенноскандинавского (Балтийского) кристаллического щита, в зоне сочленения его с Русской осадочной плитой, в области развития покровных плейстоценовых оледенений. Морфоструктура рельефа озерной котловины предопределена особенностями строения дочетвертичных образований, а морфоскульптура сформирована деятельностью плейстоценовых ледников и озер (Беляев и др., 2021).

Онежское озеро является важнейшим объектом хозяйственного использования, т.к. входит в состав Беломорско-Балтийского и Волго-Балтийского водных путей. Озеро интенсивно используется для товарного рыбоводства, рыбного промысла и любительского рыболовства, служит источником коммунально-бытового, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения (Филатов, 2010). После введения в эксплуатацию в 1952 г. на р. Свири Верхне-Свирской ГЭС, уровень водоема был поднят на 30 см и зарегулирован. В результате образовалось Верхне-Свирское вдхр., состоящее из двух частей: озерной, включающей Онежское озеро, и речной, включающей верхнее течение р. Свирь.

Основные характеристики уровневого режима различных частей водохранилища, приведены в табл.1 (Правила использования..., 2014). Водохранилище позволяет осуществлять многолетнее регулирование стока за счет водных ресурсов Онежского озера. Руслотная емкость речного участка водохранилища используется для недельного и суточного регулирования мощности ГЭС (Милютин и др., 2019).

Далее в целях системного изложения результатов данной статьи под морфометрическими характеристиками Онежского озера будут подразумеваться таковые при среднемноголетнем уровне 33.0 без учета речной части водохранилища, а для Верхне-Свирского вдхр. — при НПУ 33.3 м с учетом его речной части.

Информационной основой создания цифровой модели Онежского озера послужили навигационные карты-лоции Атласа единой глубоководной системы Европейской части РФ масштаба 1:100 000 (Лочия, 1999; Атлас, 2007).

Работы по разработке ЦБМ включали несколько последовательных этапов. На первом этапе проводилась географическая привязка картографического материала к координатной сетке по элементам зарамочного оформления. Второй этап включал оцифровку отметок глубин и контуров водоема. Оцифровка глубин осуществлялась по картам-лоциям с использованием ГИС-пакета ArcGIS 10.2.2. Оцифровка контура озера и островов проводилась по спутниковым снимкам Landsat 4 от 3 сентября 2003 г. (пространственное разрешение 50 м) с использованием ГИС MapInfo 7. Общий массив оцифрованных данных содержал 101 420 значений (54 550 точек положения береговой линии и 46 870 промеров глубин). По данным Росгидромета уровень озера на 1 сентября 2003 г. составлял 32.94 м, что только на 6 см ниже среднемноголетнего уровня Онежского озера (33.0 м, Лочия..., 1999). При среднем уклоне дна прибрежной зоны $9.61 \cdot 10^{-3}$ (9.61 м / км) (Филатов, 2010) максимальный уход береговой линии

составит около 6 м. Поскольку это существенно меньше разрешения спутникового снимка, приведения береговой линии к среднесуточному уровню не проводилось.

Расстояние между промерами глубин на навигационных картах по районам озера существенно различается: наибольшая плотность точек наблюдается в вершинах губ, на подходах к портам, шлюзам, и участках со сложной навигационной обстановкой, таких как Кижские шхеры. В таких районах расстояние между промерами составляло от 40 до 100 м. В открытых глубоководных районах озера, таких как Большое и Малое Онего расстояние между промерами было существенно выше и колебалось от 200 м до 2000 м. Чтобы учесть рельеф дна заливов, была выбрана достаточно мелкая сетка раstra с размером 20x20 м, что гарантировало, что в каждой ячейке будет не более одного промера.

Затем все исходные данные были перепроецированы в систему координат UTM Mercator WGS84, зона 36 для северного полушария в ArcGIS 10.2.2. На третьем этапе была проведена интерполяция данных в ГИС Surfer 10 с использованием метода Кригинга с барьерами, в качестве которых выступали береговые линии озера и островов (шаг сетки интерполяции составлял 20 м). Поверхность суши была бланкирована, после чего глубины были преобразованы в Балтийскую систему высот (БС). Для обмена данными между применявшимися в работе приложениями использовали текстовые CSV файлы и двоичные файлы раstra (GRD).

В крупных озерах, в силу их больших размеров и разнообразия глубин, проводится районирование акватории, т.е. выделяются районы, где лимнические процессы имеют одинаковую направленность (Науменко, 2013). Согласно И. В. Молчанову (1946), акватория Онежского озера разделяется на более чем 20 гидрографических районов. В настоящее время для Верхне-Сви́рского водохранилища традиционно выделяют 12 лимнических районов (Филатов, 2010, 2015 и др.) (рис. 1).

Лимнические районы различаются между собой по интенсивности внешнего водообмена (Лозовик и др., 2019), в разной степени подвержены антропогенному влиянию (Galakhina et al., 2022) и имеют различные характеристики, как химического состава вод, так и биологической продуктивности (Филатов, 2010). В связи с этим, морфометрические данные по отдельным районам озера важны для различных лимнологических расчетов и экологического моделирования. Площадь акватории отдельных заливов является наиболее простым для вычисления параметром и ранее была определена для основных районов озера (Филатов, 2010). Однако определение таких показателей как объем водной массы лимнического района, его средней глубины,

являются более трудоемкими и ранее были вычислены только для некоторых заливов (Молчанов, 1946; Лозовик и др., 2019; Galakhina et al., 2022).

Важной характеристикой водоема является площадь литоральной зоны, имеющей ключевое значение для функционирования озерных экосистем (Китаев, 1984). Озерная литораль представляет собой прибрежную зону, в пределах которой свет достигает дна, а его поверхность подвержено волновому воздействию. Часто под литоралью понимают прибрежную часть водоема, простирающуюся от уреза воды до нижней границы распространения водных макрофитов (Распопов, 1985). Очевидно, что определение границ литоральной зоны индивидуально для каждого озера, в том числе и для отдельных районов крупных водоемов.

Для Онежского озера нами рассмотрены площади литоральной зоны, ограниченные береговой линией и изобатами 2, 5 и 10 м (A_2 , A_5 и A_{10} соответственно). Глубины менее 2-х метров способствуют развитию в литоральной зоне полупогруженной и плавающей высшей водной растительности, 5-ти метровая глубина ограничивает распространение практически всех водных макрофитов в Онежском озере (Распопов, 1985). Глубина 10-ти метров соответствует глубине интенсивного ветрового перемешивания в Онежском озере, а также максимальной толщине фотического слоя, т.е. глубине, на которую распространяется солнечное излучение способствующее развитию фотосинтезирующих водорослей (Кауфман, 1990; Филатов, 2010). Также эти глубинные зоны имеют большое значение для судоходства, т.к. 10-ти метровая изобата ограничивает глубины для плавания судов с большой осадкой; 5-ти метровая — со средней осадкой; 2-х метровая — всех видов судов (Никифоров и др., 2015).

Для выполнения расчетов основных морфометрических характеристик по отдельным районам озера применялся инструмент «Зональная статистика в таблицу» пакета Spatial Analysis ArcGis 10.2.2. Для расчета площадей литоральных зон озера предварительно была выполнена переклассификация раstra (инструмент Reclass). Объем воды вычислялся тремя способами: послойно через интервалы 5-10 м по методу усеченного конуса для сравнения результатов с картографическим методом, послойно через интервалы 1 м по методу усеченного конуса и с помощью инструмента «Объем» из пакета 3D Analyst ArcGIS.

Верификация ЦБМ проведена путем сравнения отметок модели с данными, полученными по результатам эхолотных промеров. Съёмка глубин осуществлялась 10-12 августа 2021 г. на акваториях Петрозаводской и Кондопожской губ с использованием маломерного судна и с 19 мая по 6 июня 2022 г. на всей акватории водоема с борта

НИС «Эколог». Измерения проводились при помощи эхолота Garmin GPS mapplus 92SV на частоте 230 кГц в режиме CHIRP. Поскольку эхолот не проводит автоматическую корректировку показаний на изменение скорости звука в воде в зависимости от параметров среды, показания эхолота были скорректированы на температуру воды и глубину. Для этого скорость звука для каждой точки измерений была рассчитана по упрощенной формуле Лероя. Температура на поверхности воды взята со встроенного датчика температуры эхолота, соленость — по показаниям зонда Sea&Sun Technologies CTD 48m в открытой части Онежского озера на период проведения измерений. После чего полевые измерения были приведены к среднемноголетнему уровню Онежского озера (33.0 м) по данным гидропоста гор. Петрозаводска. Для сопоставления отметок глубин навигационной карты и полученных с помощью эхолота выбирались точки, расположенные на расстоянии не более 15 м друг от друга. Всего было выявлено 79 таких совместных измерений.

3. Результаты и обсуждение

В результате работ была создана ЦБМ Онежского озера с шагом сетки 20 м (рис. 2). Плотность промеров глубин, которые легли в основу модели, составила 4.76 точек/км², среднее расстояние между промерами глубин — 0.458 км.

