

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА КАК ИСТОЧНИК ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ ДНА

© 2022 г. Д. С. Дудакова^{1,*}, С. Н. Юдин²

¹ГБУН Институт озера РИО РАН ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Кивиярви», Петрозаводск, Россия

*E-mail: Judina-D@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.04.2021 г.

После доработки 04.12.2021 г.

Принята к публикации 10.01.2022 г.

На основе собственных наблюдений, литературных и фондовых источников создана база первичных данных, обобщающая доступные лимнологические, геофизические, геологические, аналитические и биологические данные по акватории Ладожского озера. База данных представляет собой набор атрибутивных таблиц с координатной привязкой точек, что позволяет делать необходимые выборки и строить наборы карт по любому параметру. В качестве основной ячейки хранения информации выбран полигон размером 1×1 км, который соответствует разграфке топокарт в прямоугольной системе координат масштаба 1:100000. Составлен авторский вариант цифровой батиметрической модели Ладожского озера. На основе батиметрической модели и других материалов из базы данных построена рабочая схема ландшафтов Ладожского озера. В результате анализа геоморфологической, геолого-геофизической и биологической информации выполнено районирование донных ландшафтов. Выделено 11 ландшафтных районов: Северо-Ладожское шхерное побережье, Северо-Ладожский ступенчатый склон, Северо-Ладожская впадина, Валаамско-Салминская островная гряда, Центрально-Ладожская холмистая равнина, Восточно-Ладожская пологохолмистая равнина, Восточно-Ладожский склон, Свирский склон, Западно-Ладожский склон, Южно-Ладожская пологоволнистая равнина, Южно-Ладожская пологонаклонная равнина. В северных районах преобладают ландшафты на резко расчлененном структурно-денудационном рельефе кристаллических пород; центральные и южные районы представлены ледниковыми и озерно-ледниковыми ландшафтами на аккумулятивном рельефе. Проведены детальные батиметрические замеры, подробное изучение донных осадков и ландшафтных фаций, состав и распределение биоты на эталонных ячейках для разных типов ландшафтов. Информацию, полученную при детальных исследованиях ячейки-эталона, можно экстраполировать на всю площадь распространения данного типа ландшафта с учетом особенностей мезорельефа.

Ключевые слова: геологическое картирование, подводные ландшафты и фации, ландшафтное районирование

DOI: 10.31857/S0435428122020055

ВВЕДЕНИЕ

Ладожское озеро представляет собой уникальную экосистему и является важным стратегическим объектом. В процессе многолетних исследований для озера накоплен огромный объем геолого-геофизической, геохимической, гидрологической и биологической информации, которая рассредоточена в различных источниках и частично не имеет точной координатной привязки [1–4]. Локальная база данных для предварительного выделения донных ландшафтов по абiotическим и биотическим характеристикам создавалась коллективом ВНИИОкеангеология по результатам работ 1989–1992 гг. [1]. С тех пор

накопились новые материалы, появились новые методы изучения дна, например, такие как подводная видеосъемка, успешно реализуемая на Ладожском озере в последние годы Институтом озера РИО РАН [5, 6]. Использование ГИС-технологий облегчает хранение информации, ее статистическую обработку и визуализацию результатов с созданием плоских и трехмерных моделей [7]. Актуальным на данный момент является создание инструмента, который позволил бы вмещать в себя многие характеристики состояния Ладожского озера и корректироваться по мере поступления новой информации.

Цель исследования — создание простой в работе и доступной для постоянного редактирования цифровой модели ландшафтов дна Ладожского озера на основе первичных картографических данных из литературы, фондовых и архивных источников и собственных материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

База первичных данных модели донных ландшафтов включает лимнологические, геофизические, геологические, аналитические и биологические данные. В ходе работ использовались все доступные опубликованные сведения по результатам работ Ладожской экспедиции Института озероведения, начиная с момента ее существования (1956 г.) до настоящего времени [2–4], а также опубликованные данные других организаций [1, 8–11]. Учтены собственные материалы авторов по изучению бентоса, связанного с ним комплекса абиотических факторов и донных ландшафтов разных частей Ладожского озера и береговой зоны (2007–2020 гг.) [5, 6, 12–15].

Оцифровывались растровые изображения различных карт: батиметрической, геологической (кристаллических пород и четвертичных отложений), геоморфологической, морфоструктурной, карты типов грунтов, карты современной седиментации, карты течений и интенсивности гидродинамики, карты летнего распределения макрофитов, карты плотности макробентоса, карты плотности доминант бентоса. Для оцифровки магнитных и гравиразведочных материалов использованы данные цифровых геофизических карт Петербургской геофизической экспедиции на территории Ладожского и Онежского озер [16].

Привязка растров и перевод полигональных, линейных и точечных файлов в векторный вид проводились с использованием программ ArcView 3., ArcMap 8. и Surfer 9. Данные с результатами различных видов исследований оформлялись в виде таблиц в программах MsExcel и Access.

Для удобства поиска информации в базе данных представляемой ландшафтной модели вся площадь акватории Ладожского озера и ближайшей прибрежной части была разбита на ячейки размером 1×1 км (рис. 1), которые соответствуют разграфке топокарт масштаба 1: 100 000 в прямоугольной системе координат Пулково, 1942, зона 6. Полигоны этих ячеек были построены по координатам углов километровой сетки, а нумерация этих ячеек складывалась из координат юго-западного угла ячейки. Всего построено 17 765 ячеек по акватории озера, 3513 — ближайшему побережью. Параллельно созданы файлы с точечными объектами, где точка привязана к центру ячейки. В атрибутивных таблицах каждая полигональная ячейка привязана в пространстве и характеризу-

ется набором признаков в цифровой или ранговой форме, что позволяет строить любые комплекты карт (рис. 1). В дальнейшем все новые наблюдения, привязанные к определенному пронумерованному квадрату, могут увязываться с ретроспективными данными.

Для большей части акватории, сравнительно однородной по глубинам и другим признакам, разбивка на полигоны площадью 1×1 км достаточна. Для прибрежных участков шхерного района с сильно изрезанной береговой линией и многочисленными островами, сильной изменчивостью признаков, эта основная ячейка может быть разбита до 100×100 м. Ландшафтные единицы обладают в модели свойством вложенности. Разные масштабы опираются на ячейки, которые можно дробить, таким образом, спускаясь до масштабов отдельных фаций в локальном районе. На этих участках основное значение имеют собственные данные, полученные при детальном наблюдении: замеры глубин с густым шагом, подробное изучение состава фаций донных осадков, состав и распределение биоты: макрофитов, зооперифитона, макро- и мейзообентоса. Учитываются глубина и угол наклона; литологический состав выделяемых фаций: коренная порода и ее разновидность, донные осадки и их разновидности, признаки гидродинамического воздействия. Детализация наблюдений на полигонах проводилась по сети профилей, на которых выполнялись: эхолотирование, фотосъемка дна подводным аппаратом с координатной привязкой точек наблюдений, визуальное обследование характера донной поверхности и состава биоты на экране монитора [5]. На прибрежных участках суши в ходе геологических наблюдений изучался состав горных пород; для оконтуривания участков распределения макрофитов использовались аэрофотоснимки, полученные с квадрокоптера DJI Phantom 2 с камерой GoPro-3, разрешением от HD до 4K, изменяемым углом $0-120^\circ$, частично — со снимков Google Earth. Координатная привязка собственных точек наблюдений осуществлялась спутниковым GPS-навигатором Garmin-78 в географических координатах World Geodetic System (WGS) 1984, которая затем пересчитывалась в систему координат Пулково-1942. Некоторые результаты изучения эталонных участков были отражены в наших предыдущих публикациях [13 и др.]. Информацию, полученную при детальных исследованиях ячейки-эталона, можно экстраполировать на всю площадь распространения данного типа ландшафта с учетом особенностей мезорельефа.

