

УДК 551.435.36(470.2)

## УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ БЕРЕГОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

© 2020 г. Е. И. Игнатов<sup>1</sup>, А. Ю. Санин<sup>2,\*</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия

\*E-mail: eather86@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2018 г.

После доработки 14.05.2019 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

Сопоставление расчетных профилей динамического равновесия и реальных фактических профилей подводного берегового склона показало, что для большинства берегов Онежского озера характерна слабая устойчивость. Профили подводного берегового склона построены по результатам полевых работ, включающих в себя измерения глубин и определение гранулометрического состава донных отложений по линии промера; профили динамического равновесия получены с помощью формулы Дина–Бруна, при этом учитывалась преобладающая крупность донных осадков. Для водоема выделено семь морфогенетических типов берегов: слабоизмененные, абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные, дельтовые, лагунные и антропогенные. Сравнительно устойчивыми могут считаться слабоизмененные и аккумулятивные, но для них устойчивость заметно снижается вследствие повышения уровня озера, которое составило в XX столетии примерно 0.4 м. Наименее устойчивы абразионные берега. Слабоизмененные берега преобладают в Северном Прионежье, аккумулятивные – в Южном и Восточном. Абразионные берега доминируют в Западном Прионежье, фрагментарно встречаются и в Восточном. Неустойчивость и активные динамические процессы, свойственные для значительной части берегов, обуславливают долгосрочные риски для их хозяйственного, в частности, рекреационного использования. Исследования устойчивости берегов в зависимости от типов, к которым они относятся, предложенным методом актуально для всех берегов морей и крупных внутренних водоемов, особенно тех, которые интенсивно используются человеком. Такой метод исследования позволяет выявить участки берегов с наименьшими долгосрочными рисками для объектов инфраструктуры.

*Ключевые слова:* Онежское озеро, устойчивость берегов, профили динамического равновесия, тип берега, абразия, аккумуляция, береговые и донные отложения

DOI: 10.31857/S0435428120010058

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с возрастанием интенсивности природопользования в прибрежной территории растет актуальность прогноза динамики берегов, как кратко- и средне-, так и долгосрочного.

Проблема устойчивости берегов морей и крупных внутренних водоемов становится все более актуальной на фоне глобальных климатических изменений и сопряженного с ними повышения уровня Мирового океана. Медленная “ползучая” трансгрессия уровня океана (до 1.5–2 мм/год и более по различным данным) приводит к активиза-

ции абразионного процесса практически по всему периметру береговой линии. Скорость отступления зависит от штормовой активности акватории и прочности формирующих берега пород и рыхлых отложений. Например, на Каспийском море подъем его уровня с 1979 г. до 1992 г. на 2.7 м привел к росту процента берегов абразионного типа до 73%. Это вызвало значительные разрушения берегов на территориях населенных пунктов и промышленных объектов в прибрежной зоне [2]. Схожие процессы имеют место и на берегах Онежского озера, хотя подъем его уровня объясняется и другими причинами.

Вопросами прогнозирования развития берегов и оценками степени их устойчивости занимались и занимаются В.В. Лонгинов [3], И.А. Правоторов [4], Д.В. Корзинин [5], И.О. Леонтьев [6, 7], П. Бруун [8], Г. Крид [9], М. Гонсалес [10], Р. Дин [11], Д. Крибель [12] и др. Применение разработанных ими методик наряду с использованием данных полевых работ, а также фондовых и опубликованных материалов позволило оценить современную динамику большинства типов берегов Онежского озера и их устойчивость и далее перейти к составлению ее прогноза.

Сопоставление профилей равновесия подводного берегового склона для различных типов берега Онежского озера дает возможность выявить их особенности, в частности — относительный возраст и степень устойчивости, характерные черты происходящих в их пределах динамических процессов. Все это должно учитываться при управлении природопользованием в ходе их хозяйственного освоения.

Понятие устойчивости морских берегов к размыву включает в себя не только физико-геологические свойства субстрата, но и морфологические особенности береговой зоны, которая подвержена разрушению до стадии выработки профиля динамического равновесия. Считается, что на этой стадии абразионный процесс затухает или полностью прекращается за счет равномерной диссипации волновой энергии без проявления остаточных деформаций подводного рельефа [13].

Достаточно надежным индикатором подобного состояния для большинства типов берегов могут служить расчетные профили динамического равновесия. Сопоставление их с реально существующими профилями подводного берегового склона позволяет сделать выводы об интенсивности протекания динамических процессов, свойственных берегу, в будущем. Наиболее эффективно проводить сопоставление профилей для диапазона глубин от уреза до нижней границы береговой зоны, которая соответствует почти половине длины волны [14].