3.1. Верификация цифровой модели

Первоначально было проведено сопоставление изолиний, построенных на основе ЦБМ с исходной картой-лоцией (Лочия, 1999; Атлас, 2007), которое показало высокое соответствие цифровой модели и картографических материалов (рис. 3).

Сравнение интерполированных значений с данными точечных промеров, снятыми с навигационной карты, показало их высокое соответствие: коэффициент корреляции 0.9997, наклон 0.999, свободный член близок к нулю (рис. 4). Среднее отклонение между промерами глубин и значениями ячеек растра составило 0.03 м, а СКО менее 0.3 м. Таким образом можно заключить, что модель адекватно воспроизводит точечные промеры глубин, полученные с навигационной карты.

Сравнение эхолотных промеров с отметками навигационной карты показало, что они хорошо коррелируют между собой (рис. 5), однако имеет место систематическое завышение глубин по показаниям эхолота (СО +1.2 м, СКО 3.7 м). Это отклонение необходимо учитывать при интерпретации результатов сравнения показаний эхолота и ЦБМ.

Далее проводилось сравнение ЦБМ с данными, полученными по результатам эхолотных промеров. Оно показало, что среднеквадратичное отклонение варьировало для различных районов озера и составляло от 0.9 до 12.9 м. Для всех лимнических районов среднее отклонение промеров глубин от отметок раstra положительное (табл. 2). Это означает, что модель систематически показывает меньшие значения глубины, чем эхолотная съемка. Однако если принимать во внимание завышение показаний эхолота относительно отметок навигационной карты, то для озера в целом оно будет составлять 0.8 м, а для большинства районов будет находиться в пределах 1.0 м. Наиболее значимые расхождения получены для Большого Онего — самого глубоководного района озера, характеризующегося высокой расчлененностью подводного рельефа и резкими перепадами глубин. Кроме того, район максимальных глубин имеет наименьшее покрытие измерениями на картах-лоциях, из-за его малой опасности для судоходства. Также следует отметить, что на навигационных картах глубины в диапазоне от 20 до 50 м указываются с точностью до 0.5 м, а глубины более 50 м — с точностью до 1.0 м (Рульков, 1973). Таким образом, систематическое занижение реальной глубины нашей моделью может быть обусловлено рядом факторов. Во-первых, спецификой данных, полученных с навигационных карт. На картах-лоциях преимущественно обозначаются места опасные для судоходства, т.е. мели, луды и банки, при этом малоопасные глубоководные места имеют меньшее покрытие измерениями. Это обстоятельство смещает поверхность дна в область меньших глубин. Во-вторых, луч эхолота может пробивать верхние слои донных отложений на различную глубину в зависимости от их плотности. Это приводит к увеличению отображаемой эхолотом глубины в районах с большой мощностью илистых отложений.

Наибольшие различия между данными модели и прямыми промерами наблюдаются в области неоднородностей рельефа на резких свалах в моменты прохода мысов, луд, ям. Модель дает меньшие значения глубины, т.е. более пологий (сглаженный) рельеф. Особенно хорошо это видно в Кондопожской и Лижемской губах, а также Большом Онего (рис. 6) из-за более расчлененного рельефа дна. Основываясь на результатах сравнения отметок раstra и прямых промеров глубин эхолотом, выявлено, что различия также вызваны горизонтальным смещением максимальных отметок глубин модели в плане (около 50 м), обусловленного наличием погрешностей привязки исходной навигационной карты, ошибок оцифровки точек, интерполяции и GPS-позиционирования при эхолотной съемке. Таким образом выявлено, что реальное

пространственное разрешение разработанной в данном исследовании ЦБМ составляет около 50 м в плане и около 2 м по глубине.

Очевидно, что котловина озера имеет гораздо более сложный рельеф, чем может воспроизвести батиметрическая модель, построенная по данным навигационных карт-лоций. Однако, несмотря на выявленные отклонения, точность модели является достаточной для проведения расчетов основных морфометрических характеристик озера и ряда практических задач, которые будут рассмотрены ниже.

Проведено сравнение разработанной ЦБМ (табл. 3) с созданной ранее М. А. Науменко цифровой моделью (Науменко, 2000). Использование крупномасштабной картографической основы позволило увеличить количество значений промеров глубин почти в 20 раз. В свою очередь это привело к повышению плотности промеров глубин (до 4.76 точек/км²), что, безусловно, увеличило точность новой ЦБМ.

3.2. Основные морфометрические характеристики

С помощью разработанной ЦБМ были получены обновленные морфометрические характеристики Онежского озера (Верхне-Свирского вдхр.) и его отдельных районов, построены объемные и гипсометрические кривые (рис. 7). В процессе работы определены площадь акватории (A), длина береговой линии на материке (L_s), объемы воды (V), максимальная и средняя глубина (H_m и H_a), получены статистические данные о вариации глубин (CKO) (табл. 4).

Выполненные расчеты объема озера тремя разными способами: послойно через интервалы 5-10 м и через интервалы 1 м по методу усеченного конуса, а также с помощью инструмента «Объем» из пакета 3D Analyst ArcGIS, показали разные значения — 292.5, 290.5 и 285.6 км³ соответственно. Уменьшение полученных значений при усложнении способа расчета подтверждает, что форма котловины отличается от идеальной формы усеченного конуса и составляет меньший объем (Håkanson, 1981), что было также показано М. А. Науменко (2000) при анализе гипсометрической кривой Онежского озера. Поэтому для расчета морфометрических характеристик Онежского озера и Верхне-Свирского вдхр. нами был использован пакет программ ArcGIS.

Согласно ЦБМ, площадь акватории Онежского озера составляет 9705 км², а Верхне-Свирского вдхр. — 10 000 км². На озере расположено 426 островов общей площадью 243 км² (табл. 5). Наибольшими по размеру водной поверхности районами являются Центральное и Южное Онего. Наиболее глубоководные районы — Большое

Онего, Центральное Онего и Повенецкий залив. Район Большое Онего также отличается наибольшими перепадами глубины (по СКО, табл. 4).

Проведено сравнение полученных данных с характеристиками, рассчитанными Ф. А. Черняевой традиционным планиметрическим методом по картам 1964 г. (Черняева, 1973) и характеристиками, определенными М. А. Науменко по разработанной им цифровой модели (Науменко, 2000). Результаты этого сравнения представлены в табл. 5.

Наибольшие различия с ранее известными показателями (Черняева, 1973; Науменко, 2000) наблюдаются для объема водной массы и, следовательно, для средней глубины. При этом проведенные расчеты объема по разработанной нами ЦБМ для Онежского озера, оказались ближе к результатам вычислений, полученных ранее Ф. А. Черняевой (1973), чем к вычислениям по батиметрической модели М. А. Науменко (2000) (табл. 5). Так различие значений объема, полученных Ф. А. Черняевой (1973) и нами, составляет 5 км³ или около 1.5 % при использовании 3D метода расчета. При этом для одного и того же способа расчета (послойно через интервалы 5-10 м по методу усеченного конуса) общая разница объема с результатами Ф. А. Черняевой (1973) составила всего 1.5 км³ или около 0.5 %. Проведенное послойное сравнение значений выявило, что наибольшее различие площадей сосредоточено в слоях 20-30 и 60-70 м, которое составило всего +1.2 и -1.6 % соответственно. Для остальных слоев, рассмотренных Ф. А. Черняевой (1973) разница с долями площадей по слоям, рассчитанными по ЦБМ составила менее 0.5%. Разница в распределении объемов по всем слоям составила от +0.3% до -0.3% и менее.

Различие значений объема, полученных М. А. Науменко (2000) и нами, составляет 24 км³ или около 8 %. Как видно на рис. 1, рельеф котловины озера характеризуется сильной расчлененностью, особенно в северо-западной его части, где преобладают холмисто-грядовые умеренно расчлененные структурно-денудационные равнины (Беляев и др., 2021), характеризующиеся резкими перепадами глубин. В этом плане нужно полагать, что относительно небольшое число промеров глубин, использованное в модели (Науменко, 2000), не позволило учесть все особенности такого рельефа.

Вместе с тем, по сравнению с результатами прямых измерений глубин, показания разработанной нами ЦБМ для всей акватории озера систематически занижаются в среднем на 2.0 м, что вызвано наличием малых депрессий рельефа, не отмеченных на лоциях, и соответственно, не учитываемых моделью и более резких свалов глубин, чем вычислено путем интерполяции. Можно ожидать, что учет малых форм рельефа дна в

будущем приведет к увеличению общего объема озера. Исходя из данного предположения и известной площади зеркала озера, неучтенный объем воды, сосредоточенный в локальных депрессиях, не отмеченных на картах, может составить до 20 км³.