Каждая ячейка может наполняться информацией по мере проведения полевых ландшафтных исследований. Эта информация — форма профиля, вид поверхности с учетом литологии и биоты, информация по гидродинамике локального квад-

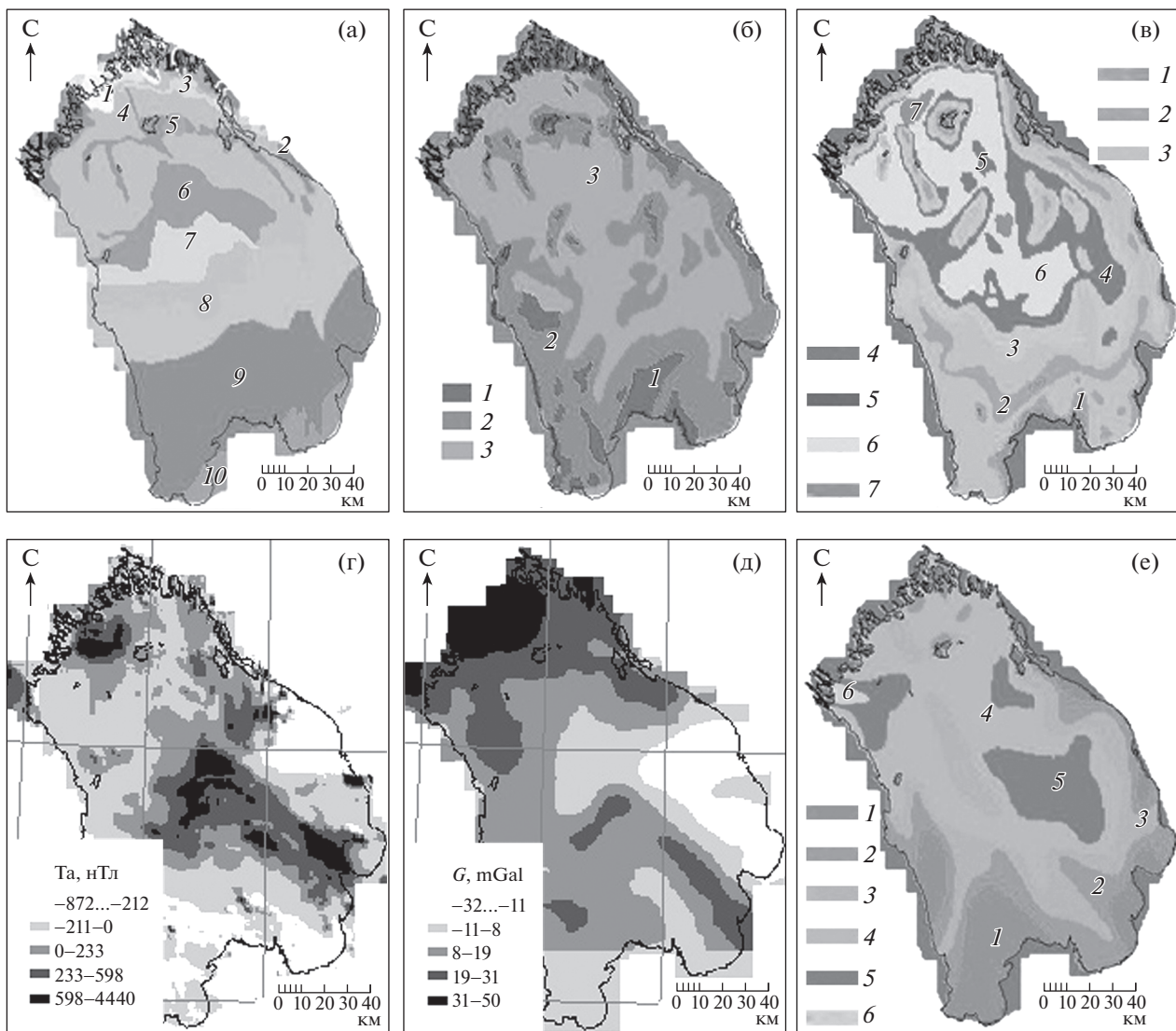


Рис. 1. Отображение признаков (слоев) цифровой базы данных в ячейках 1×1 км по акватории Ладожского озера.

(а) – **Дочетвертичные образования. Архей-протерозой:** 1 – метаморфические и интрузивные породы; **рифей:** 2 – граниты-рапакиви, 3 – базальты, 4 – песчаники, 5 – габбродолериты, 6 – осадочные, эффузивные и субвулканические образования, 7 – осадочные породы и покровы базальтов; **венд:** 8 – песчаники, алевролиты; 9 – глины с прослоями алевролитов и аргиллитов; 10 – алевролиты, глины.

(б) – **Четвертичные отложения. Ледниковые отложения:** 1 – валунные супеси и суглинки; **ледниково-озерные отложения:** 2 – алевроиты, пески сортированные, глины, суглинки; **озерные отложения:** 3 – пески, переслаивающиеся с супесями, суглинками, глинами.

(в) – **Гранулометрические типы современных отложений:** 1 – глыбы и валуны; 2 – галька и гравий с песком; 3 – разнозернистые пески; 4 – пелитово-песчано-алевритовый миктит; 5 – песчанисто-пелитовый алеврит; 6 – алевритовый пелит; 7 – пелит.

(г) – **Аномальное магнитное поле, нТл.**

(д) – **Аномальное поле силы тяжести, мГл.**

(е) – **Концентрация углерода органического, % массы:** 1 – менее 0.1, 2 – 0–0.3, 3 – 0.3–1, 4 – 1–3, 5 – 3–4, 6 – более 4.

рата и прочие значимые в оценке ландшафтов характеристики в зависимости от того, какое оборудование применялось при проведении исследования. В случае, когда полевая информация указывает на ошибку в созданной модели, тип

ландшафта в квадрате уточняется. Таким образом, появляется возможность для совершенствования модели и приведения ее в соответствие с реальными показателями, существующими в природе.

Таблица 1. Основные характеристики цифровой батиметрической модели

Параметры модели	Вся акватория	Шхерная северная часть	Северо-западная часть	Северо-восточная часть	Южная часть
Общее количество точек	15078	3563	4092	2416	5007
Количество базовых точек с глубинами, в пределах акватории	11656	2046	2751	2128	4731
Количество точек, на береговой линии	3422	1515	1341	288	278
Площадь акватории, км ²	17840	432	4028	4178	9202
Количество точек на 1 км ²	0.85	8.27	1.02	0.58	0.54
Шаг сетки, км	1 × 1	1 × 1	1 × 1	1 × 1	1 × 1

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Цифровая батиметрическая модель как основа для пространственного отображения ландшафтных признаков

Важнейшим ключевым признаком для выявления ландшафтов является геоморфологическая структура озерной котловины. В Институте озера РАН создана и широко используется цифровая модель подводного рельефа Ладожского озера [17]. Создание своего варианта рабочей батиметрической модели связано с необходимостью постоянного ее использования и корректировки, в том числе — в полевых условиях. Наличие собственного варианта цифровой модели дает право ее уточнения, добавляя новые точки глубин за счет информации с крупномасштабных топокарт и собственных данных эхолотирования. Наиболее актуально это для северного шхерного района Ладоги с наличием множества островов, сложной изрезанностью береговой линии. Основа новой цифровой батиметрической базы данных была сформирована в результате оцифровки навигационных карт [9]. Общее количество точек на всю площадь акватории составило 15078 (рис. 2). В связи со значительным различием морфологии дна озера сеть базовых точек глубин также неравномерна (табл. 1). В условиях сгущения и разрежения сети замеров в разных частях акватории для построения изолиний в пределах озера в программе Surfer 9 был использован метод интерполяции — Natural Neighbor Interpolation, с шагом сетки 1 × 1 км.

Математические возможности ГИС-программ позволяют создавать карты глубин с необходимой густотой изобат, определять крутизну склонов, дна озера и их направленность (рис. 3, а–в), строить продольные профили в разных направлениях (рис. 3, г), а также трехмерные модели.

Карта донных ландшафтов Ладожского озера на основе цифровой базы данных

Итогом работы с цифровой моделью на данном этапе явились создание рабочей схемы ландшафтов Ладожского озера и выявление их основных типов (рис. 4). Было выделено 29 подводных ландшафтов, которые можно объединить в три группы: прибрежные и ландшафты мелководных террас; ландшафты возвышенностей и склонов на структурно-денудационном рельефе и впадин на аккумулятивном рельефе; ледниковые и озерно-ледниковые ландшафты на аккумулятивном рельефе.