Для Онежского озера характерны волны длиной до 20–22 м и иногда больше [15]. В случае постоянного повторения волн такой длины их воздействие на дно должно ощущаться до глубин 10–11 м. Однако подобные волны встречаются на Онежском озере достаточно редко и, главным образом, на открытой воде далеко от берега. Наблюдения показывают, что чаще всего высота воздействующих на береговую зону волн не превышает 1–1.2 м, длина таких волн не свыше 10 м [15], а нижняя глубина их воздействия на дно — 5 м. Положение нижней границы береговой зоны на этих глубинах подтверждают полученные в ходе полевых исследований данные по донным отложениям — на этой глубине (или даже на несколько меньшей — 3–4 м — в зависимости от участка берега) пески сменяются илами, которые, как правило, накапливаются лишь за пределами активного волнового воздействия.

Цель работы — выявить основные закономерности и тенденции литодинамики береговой зоны Онежского озера в настоящем и будущем.

Для достижения основной цели были решены следующие задачи:

1. Охарактеризовать существующие методы построения профилей динамического равновесия, их достоинства и недостатки.

2. Рассчитать для ключевых участков профили динамического равновесия, характеризующие берег, и сопоставить их с реальными профилями подводного берегового склона.

3. Проанализировать тенденции развития берегов Онежского озера на ключевых участках большинства их типов, опираясь на конфигурацию полученных профилей.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования динамики берегов и определения степени устойчивости подводного берегового склона применяют как экспериментальные, так и расчетные методы, в частности, построение профилей динамического равновесия и последующее сопоставление их с профилями подводного берегового склона. Важнейшее достоинство данного метода – его дешевизна, по сравнению с натурными наблюдениями. Другое преимущество – возможность определения тенденций развития береговой зоны за многолетний период, что невозможно сделать за один полевой сезон.

Существенный недостаток используемого метода – он базируется на сформулированном В.П. Зенковичем постулате о существовании так называемого “профиля динамического равновесия” [14]. Однако для значительной части протяженности берегов мира это достаточно абстрактное понятие. В частности, профиль равновесия является скорее абстрактным, чем реально существующим для Северного Прионежья с его сложенными прочными кристаллическими породами берегами и многочисленными заливами, закрытыми от волнового воздействия.

Длительное воздействие волн на береговой склон приводит к выработке профиля, который по отношению к этому воздействию является равновесным, что подтверждается и экспериментальными данными. Завершение формирования равновесного профиля указывает на отсутствие дефицита наносов, что, в свою очередь, позволяет говорить об отсутствии интенсивного абразионного воздействия в будущем при неизменности уровня озера и его волнового режима. Если профиль подводного берегового склона близок к профилю равновесия, можно говорить о высокой степени устойчивости берега и его подводного склона при данном уровне вод озера.

Согласно В.П. Зенковичу, равновесие твердых частиц возникает как следствие баланса между влечением частиц к берегу и силой тяжести. Формирующийся в таком случае профиль имеет вогнутую форму, причем, чем крупнее наносы, тем круче линия профиля [8]. Степень вогнутости профиля косвенным образом указывает на степень устойчивости берега, между этими параметрами существует обратно пропорциональная зависимость.

Для построения профилей равновесия подводного берегового склона используются как сравнительно простые модели (например, формула П. Брууна, подтвержденная Р. Дином [4]), так и более сложные, предполагающие свои расчеты для каждой из отдельных частей профиля [10]. В целом для берегов, сложенных мелкозернистым материалом (но не глинистыми или илистыми частицами), уравнение Дина–Брууна дает приемлемые результаты [4]. Мелкозернистым материалом подводный береговой склон Онежского озера сложен практически всюду, кроме Северного Прионежья.

П. Бруун, а впоследствии Р. Дин предложили следующие формулы, позволяющие построить профиль равновесия при наличии батиметрических данных по крупности донных отложений и по морфометрическим данным:

$$h = Ax^{2/3},$$
$$A = 0.067w_s^{0.44},$$

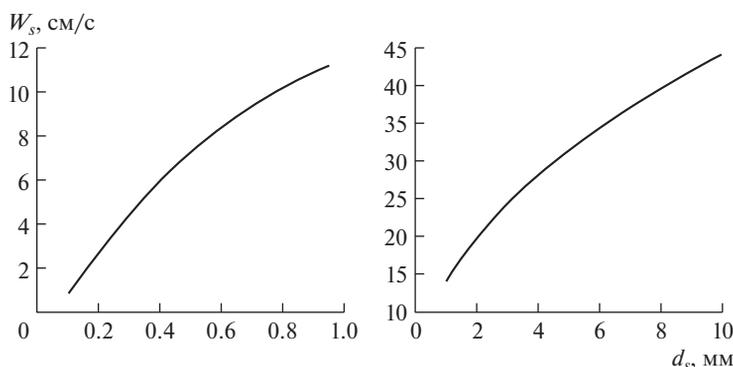
где  $h$  – глубина,  $x$  – расстояние от берега,  $W_s$  – гидравлическая крупность наносов, выраженная в  $\text{см/с}^{-1}$ . Параметр  $A$  в среднем имеет величину порядка  $10^{-1}$ , особенно для мелкозернистого песка, но может достаточно заметно колебаться в зависимости от крупности наносов [4, 5].