Использование ЦБМ позволило рассчитать уклоны дна Онежского озера, а также построить и провести анализ типичных разрезов водоема. Продольный разрез озера (рис. 8) свидетельствует о больших глубинах и значительной расчлененности рельефа в северной и центральной частях котловины. Максимальные уклоны дна здесь достигают 100 м/км и более (максимальные значения для района Большое Онего — 112.5 м/км) и превышают средние уклоны в 100 и более раз (табл. 6). Это объясняется развитием в северных прибрежных частях котловины холмисто-грядовых умеренно расчлененных структурно-денудационных равнин озерного генезиса, а в центральных частях — волнистых аккумулятивно-нефелоидных, грядово-волнистых холмисто-увалистых аккумулятивно-денудационных равнин озерного и озерно-ледникового генезиса (Беляев и др., 2021). Для южной части озерной котловины характерны меньшие глубины и менее расчлененный рельеф (максимальные уклоны дна района Южное Онего достигают 10 м/км). Объясняется это преобладанием здесь пологоволнистых и всхолмленных аккумулятивно-денудационных ледниковых равнин, а также плоско-волнистых ледниково-озерных аккумулятивных равнин (Беляев и др., 2021). Поперечный разрез (рис. 8) также демонстрирует асимметрию озерной котловины, со смещением максимальных значений глубин к западному берегу, в пределах развития волнистых аккумулятивно-нефелоидных озерных равнин.

С использованием ЦБМ проведен расчет площадей литоральной зоны Онежского озера и его основных районов, а также Верхне-Свирского вдхр. (табл. 7). Так, в пределах озерной части, площадь литорали достигает 20 % общей площади акватории. Наибольшими по значению показателя площади литоральной зоны являются районы Южное и Центральное Онего, где повсеместно представлены аккумулятивные и абразионно-аккумулятивные типы побережья, а также дельтовые и лагунные берега (Игнатов и др., 2017). Наибольшая доля литорали в общей площади акватории характерна для района Кижских шхер, а также для большинства заливов северной части озера (Уницкая губа, Лижемская губа, Заонежский залив и т.д.), где преобладает фиардово-шхерный тип побережья (Игнатов и др., 2017). Также высокой долей мелководных участков характеризуется речная часть водохранилища — верхнее течение р. Свирь.

3.3. Применение цифровой модели

Разработанная ЦБМ нашла применение при создании реконструкций развития Онежского озера в позднеледниковье и голоцене (Субетто и др., 2019; Zobkov et al., 2019), а также при картировании четвертичных отложений и геоморфологических особенностей водоема (Беляев и др., 2021).

При построении палеореконструкций развития Онежского озера в позднеледниковье и голоцене (Субетто и др., 2019; Zobkov et al., 2019), цифровая модель водоема была совмещена с ЦМР прилегающей территории с координатами 60°00' с.ш., 30°00' в.д. и 65°00' с.ш., 39°00' в.д. Совмещенная цифровая модель позволила выполнить реконструкции развития водоема и проследить изменение его морфометрических характеристик в различные климатические периоды прошлого.

Для составления геоморфологической картосхемы Онежского озера, цифровая модель была использована как основа сопоставления схемы четвертичных образований с данными о батиметрии озерной котловины (Беляев и др., 2021), что позволило, в свою очередь, выделить различные типы рельефа дна и дать им характеристику с точки зрения морфологии и генезиса.

Также разработанная ИВПС цифровая модель Онежского озера может послужить основой для трехмерного моделирования геоморфологических, термогидродинамических и седиментационных процессов, как это было продемонстрировано в ряде работ (Руховец и др., 2010; Эдельштейн и др., 2012; Меншуткин и др., 2013; 2014 и др.).

4. Заключение

На основе навигационных карт-лоций Атласа единой глубоководной системы Европейской части РФ разработана новая ЦБМ Онежского озера (Верхнесвирского вдхр.) с пространственным разрешением около 50 м в плане и 2 м по глубине. Проведена верификация модели путем ее сопоставления с исходным картографическим материалом, данными эхолотных промеров и ранее созданной ЦБМ. Несмотря на выявленные отклонения, новая цифровая модель показала хорошее соответствие значений раstra и данных прямых наблюдений, что можно считать достаточным для проведения расчетов основных морфометрических характеристик озера и решения ряда других практических задач.

С помощью созданной ЦБМ были уточнены значения морфометрических характеристик водоема и его основных районов. Так, впервые на основе цифровой модели, определены площади водной поверхности и объемы воды различных районов озера, а также площади литоральной зоны. Наибольшими по размеру акватории районами являются Центральное и Южное Онего, наиболее глубоководными — Большое Онего, Центральное Онего и Повенецкий залив. Наибольшими районами по значению показателя площади литорали — районы Южное и Центральное Онего, наибольшая доля литорали характерна для района Кижских шхер, а также для большинства заливов северной части озера.

Разработанная цифровая модель нашла применение при создании реконструкций развития Онежского озера в послеледниковье, а также при картировании четвертичных отложений и рельефа дна водоема. Также она может быть использована в качестве основы трехмерного моделирования внутриводоемных процессов.

Литература

Атлас единой глубоководной системы Европейской части Российской Федерации (2007). Т. 3. Ч. II. Волго-Балтийский водный путь. Река Свирь. СПб.

Беляев, П.Ю., Рыбалко, А.Е., Субетто, Д.А., Зобков, М.Б., Федоров, Г.Б. (2021). Четвертичные отложения и рельеф Онежского озера. *Географический вестник*, 56(1), 6-16. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-6-16>

Выручалкина, Т.Ю. (2020). Создание цифровой модели рельефа залива Кара-Богаз-Гол. *Труды Карельского научного центра РАН*, 4, 139-144. <https://doi.org/10.17076/lim1199>

Игнатов, Е.И., Борщенко, Е.В., Загоскин, А.Л., Землянов, И.В., Санин, А.Ю., Терский, П.Н., Фатхи, М.О. (2017). Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и берегов Онежского озера. *Труды Карельского научного центра РАН*, 3, 65-78.

Кауфман, З.С., ред. (1990). *Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения*. Л.: Наука.

Китаев, С.П. (1984). *Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон*. М.: Наука.

Либина, Н.В., Никифоров, С.Л. (2020). Цифровые модели рельефа дна как элемент системы оперативной океанологии. *Океанология*, 60(6), 970-977. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050135>

Лозовик, П.А., Зобков, М.Б., Бородулина, Г.С., Токарев, И.В. (2019). Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды. *Водные ресурсы*, 46(1), 91-101. <https://doi.org/10.31857/S0321-059646191-101>

Лоция Онежского озера. (1999). СПб.

Меншуткин, В.В., Руховец, Л.А., Филатов, Н.Н. (2013). Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 1. Гидродинамика озер. *Водные ресурсы*, 40(6), 566-582. <https://doi.org/10.7868/S0321059613060096>

Меншуткин, В.В., Руховец, Л.А., Филатов, Н.Н. (2014). Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 2. Модели экосистем пресноводных озер. *Водные ресурсы*, 41(1), 24-38. <https://doi.org/10.7868/S0321059614010088>

Милютин, И.Ю., Сапожникова, А.А., Павловский, А.Е. (2019). Роль аккумулирующей емкости Ивинского разлива в режиме работы Верхне-Свирского водохранилища. *Водохранилища Российской Федерации: современные экологические проблемы, состояние, управление*. Новочеркасск, 182-189.

- Молчанов, И.В. (1946). Онежское озеро. Л.
- Науменко, М.А. (2000). Новое определение морфометрических характеристик Онежского озера. *Доклады Академии наук*, 370(3), 393-396.
- Науменко, М.А. (2013). Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровых моделей. *Известия РАН. Серия географическая*, 1, 62-72.
- Никифоров, С.Л., Кошель, С.М., Фроль, В.В., Попов, О.Е., Левченко, О.В. (2015). О методах построения цифровых моделей рельефа дна (на примере Белого моря). *Океанология*, 55(2), 326-336. <https://doi.org/10.7868/S0030157415020136>
- Правила использования водных ресурсов каскада водохранилищ на реке Свирь (Верхне-Свирское и Нижне-Свирское)*. (2014). М.
- Распопов, И.М. (1985). *Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР*. Л.: Наука.
- Рульков, Д.И. (1973). *Навигация и лоция*. М.: Транспорт.
- Руховец, Л.А., Петрова, Н.А., Меншуткин, В.В., Астраханцев, Г.П., Минина, Т.Р., Полосков, В.Н. (2010). Моделирование трансформации экосистемы Ладожского озера при снижении фосфорной нагрузки. *Доклады Академии наук*, 434(5), 684-687.
- Сергеев, И.С., Глебова, А.Б. (2017). Позднечетвертичная трансгрессия Белого моря по данным анализа рельефа дна с применением ГИС. *География и природные ресурсы*, 3, 171-178. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3\(171-178\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(171-178))
- Субетто, Д.А., Потахин, М.С., Зобков, М.Б., Тарасов, А.Ю., Шелехова, Т.С. Гурбич, В.А. (2019). Развитие Онежского озера в послеледниковье по результатам ГИС-моделирования. *Геоморфология*, 3, 83-90. <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019383-90>
- Филатов, Н.Н., ред. (2010). *Онежское озеро. Атлас*. Петрозаводск: КарНЦ РАН.
- Филатов, Н.Н., ред. (2015). *Крупнейшие озера-водохранилища Северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях*. Петрозаводск: КарНЦ РАН.
- Черняева, Ф.А. (1973). Морфометрическая характеристика Онежского озера. В: *Тепловой режим Онежского озера*. Л.: Наука, 7-24.
- Шерстянкин, П.П., Алексеев, С.П., Абрамов, А.М., Ставров, К.Г., Де Батис, М., Хус, Р., Канальс, М., Касамор, Х.Л. (2006). Батиметрическая электронная карта озера Байкал. *Доклады Академии наук*, 408(1), 102-107.