Ключевыми факторами для выделения ландшафтов Ладожского озера послужили геология и геоморфология котловины, по которым и приведены названия каждого конкретного вида. Остальные признаки выступают в качестве дополнительных. Особенности состава и структуры биологических сообществ в рамках каждого ландшафта требуют отдельного рассмотрения и не приводятся подробно в данной публикации. Следует отметить, что определенные биотические компоненты ландшафтов не везде укладываются в границы выделенных ландшафтных районов, и могут как различаться между собой в пределах одного ландшафта, так и охватывать несколько из них. Наибольшую актуальность донная биота, как ландшафтный элемент, приобретает при крупномасштабном картировании в прибрежной зоне для выделения ряда ландшафтных фаций, являющихся характерной особенностью береговых склонов [13, 14]. Примеры биоты, типичной для фациальных рядов на эталонных крупномасштабных участках, будут рассмотрены ниже.

Ландшафтные районы и их характеристика

Приведенная выше схема подводных ландшафтов Ладожского озера (рис. 4) послужила основой для проведения границ при региональном

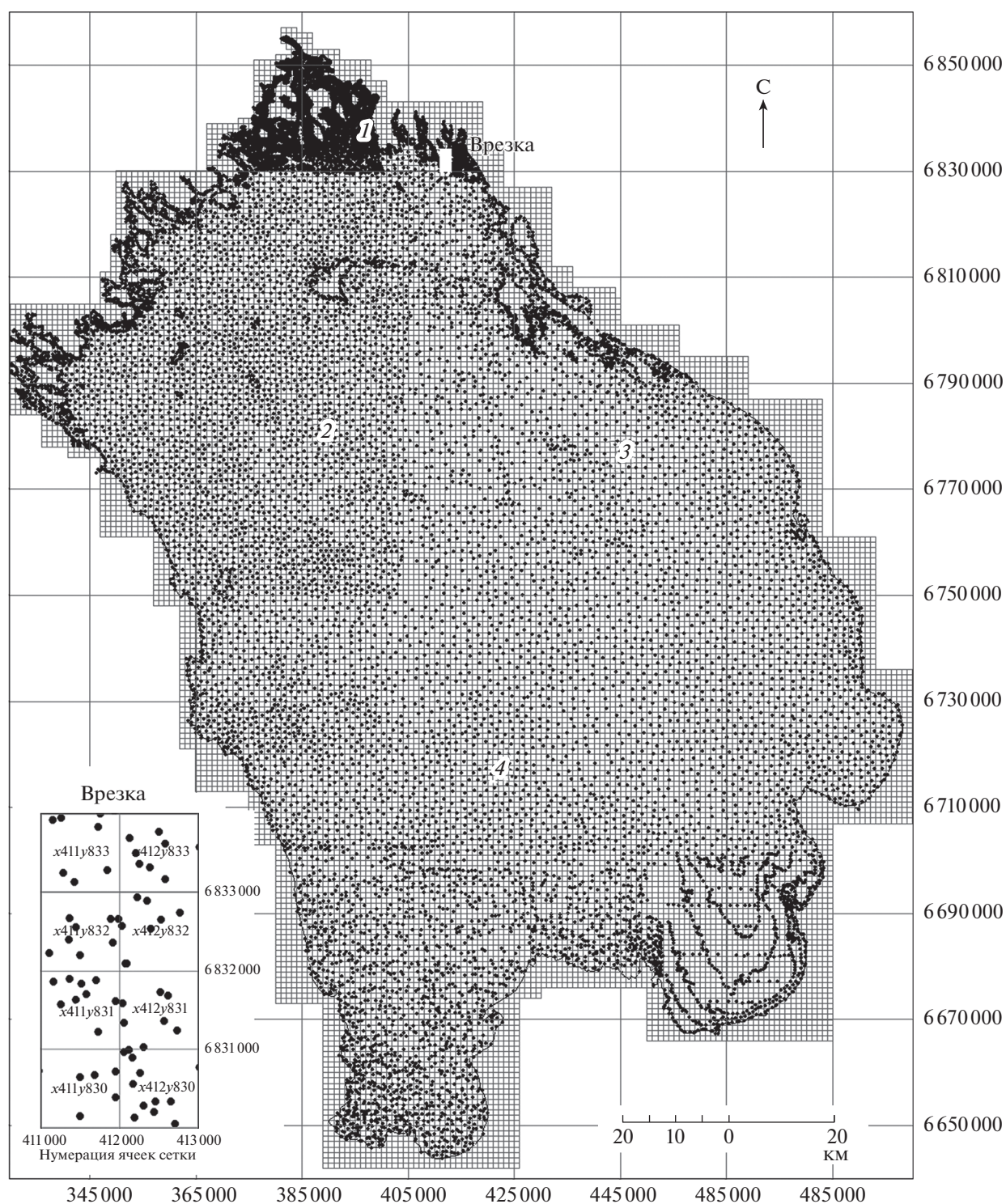


Рис. 2. Схема распределения базовых точек замера глубин для построения батиметрической карты Ладожского озера. 1 – шхерная северная часть; 2 – северо-западная часть; 3 – северо-восточная часть; 4 – центральная и южная части.

ландшафтном районировании (рис. 5). Составленная схема районов, в целом, повторяет основные компоненты регионального ландшафтного деления В.И. Гуревича [18], проведенного с по-

мощью кластерного анализа. Следует отметить, что в новой схеме увеличено количество ландшафтных районов в северной шхерной части и учтен тектонический фактор, в том числе наличие

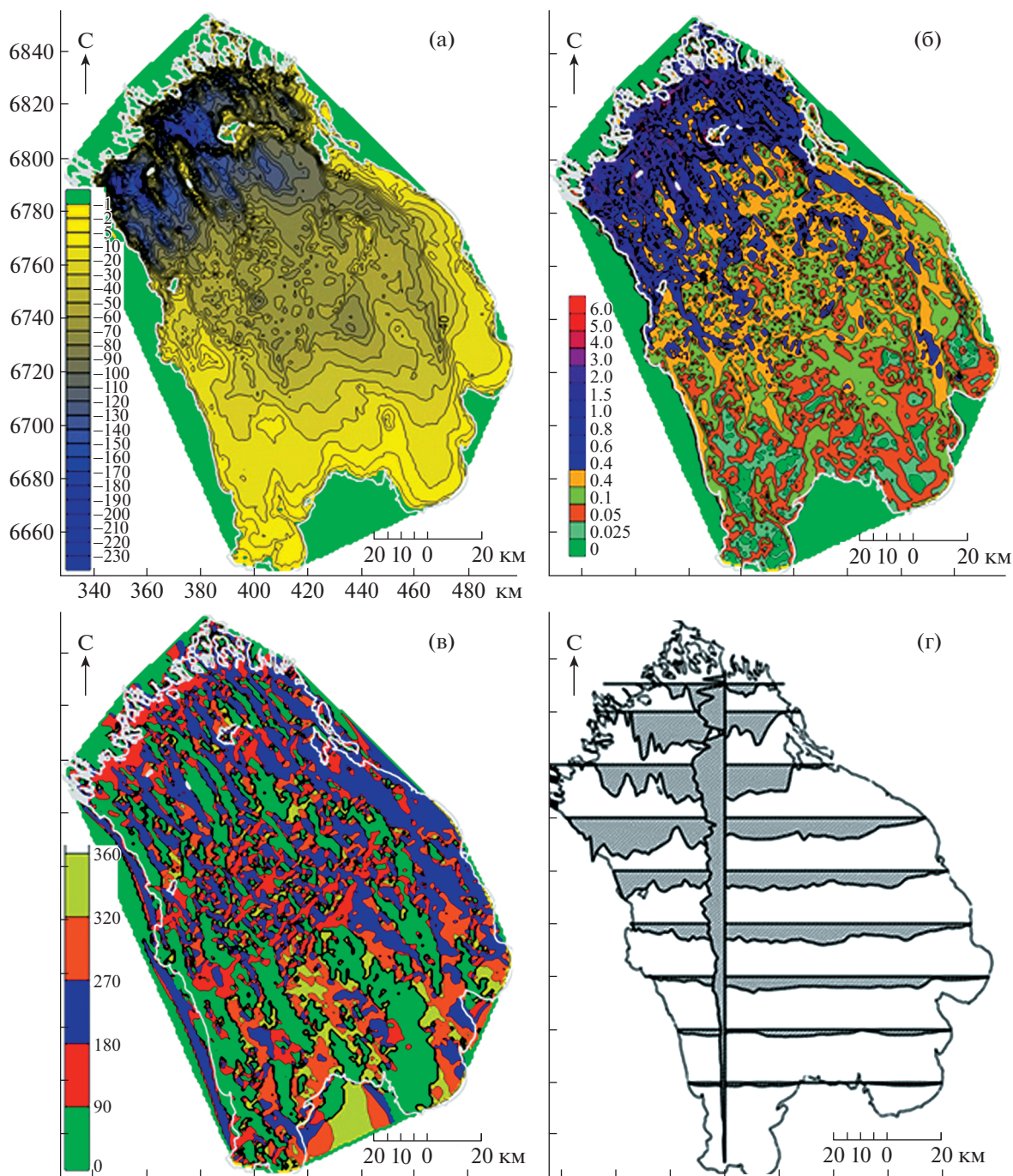


Рис. 3. Расчетные признаки батиметрической основы ландшафтной модели: (а) — схема распределения глубин; (б) — схема углов наклона (крутизна склонов); (в) — схема азимутов наклона; (г) — разрезы по профилям дна.