Эдельштейн, К.К., Гречушникова, М.Г., Даценко, Ю.С., Пуклаков, В.В. (2012). Диагностическое моделирование внутриводоемных процессов в водохранилищах. *Водные ресурсы*, 39(4), 437-451.

Amante, C.J., Eakins, B.W. (2016). Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models. *Journal of Coastal Research*. 76, 123-133. <https://doi.org/10.2112/SI76-011>

Galakhina, N., Zobkov, M., Zobkova, M. (2022). Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 17:100619. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>

Gorlach, A., Hang, T., Kalm, V. (2017). GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus. *Boreas*, 46, 486-502. <https://doi.org/10.1111/bor.12223>

Håkanson, L. (1981). *A Manual of Lake Morphometry*. Berlin: Springer.

Jakobsson, M., Björck, S., Alm, G., Andrén, T., Lindeberg, G., Svensson, N.-O. (2007). Reconstructing the Younger Dryas ice dammed lake in the Baltic Basin: bathymetry, area and volume. *Global and Planetary Change*, 57(3), 355-370. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.006>

Medeiros, S.C., Ali, T., Hagen, S.C., Raiford, J.P. (2017). Development of a Seamless Topographic/Bathymetric Digital Terrain Model for Tampa Bay, Florida. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77(12), 1249-1256. <https://doi.org/10.14358/PERS.77.12.1249>

Tibor, G., Sade, R., Hall, J.K., Ben-Avraham, Z., Nishri, A. Lake Bathymetry and Bottom Morphology. (2014). In: Zohary T., Sukenik A., Berman T., Nishri A., eds. *Lake Kinneret: Ecology and Management*, 59-68. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8944-8_4

Vassiljev, J., Saarse, L. (2013). Timing of the Baltic Ice Lake in the eastern Baltic. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 85, 9-18. <https://doi.org/10.17741/bgsf/85.1.001>

Zhu, S., Liu, B., Wan, W., Xie, H., Fang, Y., Chen, X., Li, H., Fang, W., Zhang, G., Tao, M., Hong, Y.A (2019). New Digital Lake Bathymetry Model Using the Step-Wise Water Recession Method to Generate 3D Lake Bathymetric Maps Based on DEMs. *Water*. 11:1151. <https://doi.org/10.3390/w11061151>

Zobkov, M., Potakhin, M., Subetto, D., Tarasov, A. (2019). Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciations with special reference to water volume and area estimations. *Journal of Paleolimnology*, 62(1), 53-71. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021>

Таблицы

Табл. 1. Основные характеристики уровневого режима Верхнесвирского вдхр.

Часть водохранилища	Нормальный подпорный уровень (НПУ), м БС	Уровень мертвого объема (УМО), м БС	Форсированный подпорный уровень (ФПУ), м БС
Озерная часть	33.30	32.00	34.30
Речная часть	33.30	29.80	33.80

Табл. 2. Среднее и среднеквадратичное отклонение отметок модели от результатов прямого промера глубин эхолотной съемкой

№	Район озера	СО*, м	СКО*, м	Количество точек промера
1	Центральное Онего	+1.9	4.5	7716
2	Южное Онего	+0.2	0.9	4239
3	Большое Онего	+6.3	12.9	3996
4	Повенецкий залив	+2.1	3.2	1460
5	Малое Онего	+1.1	2.9	3189
6	Заонежский залив	+0.2	1.6	1795
7	Кондопожская губа	+2.0	4.4	1995
8	Петрозаводская губа	+0.5	1.8	2164
9	Кижские шхеры	+0.2	2.3	62
10	Лижемская губа	+4.0	8.0	263
11	Уницкая губа	+2.3	4.7	923
	Онежское озеро	+2.0	5.9	27 803
12	Верхнее течение р. Свирь	+1.4	2.3	1058
	Верхне-Свирское вдхр.	+2.0	5.8	28 860

*СО — среднее отклонение, СКО — среднеквадратичное отклонение

Табл. 3. Сравнение цифровых моделей Онежского озера

Характеристика	ЦБМ (Науменко, 2000)	ЦБМ (ИВПС КарНЦ РАН)
Масштаб картографической основы	1:250 000 и 1:100 000	1:100 000 и 1:50 000
Контур береговой линии и остров, точек	776	54 550
Значений глубины, точек	2476	46 870
Всего значений, точек	3252	101 420
Плотность промеров глубин (с учетом береговой линии), точек/км ²	0.253 (0.333)	4.76 (10.3)
Среднее расстояние между промерами глубин (с учетом береговой линии), км	1.99 (1.73)	0.458 (0.312)

Табл. 4. Основные морфометрические характеристики Онежского озера (при 33.0 м), его основных районов и Верхнесвирского вдхр. (при 33.3 м)

№	Лимнический район	A , км ²	H_m , м	H_a , м	CKO , м	V , км ³	L_s , км
1	Центральное Онего	3335	111	41.8	16.9	139.4	177
2	Южное Онего	2065	59.9	23.3	12.5	48.0	182
3	Большое Онего	949	120	40.4	26.7	38.4	171
4	Повенецкий залив	902	105	19.1	18.4	17.2	483
5	Малое Онего	882	57.0	23.6	13.1	20.8	107
6	Заонежский залив	724	38.9	13.1	8.2	9.5	201
7	Кондопожская губа	222	83.0	22.3	18.0	5.0	147
8	Петрозаводская губа	165	34.7	15.8	8.9	2.6	55
9	Кижские шхеры	201	29.4	4.4	3.6	0.9	118
10	Лижемская губа	115	77.8	24.2	20.8	2.8	126
11	Уницкая губа	145	43.3	7.8	6.4	1.1	197
	Онежское озеро	9705	120	29.4	20.0	285.6	1963
12	Верхнее течение р. Свирь	200	19.7	2.4	3.0	0.5	330
	Верхне-Свирское вдхр.	10 000	120	28.6	20.1	286.1	2294

Табл. 5. Сравнение морфометрических характеристик Онежского озера и Верхне-Свирского вдхр. полученных по различным моделям

Характеристика	ЦБМ (ИВПС)		(Черняева, 1973)	(Науменко, 2000)
	озеро	вдхр.		
A_t^* , км ²	9948	10 230	9940	—
A_i^* , км ²	243	230	250.7	—
A , км ²	9705	10 000	9690	9777
V , км ³	285.6	286.1	291	262
H_a , м	29.4	28.6	30.1	26.8
H_m , м	120	120	120	119
L_s , км	1963	2294	1810	—

* A_t — площадь озера общая; A_i — площадь островов.

Табл. 6. Уклоны дна Онежского озера (Верхнесвирского вдхр.) и его основных районов (м/км)

№	Лимнический район	Макс.	Среднее	СКО
1	Центральное Онего	37.8	0.8	0.9
2	Южное Онего	10.0	0.4	0.4
3	Большое Онего	112.5	3.2	3.2
4	Повенецкий залив	28.5	1.6	1.7
5	Малое Онего	12.6	0.9	0.9
6	Заонежский залив	14.5	1.0	1.0
7	Кондопожская губа	66.4	4.1	3.7
8	Петрозаводская губа	17.4	1.3	1.2
9	Кижские шхеры	16.5	1.2	1.0

10	Лижемская губа	30.8	3.5	3.1
11	Уницкая губа	30.3	2.8	2.6
	Онежское озеро	112.5	1.2	1.8
12	Верхнее течение р. Свирь	27.8	1.0	1.8
	Верхне-Свирское вдхр.	112.5	1.2	1.8

Табл. 7. Площадь литорали Онежского озера, его основных районов и Верхне-Свирского вдхр.

№	Лимнический район	L_t^* , км	Хар-ки	A	A_2	A_5	A_{10}
1	Центральное Онего	198	км ²	3335	36	82	194
			%	100	1.1	2.5	5.8
2	Южное Онего	183	км ²	2065	42	121	387
			%	100	2.0	5.9	18.7
3	Большое Онего	292	км ²	949	34	68	121
			%	100	3.6	7.2	12.8
4	Повенецкий залив	566	км ²	902	125	222	346
			%	100	13.9	24.6	38.4
5	Малое Онего	240	км ²	882	41	88	186
			%	100	4.7	10.0	21.1
6	Заонежский залив	248	км ²	724	59	149	281
			%	100	8.1	20.6	38.8
7	Кондопожская губа	248	км ²	222	17	36	68
			%	100	7.7	16.2	30.6
8	Петрозаводская губа	62	км ²	165	10	27	52
			%	100	6.1	16.4	31.5
9	Кижские шхеры	359	км ²	201	57	127	187
			%	100	28.4	63.2	93.0
10	Лижемская губа	200	км ²	115	20	29	42
			%	100	17.4	25.2	36.5
11	Уницкая губа	318	км ²	145	27	59	99
			%	100	18.6	40.7	68.3
	Онежское озеро	2914	км ²	9705	467	1009	1963
			%	100	4.8	10.4	20.2
12	Верхнее течение р. Свирь	330	км ²	200	140	170	196
			%	100	70.0	85.0	97.5
	Верхне-Свирское вдхр.	3244	км ²	10 000	699	1272	2251
			%	100	7.0	12.7	22.5

* L_t — длина береговой линии с островами; A_2 , A_5 и A_{10} — площади литоральной зоны, ограниченные береговой линией и изобатами 2, 5 и 10 м соответственно.