кольцевых структур, выделенных А.П. Световым [10], которые оказали влияние на формирование донных ландшафтов, особенно в северной и центральной частях озера. Каждый из выделенных районов обладает своими особенностями.

Северо-Ладожское ихерное побережье (I:1, 10, 11) — (здесь и далее по тексту раздела римскими цифрами обозначены номера ландшафтных районов на

рис. 4, 5; арабскими — номера типов ландшафтов в условных обозначениях к (рис. 4). Ландшафтные элементы акватории являются подводным продолжением форм рельефа, развитого в породах архея и протерозоя на побережье и островах. На площадях распространения гранитоидов и метатерригенных пород в интервале глубин до 20 м отмечаются структурно-денудационные склоны,

скальные береговые обрывы (10 — здесь и далее по тексту в круглых скобках, номера типов ландшафтов в условных обозначениях к рис. 4); горизонты слабоустойчивых сланцев слагают ложбины линейной и дуговой формы (11) глубиной 20–50 м.

Песчанисто-алевропелитовый и алевропелитовый типы грунтов сформировались в ходе осадконакопления в озерных условиях, на склонах развиты гравийные пески с глыбами коренных пород и валунами размытой морены.

Данный район характеризуется резкой сменой ландшафтных элементов — фаций — на крутосклонных участках в прибрежной зоне и в местах поднятий коренных пород [14]. В распределении биоты характерными являются наличие и высокое биоразнообразие фито- и зооперифитонных видов на скальных и твердообломочных осадках подводного склона. Сменяющие их мягкие осадки населяют достаточно разнообразные группы бентоса, среди которых к ландшафтообразующим на гравийно-галечных и песчаных грунтах можно отнести крупных двустворчатых (семейства Unionidae) и брюхоногих (Viviparidae, Lymnaeidae) моллюсков, литоральных амфипод, а на алевроитовых и алевропелитовых — олигохет, глубоководных реликтовых амфипод видов *Pallaseopsis quadrispinosa* (Sars, 1867), *Monoporeia affinis* (Lindstrom, 1855) и мизид *Mysis oculata* var. *relicta* (Samter & Weltner, 1900). Представители ихтиофауны также влияют на облик поверхности дна, особенно сложенного тонкими алевроитовыми и алевропелитовыми грунтами, и могут быть причислены к ландшафтным элементам. Наиболее массовым видом, оказывающим воздействие на дно, является корюшка европейская *Osmerus eperlanus* (Linnaeus, 1758).

Северо-Ладужский ступенчатый склон (II:2, 12, 13, 14, 15) — дугообразная эрозионно-тектоническая подводная ступень склона щита, шириной 6–8 км, ограничивается дуговыми разломами, разбивается диагональными дизъюнктивными нарушениями на мелкие блоки с мозаичным сочетанием горстов, глыбовых поднятий и грабенобразных оседаний. Площадь сложена преимущественно осадочно-вулканогенными породами рифея, архейские и протерозойские породы выходят на поверхность в эрозионных окнах [10, 11].

Уступ склона на границе со шхерной частью (12) шириной 1–1.5 км круто наклонен в сторону центра озера. Основная часть площади представлена пологонаклонной холмисто-грядовой равниной (15). В восточной части преобладает плоская мелководная равнина (13) с мелкими впадинами. Более глубокие крутосклонные изометрические впадины и ложбины с нефелоидным накоплением (14) шириной около 2 км составляют около 15% площади. Гранулометрический состав донных отло-

жений колеблется в различных частях от гравийных песков с глыбами и валунами и алевропелитов до пелитов и глин во впадинах.

Основными характерными элементами биоты являются реликтовые ракообразные *M. affinis*, *P. quadrispinosa*, *M. oculata* var. *relicta* и придонные виды рыб, по большей части, *O. eperlanus*.

Северо-Ладужская впадина (III:2, 4, 6, 16, 17, 18, 19) — структурно-денудационная грабенобразная депрессия (18), разделенная структурно обусловленными грядами северо-западной ориентировки (17), склоны гряд (19) имеют углы наклона до 3.5–5°. На восточном и западном бортах впадины располагаются приразломные узкие эрозионные субаквальные долины (16) субмеридионального направления.

В пределах возвышенностей отмечаются моренные и ледниково-озерные щебеночно-песчаные и песчаные отложения, возможны выходы коренных пород, на остальной части развиты озерные пелитовые осадки.

Основными характерными представителями фауны района являются реликтовые ракообразные: амфиподы и мизиды.

Валаамско-Салминская островная гряда (IV:3, 20, 21, 22) сложена устойчивыми к денудации рифейскими субвулканическими габбро-долеритами Валаамского комплекса. В результате препаирования силла в этом районе были сформированы: возвышенности, образованные за счет абразии силлов габбро-долеритов (20); склоны возвышенностей рифейских субвулканических силлов (21); впадины с плоским дном на пологозалегающих породах рифея (22). Донные отложения представлены дресвяно-щебеночно-песчаными и песчаными осадками, алевропелитами.

Наличие большого числа скальных берегов также обуславливает формирование биологических сообществ, характерных для фиордово-шхерного района, т.е. многочисленной и хорошо развитой перифитонной флорой и фауной на твердых грунтах в мелководной части и высоким обилием реликтовых ракообразных, а местами — олигохет, на больших глубинах.

Центрально-Ладужская холмистая равнина (V:23, 24, 25) и Восточно-Ладужская пологохолмистая равнина (VI:22, 23, 25) располагаются вблизи центра озера, совпадая с центральной кольцевой структурой. Дочетвертичные образования представлены преимущественно осадочными и эффузивными рифейскими образованиями, по гравиразведке предполагается наличие массива гранитов-рапакиви на небольшой глубине. Оба района представляют собой пологоволнистую и всхолмленную озерно-ледниковую равнину (23), в их пограничных частях прослеживаются озовые водно-ледниковые и краевые конечно-моренные гряды (25). Ориентировка этих гряд изогнутая,

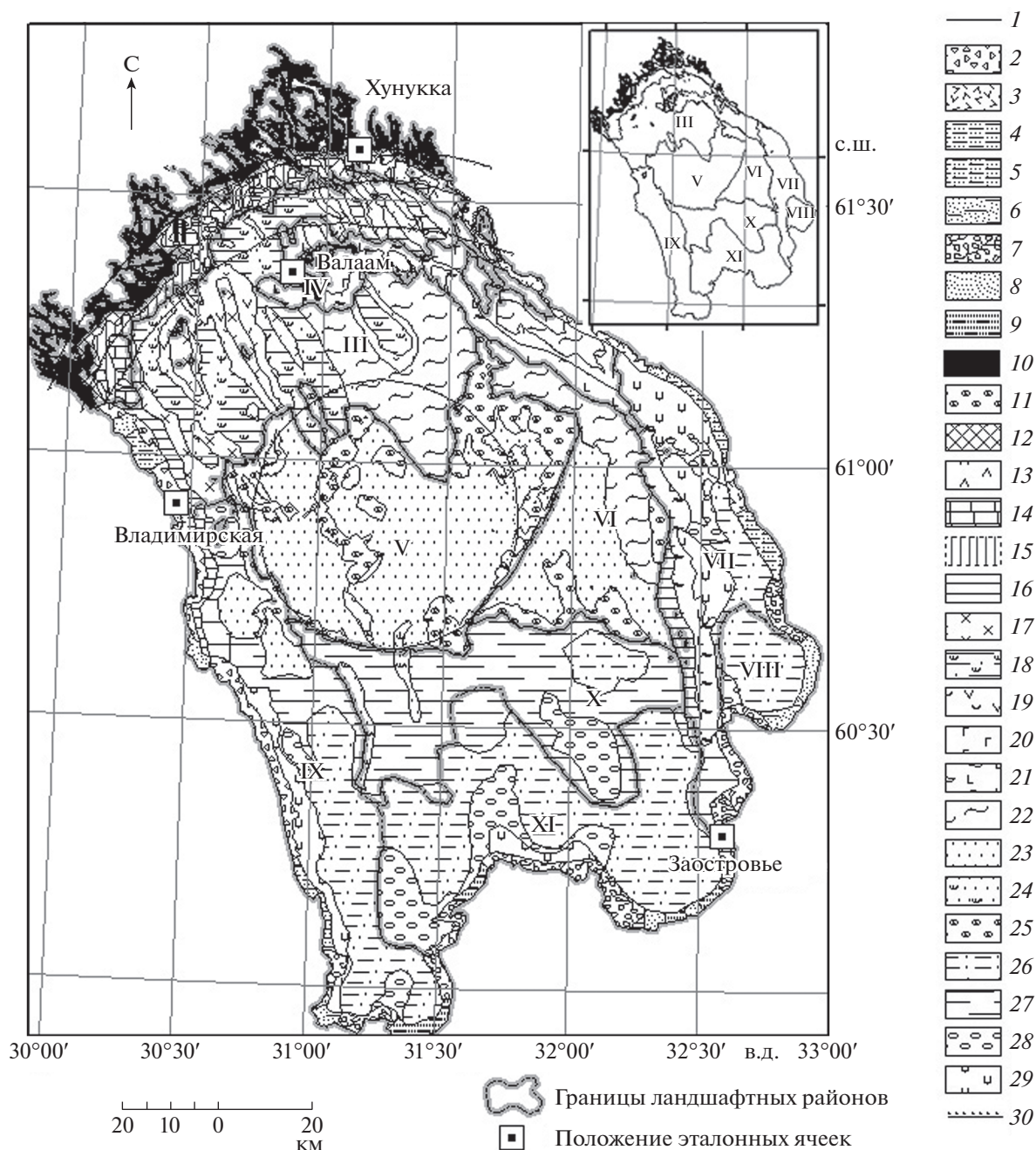


Рис. 4. Рабочая картосхема подводных ландшафтов Ладожского озера, полученная на основании ландшафтной модели. *Ландшафты прибрежные и мелководных террас:* 1 – абразионные террасы склона северного шхерного района, врезанные в кристаллические породы архейского и протерозойского комплекса (внемасштабные); 2 – абразионно-аккумулятивные террасы западного склона, сложенные существенно валунно-глыбовыми отложениями; 3 – абразионно-аккумулятивные террасы восточного склона, сложенные существенно валунно-глыбовыми отложениями; 4 – аккумулятивные террасы западного склона, созданные волновыми процессами, пляжевые; 5 – аккумулятивные террасы восточного склона, созданные волновыми и эоловыми процессами, пляжево-дюнные; 6 – ландшафты, созданные устьевыми процессами, дельтовые; 7 – ветланды аккумулятивных террас южной части; 8 – аккумулятивные террасы южного склона, созданные волновыми процессами, пляжевые; 9 – аккумулятивные террасы южной части с техногенно-измененными берегами. *Ландшафты возвышенностей и склонов на структурно-денудационном рельефе и впадин на аккумулятивном рельефе:* 10 – структурно-денудационные склоны, скальные береговые обрывы; склоны сложены коренными породами и валунной мореной; 11 – межгрядовые ложбины; 12 – уступ склона на границе со шхерной частью; 13 – плоская мелководная равнина; 14 – впадины и ложбины с нефелоидным накоплением; 15 – пологонаклонная холмисто-грядовая равнина; 16 – узкие эрозионные субаквальные долины; 17 – структурно обусловленные гряды северо-западной ориентировки, сложенные моренными отложениями, иногда – кристаллическими породами; 18 – широкие впадины с нефелоидным накоплением, с наибольшими глубинами до 230 м; 19 – склоны структурно

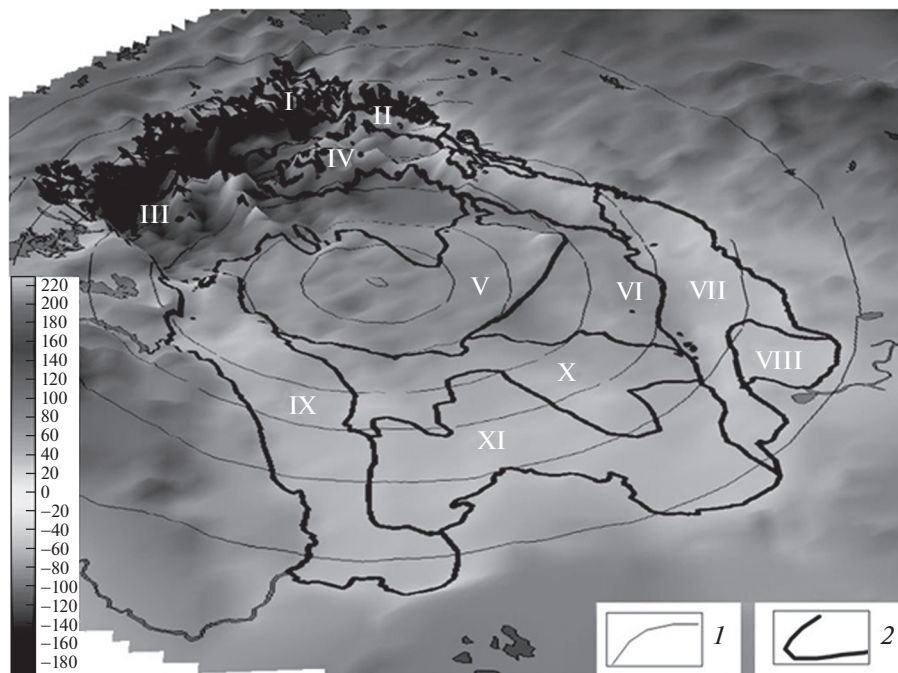


Рис. 5. Расположение ландшафтных районов акватории Ладожского озера.

1 – кольцевые структуры; 2 – границы ландшафтных районов (I – Северо-Ладожское шхерное побережье, II – Северо-Ладожский ступенчатый склон, III – Северо-Ладожская впадина, IV – Валаамско-Салминская островная гряда, V – Центрально-Ладожская холмистая равнина, VI – Восточно-Ладожская пологохолмистая равнина, VII – Восточно-Ладожский склон, VIII – Свирский склон, IX – Западно-Ладожский склон, X – Южно-Ладожская пологоволнистая равнина, XI – Южно-Ладожская пологонаклонная равнина).

ширина 2–5 км, угол склонов $0.5\text{--}1^\circ$. Гранулометрический состав донных отложений, перекрывающих гряды, представлен песчанистыми алевролитами, межгрядовые понижения – алевропелитами и пелитами.

Биотический компонент представлен преимущественно реликтовыми амфиподами и мизидами. Местами отмечаются скопления крупных олигохет семейства Lumbriculidae.

Восточно-Ладожский (VII:3, 5, 6, 7, 26, 28, 29), Свирский (VIII:6, 7, 8, 26, 28) и Западно-Ладожский (IX:2, 4, 6, 7, 9, 26, 27, 28) склоны представляют собой аккумулятивные и абразионно-аккумулятивные прибрежные, пологонаклонные равнины (29); крутизна уклонов – $0.15\text{--}0.5^\circ$; участками переходят в плоские аккумулятивные равнины (26), встречаются мелкие моренные гряды и холмы (28). Состав донных отложений побережья и гряд

склона представлен крупными обломками, дресвяно-щебеночно-песчаными и песчаными осадками; по удалении от берега на 10–15 км склон сложен алевропесками.