Рисунки

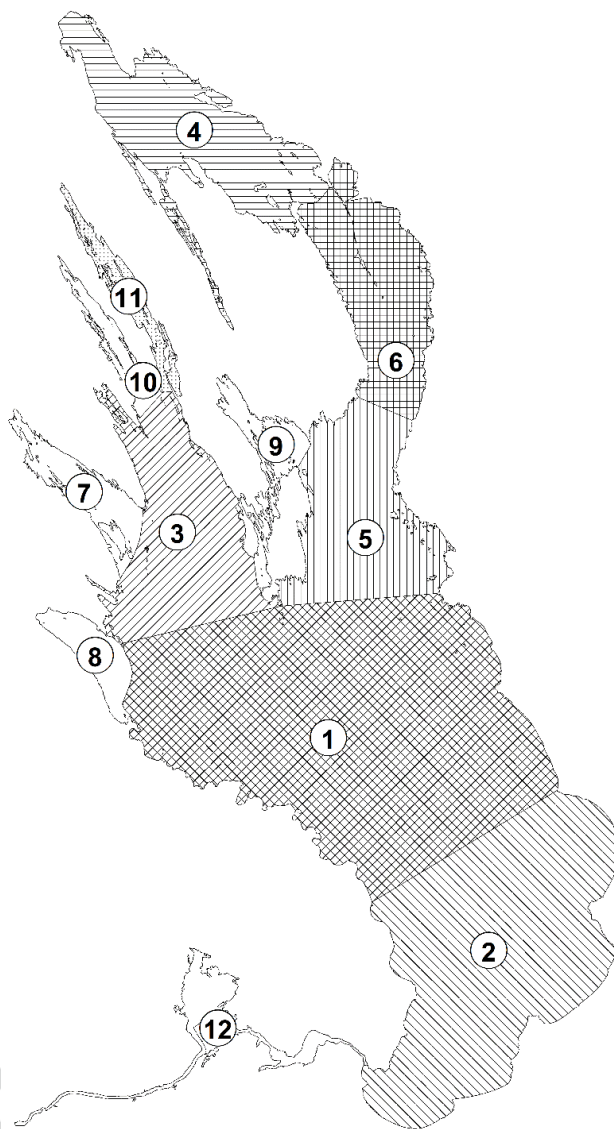


Рис. 1. Основные лимнические районы Онежского озера (Верхнесви́рского вдхр.) (по Филатов, 2015): 1 — Центральное Онего, 2 — Южное Онего, 3 — Большое Онего, 4 — Повенецкий залив, 5 — Малое Онего, 6 — Заонежский залив, 7 — Кондопожская губа, 8 — Петрозаводская губа, 9 — Кижские шхеры, 10 — Лижемская губа, 11 — Уницкая губа, 12 — верхнее течение р. Свирь.

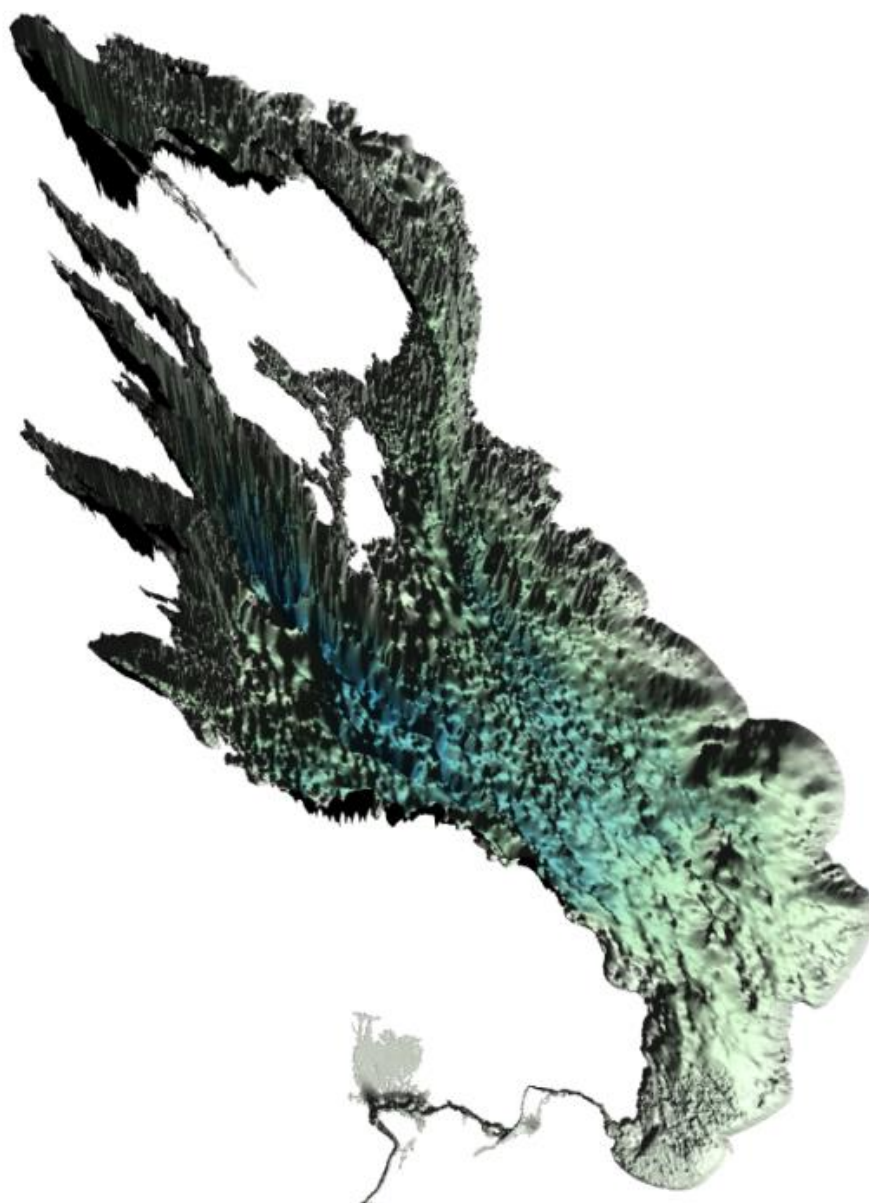


Рис. 2. Авторская ЦБМ Онежского озера (Верхнесвирского вдхр.) с пространственным разрешением 20 м.

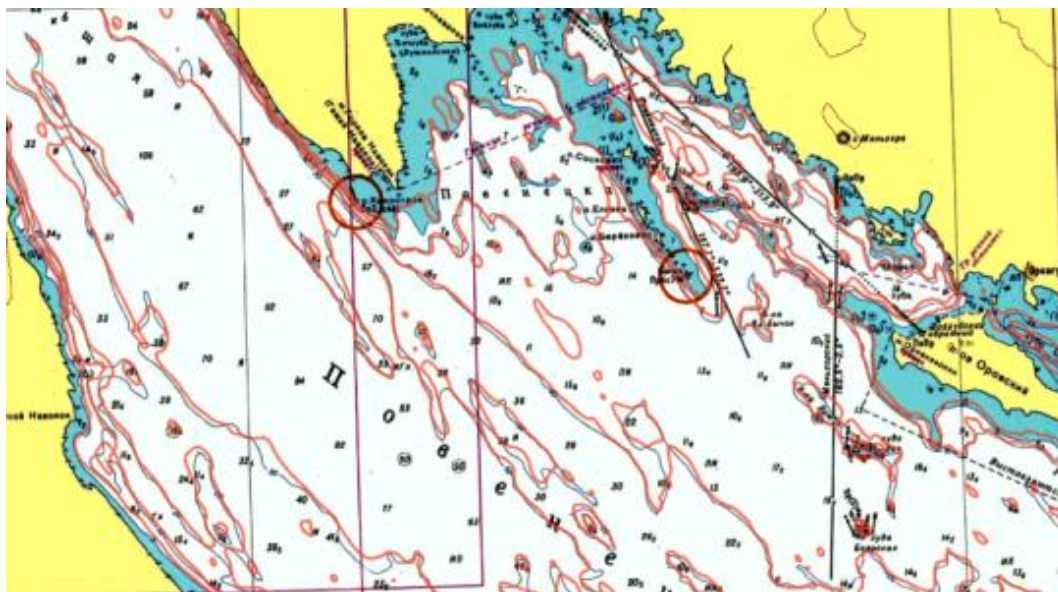


Рис. 3. Сравнение авторской ЦБМ Онежского озера с исходной картой-лоцией (Лоция, 1999) (район Повенецкого залива); красные линии — изобаты по ЦБМ, черные — изобаты карты-лоции.