На твердых поверхностях, относящихся к фации каменистых ледниковых подводных валов, массово развиваются прикрепленные колониальные формы – губки (Porifera). Известно, что губки являются активными фильтраторами и агентами биологического выветривания [19], что обуславливает их очень важную ландшафтную роль. Помимо того, важную роль играют некоторые виды хирономид и брюхоногих моллюсков, предпочитающие твердые каменистые поверхности. На мелководье активно развивается фитоперифитон. На песчаных и алевропесчаных грунтах высокую плотность могут иметь олигохеты семейств Lumbriculidae и Tubificidae. В ходе биотурбации большую роль играют крупные моллюски и при-

обусловленных гряд; 20 – возвышенности, образованные за счет абразии силлов габбро-долеритов; 21 – склоны возвышенностей рифейских субвулканических силлов; 22 – впадины плоские на полого-залегающих породах рифея. **Ледниковые и озерно-ледниковые ландшафты на аккумулятивном рельефе:** 23 – пологоволнистые и всхолмленные озерно-ледниковые равнины; 24 – погребенные долины; 25 – флювиогляциальные гряды – озы; 26 – пологоволнистая, участками холмистая, озерно-ледниковая равнина; 27 – плоские и слабонаклонные ледниково-озерные равнины на поздневендских и кембрийских комплексах; 28 – относительно возвышенные холмы за счет развития моренных отложений; 29 – абразионно-аккумулятивные прибрежные пологонаклонные равнины, участками слабосхолмленные; 30 – кольцевые структуры. Римскими цифрами указаны номера ландшафтных районов (см. рис. 5).

донные рыбы. С ростом глубины увеличивается роль реликтовых амфипод в качестве характерных компонентов биоты.

Южно-Ладужская пологоволнистая равнина (Х: 24, 27, 28) — пологоволнистая, участками холмистая, озерно-ледниковая равнина (26) с глубинами 20–40 м, сложенная алевроит-пелит-песчанистыми осадками, перекрывающими осадочные породы венда. Выделяются погребенные долины, меридионального направления (24).

Основным характерным биологическим таксоном района являются амфиподы.

Южно-Ладужская пологонаклонная равнина (ХI: 6, 7, 9, 26, 28) — плоская слабонаклонная ледниково-озерная прибрежная равнина (26) глубиной от 0 до 20 м с редкими локальными холмистыми поднятиями (28). Гранулометрический состав донных отложений представлен разнотермистыми песками, на поднятиях — валунно-галечно-песчаными осадками.

К этому району относится Волховская губа, куда впадают более высокоминерализованные воды реки Волхов. Это обстоятельство обуславливает высокую биологическую продуктивность данного района. По берегам характерно развитие обширных ветладов, сформированных на площадях с режимом преимущественного обводнения в течение всего года, ассоциациями тростника. Максимально широкие полосы зарослей тростника характерны для участков вблизи устьев рек Волхов и Сясь. Тростниковые заросли образуют отдельный ландшафт (7), являющийся характерной чертой побережья района. В составе ландшафтообразующих видов донных беспозвоночных преобладают олигохеты и крупные двусторчатые и брюхоногие моллюски. Придонные бентосоядные виды рыб, такие как лещ *Abramis brama*, (Linnaeus, 1758), пескарь *Gobio gobio* (L., 1758), густера *Blicca bjoerkna* (L., 1758), язь *Leuciscus idus* (L., 1758), плотва *Rutilus rutilus* и другие виды семейства карповые, окунь *Perca fluviatilis* (L., 1758), ерш *Gymnocephalus cernuus* (L., 1758), налим *Lota lota* (L., 1758), подкаменщик *Cottus gobio* (L., 1758), а на больших глубинах — корюшка *O. eperlanus*, многочисленные в южном районе, также оказывают влияние на характер дна.

Карты-схемы эталонных участков

Примеры эталонных ячеек для квадратов $\times 386y807$, $\times 400y833$, $\times 361y758$, $\times 477y687$ приведены на рис. 6. Анализ отдельных эталонных ячеек из разных частей озера показывает важную роль геолого-геоморфологических особенностей дна, определяющих форму профиля, крутизну склона и, соответственно, распределение донных осадков. Структурная организация фаций прибрежной зоны подчинена их распределению. Для

сильно расчлененных скалистых берегов Северо-Ладужского шхерного побережья (рис. 6, а) и Валаамско-Салминской (рис. 6, б) островной гряды характерной структурной организацией фаций является расположение по принципу дуг (сменяющие друг друга пояса). Часто встречающиеся здесь крутые склоны приводят к тому, что смена фаций идет очень резко в пределах небольших расстояний (первые метры—десятки метров), составляя, таким образом, парагенетическую общность — ряды фаций. Маркером скально-каменистой фации являются перифитонные организмы — губки, играющие важнейшую роль в фильтрации воды и, соответственно, понижении ее мутности. Важной биологической группой глубоководных фаций являются реликтовые ракообразные и придонная рыба, большей частью — корюшка. Существующие на севере озера участки со сложным мезорельефом дна: наличием подводных скальных поднятий, луд, островов — создают условия для проявления фациальной мозаичности, что так же влияет на распределение биоты и повышение биоразнообразия. Отдельную фацию представляют собой вертикальные и субвертикальные скальные стенки (в пределах Валаамско-Салминской островной гряды (рис. 6, а) и на некоторых других участках озера), обнаруженные на больших глубинах. Биотическим компонентом этих подводных скальных поднятий является биопленка с пасущимися на ней глубоководными амфиподами. Ландшафты Западно-Ладужского склона (рис. 6, в) отличаются большей однородностью фаций по сравнению с северными районами. В прибрежной части здесь также наблюдается последовательность закономерно сменяющих друг друга фаций. Для подводных ландшафтов южных частей озера (рис. 6, г) характерной особенностью является присутствие гляциальных отложений, отраженных на дне в виде чередующихся полос нагроможденных валунов, принесенных ледником и озерных песчаных осадков, составляющих отдельные фации. Характерным биотическим компонентом на песчаных фациях являются крупные двусторчатые моллюски.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана цифровая модель донных ландшафтов Ладужского озера, представляющая простой в работе и доступный для постоянного редактирования инструмент, позволяющий при наличии стандартного программного обеспечения в интегрированной форме хранить и использовать доступную информацию по состоянию дна Ладужского озера и вести учет типологических ландшафтных единиц разного уровня.

В качестве основной ячейки хранения информации выбран полигон размером 1×1 км, кото-

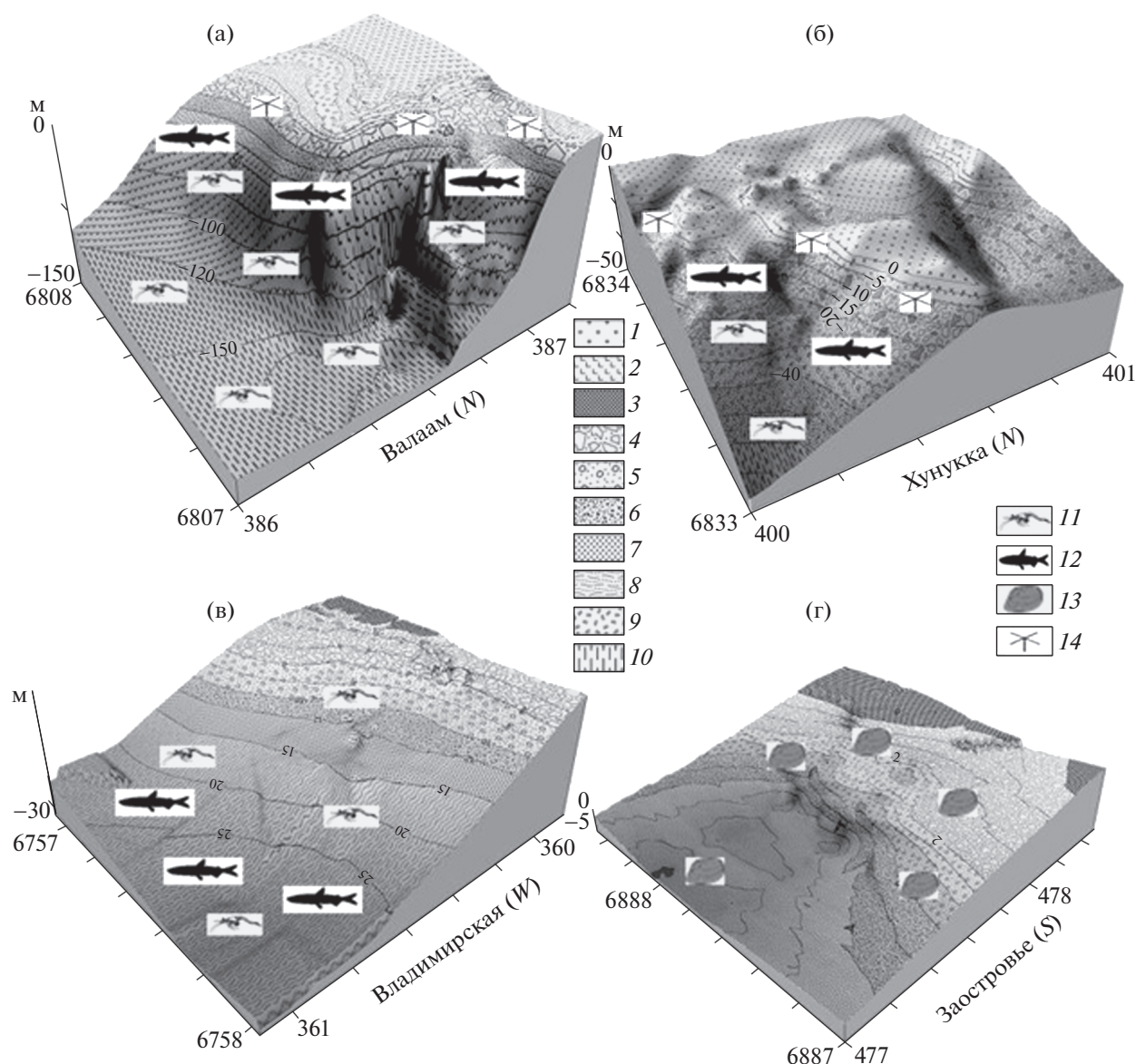


Рис. 6. Блок-диаграммы эталонных ячеек разных частей Ладожского озера ((а) – Валаамский архипелаг; (б) – северный шхерный район; (в) – западный берег; (г) – южный берег).

Литологические признаки. Коренные породы: 1 – граниты, 2 – габбро, 3 – осадочные породы суши; *донные осадки:* 4 – крупные валуны и глыбы, 5 – песчано-галечно-валунные, 6 – галька и щебенка, 7 – песок, 8 – песок со следами ряби; 9 – алевроиты; 10 – алевропелиты/пелиты; *биотические признаки:* 11 – мизиды и амфиподы, 12 – рыба, 13 – крупные моллюски, 14 – колонии губок.

рый соответствует разграфке топокарт в прямоугольной системе координат Пулково, 1942, зона 6.

Составлен авторский вариант цифровой батиметрической модели Ладожского озера, позволяющий при ее использовании оперативно вносить уточнения, в том числе – в полевых условиях.

На основе батиметрической модели и других материалов из базы данных построена рабочая схема ландшафтов Ладожского озера с выявлением их основных типов. При выделении ландшафтов учтено влияние ступеней кольцевых

неотектонических структур, выявленных ранее А.П. Световым [10].

Схема ландшафтов послужила основой для проведения границ при региональном ландшафтном районировании. Выделенные ландшафтные районы близки к контурам ландшафтного деления В.И. Гуревича [18], но увеличено количество ландшафтных районов в северной шхерной части. В нашей работе геоморфологические признаки приняты в качестве ключевых, учтены влияние геологического строения, геофизических

параметров и состав поверхностных донных осадков. Физико-химические и биологические признаки выделены как второстепенные, и их роль в ландшафтах требует дальнейшего подробного изучения.

Проведены детальные исследования на эталонных ячейках разных типов ландшафтов: замеры глубин с густым шагом, подробное изучение состава фаций донных осадков, состав и распределение биоты. По их результатам составлены карты-схемы; информацию ячейки-эталона можно распространять на всю площадь данного типа ландшафта. Работы требуют продолжения с целью последовательного создания эталонов для главных типов ландшафтов. Первоочередной задачей является исследование характера донной поверхности и состава биоты в районе слабоизученных глубоководных впадин и их склонов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность своим коллегам сотрудникам ИНОЗ РАН ФИЦ РАН д.г.н. В.М. Анохину и инж. М.О. Дудакову за совместное участие в полевых исследованиях донных ландшафтов Ладожского озера.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геоэкология Ладожского озера / Под ред. В.Л. Иванова, В.И. Гуревича. СПб: ВНИИОкеангеология, 1995. 210 с.
2. Ладожское озеро. Атлас / Под ред. В.А. Румянцев. СПб: Институт озераведения РАН, 2002. 129 с.
3. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В.А. Румянцев. СПб: Нестор-История, 2015. 200 с.
4. Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера. М.—Л.: Наука, 1966. 124 с.
5. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков С.М. Использование необитаемого подводного аппарата для исследования бентофауны сублиторали и профундали Ладожского озера // Труды VIII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)”. Т. II (III): [сборник]. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2020. С. 420–423.
6. Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Анохин В.М. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 4 (16). С. 51–55.
7. Яковенко Н.В., Марков Д.С., Туркина Е.П. ГИСТехнологии как эффективный инструмент исследования водно-озерных объектов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15150>
8. Государственная геологическая карта РФ м-ба 1:1000000 листы Р-35, 36. Геоморфологическая схема. Третье поколение. Балтийская серия. МПР РФ Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2015.
9. Навигационные карты Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны СССР. http://ladoga-lake.ru/maps/navi_su/navi-su-00.html 18.02.21
10. Светов А.П. Неотектонический этап развития Ладожской радиально-кольцевой структуры Салминского центра магматической активности // Нетрадиционные вопросы геологии. VI научный семинар. Тез. докл. М.: 1998. С. 22–23.
11. Свириденко Л.П. Ладожская вулканотектоническая структура (геология, вулканоплутонизм, тектоника). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. 98 с.
12. Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Геоморфология и типизация берегов Ладожского озера по данным съемки беспилотного летательного аппарата // Геоморфология. 2019. № 1. С. 25–37. <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019125-37>
13. Дудакова Д.С. Метод полигонного исследования распределения мейобентоса в литорали Ладожского озера (на примере северного шхерного района) // Биология внутренних вод. 2016. Т. 9. № 2. С. 104–112. <https://doi.org/10.7868/S0320965216020054>
14. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков М.О. Влияние рельефа дна на структурные характеристики прибрежных подводных ландшафтов Ладожского озера // VIII Шукинские чтения: рельеф и природопользование / Мат-лы Всерос. конф. с междунар. участием. Москва, 28 сентября – 01 октября 2020 г. [Электронное издание]. М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. С. 636–640.
15. Dudakova D., Anokhin V., Dudakov M., and Judin S. Mapping Rocky Coastal Landscapes in Northern Lake Ladoga around the islands of Raipatsaari and Lussikainluoto // GEONAB 2019 Marine geological and biological habitat mapping. Saint-Petersburg Russia. May 13–17. 2019. P. 51–52.
16. Зуйкова Ю.Л., Шилова Т.М. Геологический отчет, ТЭД, ТЭО, ТЭС. 27064. Составление сводных аэрогеофизических карт на Ладожско-Онежскую площадь в масштабе 1:200000 в 1995–2000 годах. ГП ПГЭ. СПб. 2000. 76 с.
17. Науменко М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 62–72. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-62-72>
18. Гуревич В.И. Районирование донных ландшафтов // Геоэкология Ладожского озера. СПб: ВНИИОкеангеология, 1995. С. 121–126.
19. Куликова Н.Н., Сайбаталова Е.В., Бойко С.М., Семитуркина Н.А., Белозерова О.Ю., Мехоношин А.С., Тимошкин О.А., Сутурин А.Н. Биогеохимия корковых губок сем. Lubomirskiidae (южный Байкал) // Геохимия. 2013. № 4. С. 366–377. <https://doi.org/10.7868/S0016752513040043>

Digital model of underwater landscapes of the Lake Ladoga as a source of integrated information on the condition of the bottom

D. S. Dudakova^{a, #} and S. N. Judin^b

^a*Institute of limnology RAS, Saint-Petersburg, Russia*

^b*Geological company "Kivijarvi", Petrozavodsk, Russia*

[#]*E-mail: Judina-D@yandex.ru*

Based on our own observations, literature and stock sources, we have created a database that includes primary limnological, geophysical, geological, analytical and biological data for the Lake Ladoga basin. The database is a set of attribute tables with coordinate reference points, which allows to make the necessary selections and build sets of maps using various parameters. As the main data storage cell, a 1×1 km polygon is selected, which corresponds to the topographic map unit in a rectangular coordinate system. The author's version of the digital bathymetric model of Lake Ladoga is compiled. On the basis of the bathymetric model and other materials from the database, a working scheme of the landscapes of Lake Ladoga and a scheme of landscape zoning are constructed. Detailed bathymetric measurements, a detailed study of the composition of the bottom sediments and landscape facies, the composition and distribution of biota on the reference cells for different types of landscapes were carried out. The information obtained during detailed studies of the reference cell can be extrapolated to the entire area of distribution of this type of landscape, taking into account the features of the mesorelief.