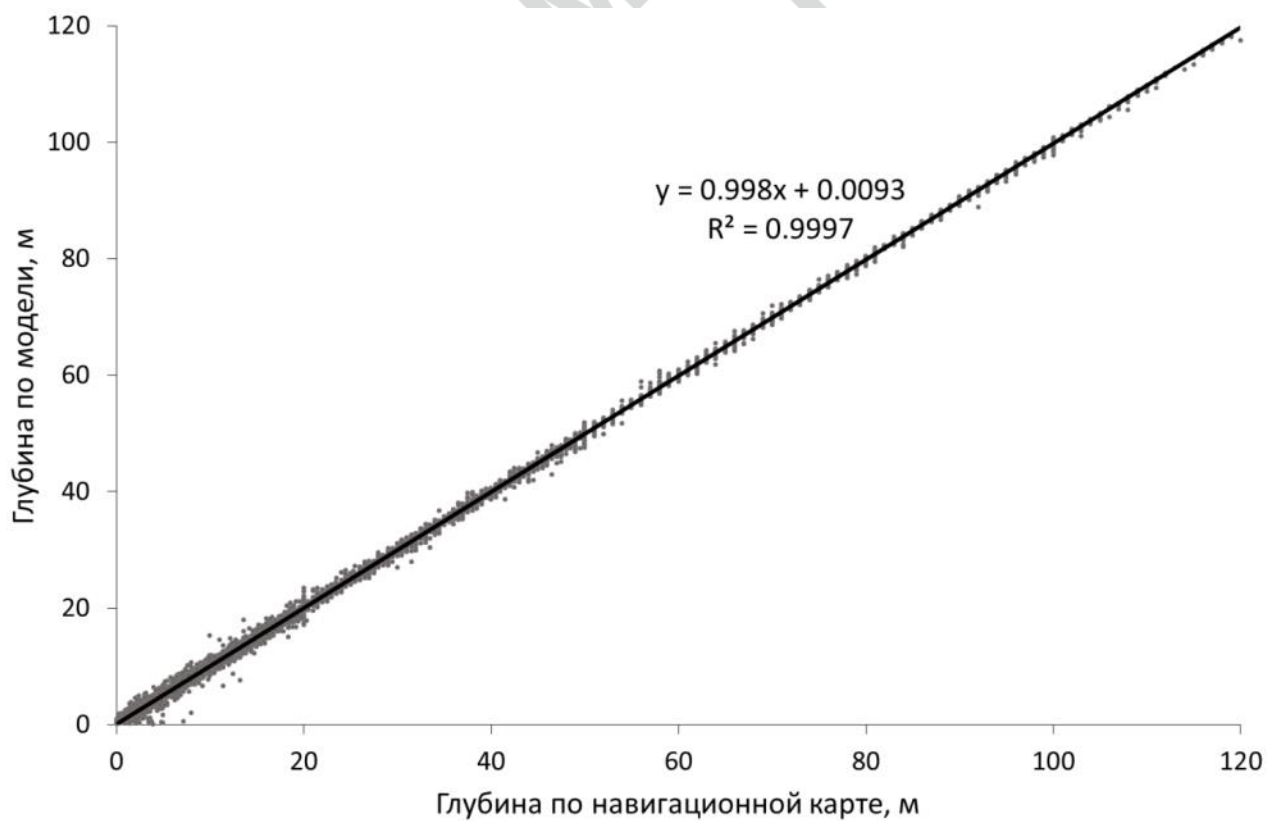


Рис. 4. Связь между значениями ЦБМ и глубинами, полученными оцифровкой.

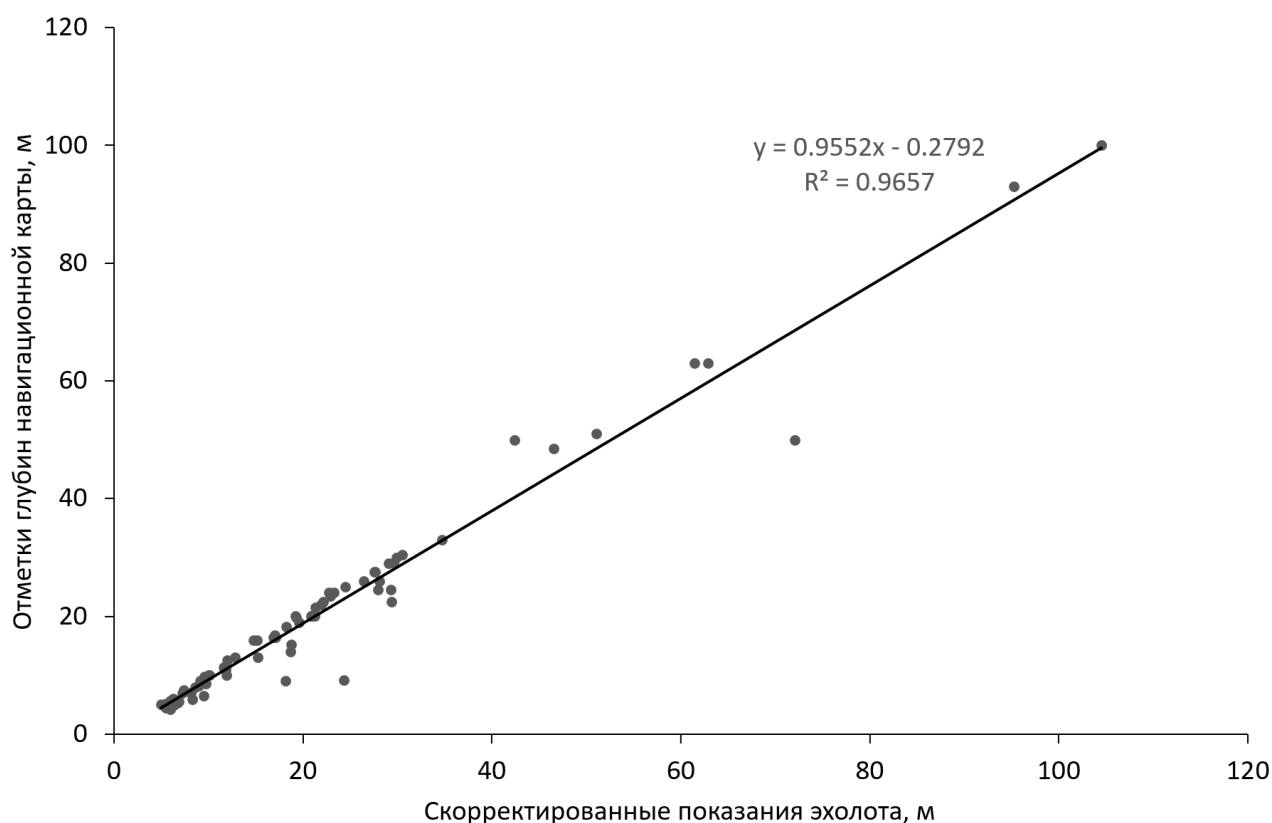


Рис. 5. Связь между скорректированными показаниями эхолота и отметками навигационной карты.

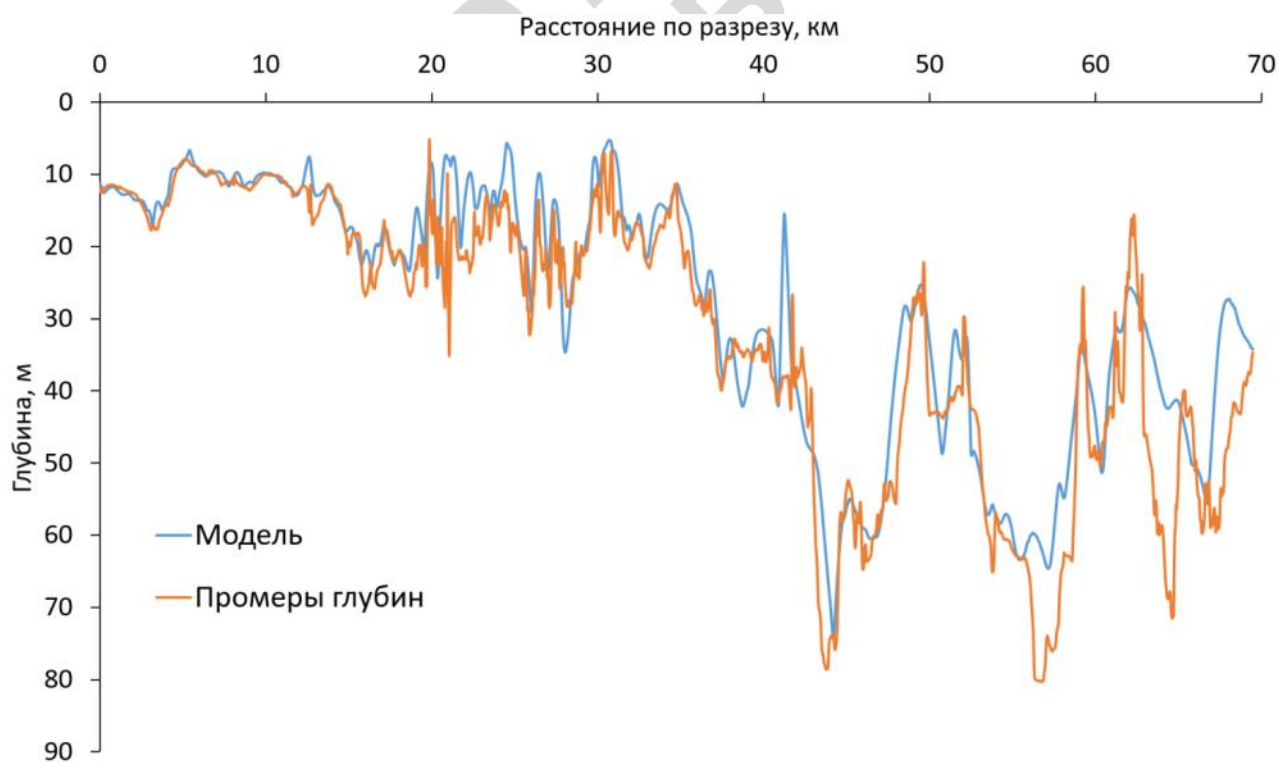


Рис. 6. Сопоставление рельефа дна по ЦБМ и эхолотным промерам по профилю Уницкой губы и Большого Онего. Расстояние указано от вершины Уницкой губы.