Keywords: geologic mapping, underwater landscapes and facies, landscape zoning

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their deep gratitude to their colleagues, Dr. V.M. Anokhin and Engineer M.O. Dudakov, employees of the Institute of limnology RAS, for their joint participation in the field research of the bottom landscapes of Lake Ladoga.

The work was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences on the subject No. 0154-2019-0001 "Comprehensive assessment of the dynamics of the ecosystems of Lake Ladoga and the water bodies of its basin under the influence of natural and anthropogenic factors".

REFERENCES

1. *Geoekologiya Ladozhskogo ozera* (Geoecology of Lake Ladoga). V.L. Ivanov, V.I. Gurevich (Eds.). St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya (Publ.), 1995. 210 p. (In Russ.)
2. *Ladozhskoe ozero* (Ladoga Lake. Atlas). V.A. Rumyantsev (Ed.). St. Petersburg: Nestor-Istoriya (Publ.), 2002. 129 p. (In Russ.)
3. *Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya. Atlas* (Lake Ladoga and its sights shores. Atlas). V.A. Rumyantsev (Ed.). St. Petersburg: Nestor-Istoriya (Publ.), 2015. 200 p. (In Russ.)
4. Semenov N.I. *Donnye otlozheniya Ladozhskogo ozera* (Bottom deposits of Lake Ladoga). M.—L.: Nauka (Publ.), 1966. 124 p.
5. Dudakova D.S., Anokhin V.M., and Dudakov S.M. *Is-pol'zovanie neobitaemogo podvodnogo apparata dlya issledovaniya bentofauny sublitoral'no i profundali Ladozhskogo ozera* (The use of an uninhabited underwater vehicle for the study of the benthic fauna of the sublittoral and profundal areas of Lake Ladoga). Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2019)". Vol. II (III): [collection]. Tver: LLC "PoliPRESS" (Publ.), 2020. P. 420–423.
6. Dudakova D.S., Dudakov M.O., and Anokhin V.M. *Opyt primeneniya glubokovodnogo teleupravlyаемого apparata dlya izucheniya podvodnykh landshaftov Ladozhskogo ozera* (The experience of using a deep-water remote-controlled device for studying underwater landscapes of Lake Ladoga). *Russian Journal of Applied Ecology*. 2018. No. 4 (16). P. 51–55. (In Russ.)
7. Yakovenko N.V., Markov D.S., and Turkina E.P. *Gis-tekhnologii kak effektivnyj instrument issledovaniya vodno-ozernykh ob'ektov* (Gis-technologies as an effective tool for the study of water-lake objects). *Modern problems of science and education*. 2014. No. 5. (In Russ.) <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15150>
8. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF m-ba 1: 1000000 listy R-35, 36. Geomorfologicheskaya skhema. Tre't'e pokolenie. Baltijskaya seriya* (State geological map of the Russian Federation scale 1:1000000 sheets P-35, 36. Geomorphological scheme. Third generation. Baltic series). MPR RF Map Factory VSEGEI. 2015.
9. *Navigacionnye karty Glavnogo upravleniya navigacii i okeanografii Ministerstva oborony SSSR* (Navigational charts of the Main Directorate of navigation and Oceanography of the Ministry of defense of the USSR): http://ladoga-lake.ru/maps/navi_su/navi-su-00.html 18.02.21
10. Svetov A.P. *Neotektonicheskij etap razvitiya Ladozhskoj radial'no-kol'cevoj struktury Salminskogo centra magmaticheskoy aktivnosti* (Neotectonic stage of development of the Ladoga radial-ring structure of the Salma magmatic activity center). *Unconventional questions of geology. VI scientific seminar. Abstracts of reports*. M.: 1998. P. 22–23. (In Russ.)

11. Sviridenko L.P. *Ladozhskaya vulkano-tektonicheskaya struktura (geologiya, vulkanoplutonizm, tektonika)* (Ladoga volcano-tectonic structure (geology, volcano-plutonism, tectonics)). Petrozavodsk: KarSC RAS (Publ.), 2019. 98 p.
12. Anokhin V.M., Dudakova D.S., and Dudakov M.O. *Geomorfologiya i tipizaciya beregov Ladozhskogo ozera po dannym s"emki bespilotnogo letatel'nogo apparata* (Geomorphology and typing of the Lake Ladoga shores with the use of dron). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 1. P. 25–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019125-37>
13. Dudakova D.S. *Metod poligonogo issledovaniya raspredeleniya mejobentosa v litorali Ladozhskogo ozera (na primere severnogo shkhernogo rajona)* (The Polygon Method of the Meiobenthos Spatial Distribution Study in the Littoral Zone of Lake Ladoga (by the Example of the Northern Skerries Region of the Lake)). *Inland Water Biology*. 2016. Vol. 9. No. 2. P. 104–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0320965216020054>
14. Dudakova D.S., Anokhin V.M., and Dudakov O.M. *Vliyanie rel'efa dna na strukturnye harakteristiki pribrezhnykh podvodnykh landshaftov Ladozhskogo ozera* (The influence of bottom topography on the structural characteristics of the coastal underwater landscapes of lake Ladoga). *VIII Shchukin readings: relief and nature management. Proceedings all-Russian conference with international participation*. Moscow, September 28 – October 01, 2020. [Electronic edition]. Moscow: Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University (Publ.), 2020. P. 636–640. (In Russ.)
15. Dudakova D., Anokhin V., Dudakov M., and Yudin S. Mapping of rocky coastal landscapes of the Northern part of Lake Ladoga in the area of the islands of Raipatsaari and Lussikainluoto. *GEOHABR. Marine geological and biological mapping of habitats*. St. Petersburg, Russia. May 13–17, 2019. P. 51–52.
16. Zuikova Yu.L. and Shilova T.M. *Geologicheskij otchet, TED, TEO, TES. 27064. Sostavlenie svodnykh aerogeofizicheskikh kart na Ladozhsko-Onezhskuyu ploshchad' v masshtabe 1:200000 v 1995–2000 godah* [Geologic report, TED, TEO, TES. 27064. Compilation of consolidated aerogeophysical maps for the Ladoga-Oneza area on a scale of 1:200,000 in 1995–2000]. SPb.: GP PGE (Publ.), 2000. 76 p.
17. Naumenko M.A. *Analiz morfometricheskikh harakteristik podvodnogo rel'efa Ladozhskogo ozera na osnove cifrovoj modeli* (Analysis of Morphometric Characteristics of Bottom Relief of Lake Ladoga on the Basis of the Digital Model). *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2013. No. 1. P. 62–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-62-72>
18. Gurevich V.I. *Rajonirovanie donnykh landshaftov* (Zoning of bottom landscapes). *Geocology of Lake Ladoga*. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya (Publ.), 1995. P. 121–126. (In Russ.)
19. Kulikova N.N., Saibatalova E.V., Boiko S.M., Semiturkina N.A., Belozeroва O.Yu., Mekhonoshin A.S., Timoshkin O.A., and Suturin A.N. *Biogeochemiya korkovykh gubok sem. Lubomirskiidae (yuzhnyj Bajkal)* (Biogeochemistry of cortical sponges sem. Lubomirskiidae (Southern Baikal)). *Geochemistry*. 2013. No. 4. P. 366–377. (In Russ.)