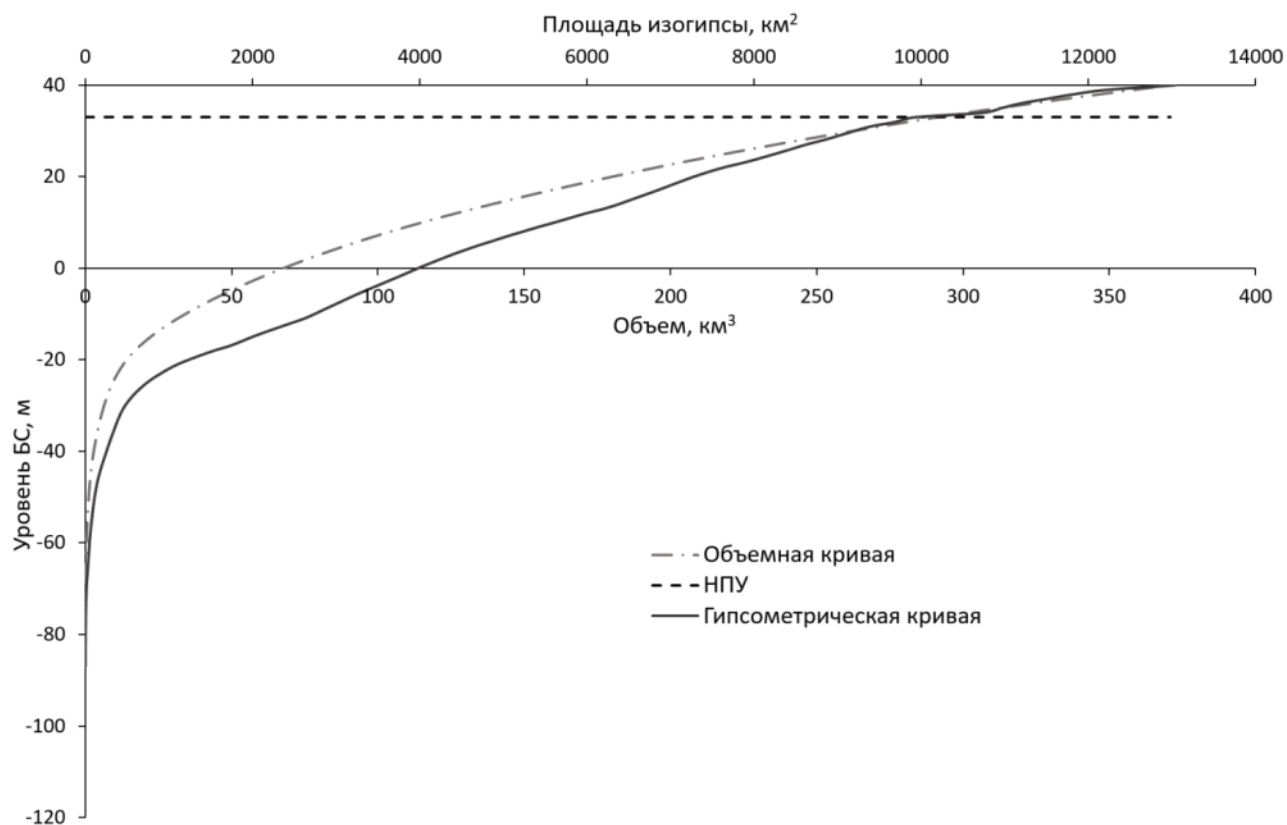


Рис. 7. Объемная и гипсометрическая кривые Верхне-Свирского вдхр.

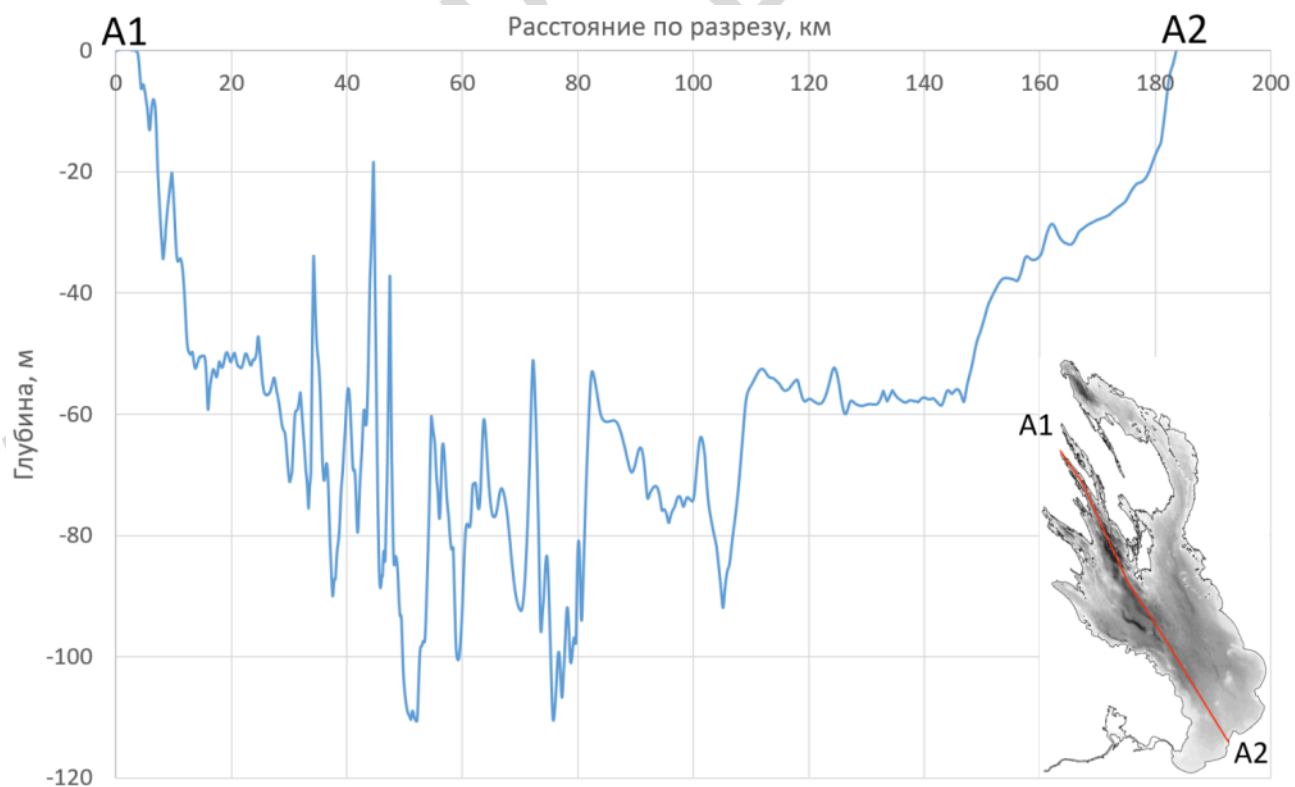


Рис. 8. Характерный профиль дна Онежского озера (продольный разрез A1-A2).



Рис. 9. Характерный профиль дна Онежского озера (поперечный разрез B1-B2).

New digital bathymetric model of Lake Onego (Verhne-Svirskoe reservoir): development, verification, application²

Maksim Sergeevich Potakhin^{1,2}, Mikhail Borisovich Zobkov¹, Pavel Yurievich Belyaev^{1,3}

¹Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, 185910, Republic of Karelia, Petrozavodsk, St. Pushkinskaya, 11

²Petrozavodsk State University, Russian Federation, 185910, Republic of Karelia, Petrozavodsk, Lenin Ave., 33

³All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, Russian Federation, 190121, St. Petersburg, English pr., 1

PotakhinM.S.: mpotakhin@mail.ru

ZobkovM.B.: ya-mikhailz@yandex.ru

BelyaevP.Yu.: borat78@yandex.com

Annotation

A new digital bathymetric model of Lake Onego (Verhne-Svirskoe Reservoir) has been developed based on navigation charts. Verification of the model was carried out by comparing the modeled bathymetry with the cartographic materials, echo sounder measurements, and previous bathymetric models. Spatial resolution of the developed model is 50 m in plane and 2 m in depth. Despite these identified deviations in depth, the model has a good agreement between raster values and measured depth, which can be considered sufficient to calculate the main morphometric characteristics of the lake and solve other applied tasks. Morphometric characteristics of the water body (within the boundaries of the lake and reservoir separately) and its limnic regions were updated based on the developed digital model. In particular, values of the water area, water volume, average and maximum depth, littoral area (up to isobaths 2, 5, and 10 m) of limnic regions were specified for the first time based on the developed bathymetric model. The Central and South Onego are the largest regions by water area, while the Large Onego, the Central part of the lake and the Povenets Bay are the deepest. The largest areas of

²The study was supported by the Russian Science Foundation grant #18-17-0017 (development and application of digital model) and the State Research Program of NWPI KarRC RAS (verification of digital model)

the lake in terms of the littoral area value are the Central part and the South Onego, while the maximum percentage of the littoral area was observed in the Kizhi skerries and for most of the northern bays of the lake. The digital bathymetric model was applied to reconstruct the lake development in the post-glacial period, as well as in mapping the Quaternary deposits of the lake basin. The digital model can also be used as a basis for 3D modeling of geomorphologic, thermo-hydrodynamic and sedimentation processes.

Keywords: Lake Onego, digital model, bottom topography, morphometric characteristics, geographic information systems

References

- Amante, C.J., Eakins, B.W. (2016). Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models. *Journal of Coastal Research*. 76, 123-133. <https://doi.org/10.2112/SI76-011>
- Atlas of the unified deep-water system of the European part of the Russian Federation* (2007). T. 3. Ch. II. Volgo-Baltiiskii vodnyi put'. Reka Svir'. SPb. (In Russian)
- Belyaev, P.Yu., Rybalko, A.E., Subetto, D.A., Zobkov, M.B., Fedorov, G.B. (2021). Quaternary deposits and geomorphological features of Lake Onego. *Geographical Bulletin*, 56(1), 6-16. (In Russian) <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-6-16> (In Russian)
- Chernyaeva, F.A. (1973). Morphometric characteristics of Lake Onego. In: *Teplovoi rezhim Onezhskogo ozera*. L.: Nauka Publ., 7-24. (In Russian)
- Edelstein, K.K., Grechushnikova, M.G., Datsenko, Yu.S., Puklakov, V.V. (2012). Diagnostic modeling of within-water processes in reservoirs. *Vodnyye resursy*, 39(4), 437-451. (In Russian)
- Filatov, N.N., ed. (2010). *Onego Lake. Atlas*. Petrozavodsk: KarRC RAS Publ.. (In Russian)
- Filatov, N.N., ed. (2015). *The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impacts*. Petrozavodsk: KarRC RAS Publ. (In Russian)
- Galakhina, N., Zobkov, M., Zobkova, M. (2022). Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 17:100619. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>

Gorlach, A., Hang, T., Kalm, V. (2017). GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus. *Boreas*, 46, 486-502. <https://doi.org/10.1111/bor.12223>

Håkanson, L. (1981). *A Manual of Lake Morphometry*. Berlin: Springer.

Ignatov, E.I., Borshchenko, E.V., Zagoskin, A.L., Zemlyanov, I.V., Sanin, A.Yu., Tersky, P.N., Fatkhi, M.O. (2017). Connection between the geological structure of Lake Onego region, its topographic evolution and the dynamics of the lake shores. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 3, 65-78. (In Russian)

Jakobsson, M., Björck, S., Alm, G., Andrén, T., Lindeberg, G., Svensson, N.-O. (2007). Reconstructing the Younger Dryas ice dammed lake in the Baltic Basin: bathymetry, area and volume. *Global and Planetary Change*, 57 (3), 355-370. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.006>

Kaufman, Z.S., ed. (1990). *Ecosystem of Lake Onego and tendencies of its change*. L.: Nauka Publ. (In Russian)

Kitaev, S.P. (1984). *Ecological foundations of bioproductivity of lakes in different natural zones*. M.: Nauka Publ. (In Russian)

Libina, N.V., Nikiforov, S.L. (2020). Digital elevation models of bottom in operational oceanology system. *Okeanologiya*, 60(6), 970-977. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0030157420050135>

Sailing directions of Lake Onego (1999). SPb. (In Russian)

Lozovik, P.A., Zobkov, M.B., Borodulina, G.S., Tokarev, I.V. (2019). Effects of external water exchange between bays of lakes on chemical indicators of water. *Vodnyyeresursy*, 46(1), 91-101. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0321-059646191-101>

Medeiros, S.C., Ali, T., Hagen, S.C., Raiford, J.P. (2017). Development of a Seamless Topographic/Bathymetric Digital Terrain Model for Tampa Bay, Florida. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77(12), 1249-1256. <https://doi.org/10.14358/PERS.77.12.1249>

Menshutkin, V.V., Rukhovets, L.A., Filatov, N.N. (2013). Ecosystem modeling of freshwater lakes (review). 1. Hydrodynamics of lakes. *Vodnyye resursy*, 40(6), 566-582. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0321059613060096>

Menshutkin, V.V., Rukhovets, L.A., Filatov, N.N. (2014). Ecosystem modeling of freshwater lakes (review). 2. Models of freshwater lake's ecosystem. *Vodnyyeresursy*, 41(1), 24-38. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0321059614010088>

Milyutina, I.Yu., Sapozhnikova, A.A., Pavlovsky, A.E. (2019). The role of the storage capacity of the Ivinsky spill in the operation mode of the Verkhne-Svirsky reservoir. *Vodokhranilishcha Rossiiskoi Federatsii: sovremennye ekologicheskie problemy, sostoianie, upravlenie*. Novocherkassk, 182-189. (In Russian)

Molchanov, I.V. (1946). *Lake Onego*. L. (In Russian)

Naumenko, M.A. (2000). New definition of morphometric characteristics of Lake Onego. *Doklady Akademii nauk*, 370(3), 393-396. (In Russian)

Naumenko, M.A. (2013). Analysis of morphometric characteristics of bottom relief of Lake Ladoga based on digital models *Izvestiia RAN. Serii geograficheskaya*, 1, 62-72. (In Russian)

Nikiforov, S.L., Koshel, S.M., Frol, V.V., Popov, O.E., Levchenko, O.V. (2015). On the methods for construction seabed digital elevation models (using the example of the White Sea). *Okeanologiya*, 55(2), 326-336. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0030157415020136>

Rules for the use of water resources of the cascade of reservoirs on the Svir River (Verkhne-Svirskoye and Nizhne-Svirskoye) (2014). M. (In Russian)

Raspopov, I.M. (1985). *Macrophytes of large lakes in the North-West of the USSR*. L.: Nauka. (In Russian)

Rul'kov, D.I. (1973). *Navigation and location*. M.: Transport. (In Russian)

Rukhovets, L.A., Petrova, N.A., Menshutkin, V.V., Astrakhantsev, G.P., Minina, T.R., Poloskov, V.N. (2010). Modeling the transformation of the ecosystem of Lake Ladoga with a decrease in phosphorus load. *Doklady Akademii nauk*, 434(5), 684-687. (In Russian)

Sergeev, I.S., Glebova, A.B. (2017). Late-Quaternary transgression of the White Sea as deduced from data on GIS-based bottom relief analysis. *Geografiya i prirodnye resursy*, 3, 171-178. (In Russian) [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3\(171-178\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(171-178))

Sherstyankin, P.P., Alekseev, S.P., Abramov, A.M., Stavrov, K.G., De Batis, M., Hus, R., Canals, M., Casamor, H. L. (2006). Computer-based bathymetric map of Lake Baikal. *Doklady Akademii nauk*, 408(1), 102-107. (In Russian)

Subetto, D.A., Potakhin, M.S., Zobkov, M.B., Tarasov, A.Yu., Shelekhova, T.S. Gurbich, V.A. (2019). Lake Onego development in the Late Glacial assessed with the use of GIS technologies. *Geomorfologiya*, 3, 83-90. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019383-90>

Tibor, G., Sade, R., Hall, J.K., Ben-Avraham, Z., Nishri, A. Lake Bathymetry and Bottom Morphology. (2014). In: Zohary T., Sukenik A., Berman T., Nishri A., eds. *Lake Kinneret: Ecology and Management*, 59-68. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8944-8_4

Vassiljev, J., Saarse, L. (2013). Timing of the Baltic Ice Lake in the eastern Baltic. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 85, 9-18. <https://doi.org/10.17741/bgsf/85.1.001>

Vyruchalkina, T.Yu. (2020). Development of a digital elevation model of Kara-Bogaz-Gol bay. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 4, 139-144. (In Russian) <https://doi.org/10.17076/lim1199>

Zhu, S., Liu, B., Wan, W., Xie, H., Fang, Y., Chen, X., Li, H., Fang, W., Zhang, G., Tao, M., Hong, Y.A (2019). New Digital Lake Bathymetry Model Using the Step-Wise Water Recession Method to Generate 3D Lake Bathymetric Maps Based on DEMs. *Water*. 11:1151.<https://doi.org/10.3390/w11061151>

Zobkov, M., Potakhin, M., Subetto, D., Tarasov, A. (2019). Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations. *Journal of Paleolimnology*, 62(1), 53-71. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021>

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