**Таблица 1.** Зависимость гидравлической крупности частиц от их диаметра [13]

Диаметр частиц $d_s$ , мм	Гидравлическая крупность $W_s$ , см/с
0.5	5.1–5.7 в зависимости от температуры
1	10.6–11.3 в зависимости от температуры
1.5	16.4
2	19
3	23.2
4	26.8
5	30
7.5	36.7
10	42.5
15	52
20	60.2
30	73.6
40	87

Чтобы определить  $W_s$  по среднему размеру твердых частиц  $d_s$ , можно воспользоваться зависимостью ван Рейна (табл. 1, рис. 1) [6].

Для Онежского озера выделены семь типов берегов: слабоизмененные, абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные, лагунные, дельтовые и антропогенные (техногенные) [1]. Большая часть региона сложена устойчивыми к размыву докембрийскими кристаллическими породами, покрытыми чехлом четвертичных отложений, преимущественно ледниковых, мощностью от первых метров до первых десятков метров, в Северном Прионежье их мощность наименьшая [17]. В южной части Прионежья породы кристаллического фундамента имеют палеозойский возраст. Устойчивость докембрийских кристаллических пород к волновому воздействию и малая мощность четвертичных отложений в Северном Прионежье объясняют высокий процент слабоизмененных берегов, свойственный региону. Для некоторых из типов берегов, в частности, слабоизмененных или антропогенных, сопоставление профилей подводного берегового склона и профилей равновесия смысла, по сути, не имеет, как и расчет профилей равновесия как таковых.

**Рис. 1.** Определение  $W_s$ , см/с по среднему размеру твердых частиц  $d_s$ , мм [4].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При построении профилей равновесия необходимо учитывать гранулометрическую размерность донных отложений. Такие данные были получены в ходе полевых работ, выполненных сотрудниками Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова (ГОИН) в 2014–2015 гг., в которых принимали участие авторы данной статьи. В настоящее время по некоторым ключевым участкам эти данные уточняются по результатам работ, выполняемых сотрудниками ГОИНа в 2018–2019 гг. в рамках финансовой поддержки РФФИ (научный проект № 18-302-00545\18-19). Существенных расхождений с предыдущими данными не выявлено (рис. 2). Имеются также несколько картосхем, обобщающих имеющиеся литературные данные по гранулометрическому составу донных отложений [18, 19]. Одна из них приведена на рис. 3.

Наиболее типичными донными отложениями для подводного берегового склона Онежского озера являются глины и ил (прежде всего, в северной части озера), пески, галька и гравий (распространены исключительно вдоль берегов) [18–20]. Как правило, для донных отложений из обычного песка принималась средняя размерность 0.5 мм. Модель профиля равновесия применима не для всех отложений – доказана невозможность ее применения для участков берегового склона, сложенных илистыми и глинистыми отложениями, либо, напротив, крупными валунами. В силу этого профили, выполненные для таких берегов (в частности, для Северного и значительной части Восточного Прионежья) были признаны нерелевантными и не принимались во внимание при анализе полученных результатов. Также данная модель не применима для слабоизмененных и антропогенных берегов.

Предварительно на основе морфогенетического анализа выполнена типизация берегов, картосхема типов берегов представлена на рис. 4. На ней же показано расположение приведенных в статье профилей.

Построены и сопоставлены с профилями подводного берегового склона несколько десятков профилей равновесия для разных типов берегов, показанных на рис. 4, пять из них приведены ниже. Они представляют разные части Онежского озера, но большинство из них относятся к Западному Прионежью. Для Восточного, и особенно Северного Прионежья характерен значительный процент слабоизмененных берегов, для которых сопоставление профилей бесполезно. В Южном Прионежье донные осадки часто представлены илистыми фракциями, для таких участков берега сопоставление профилей также безрезультатно. Лишь в западной части региона среди донных отложений преобладают пески (см. рис. 3), поэтому здесь, для устья р. Мегры, выполнено совмещение профилей равновесия и подводного берегового склона.

В целом в Западном Прионежье преобладают абразионно-аккумулятивные берега, динамика которых в будущем представляется не совсем ясной. Однако здесь встречаются и абразионные, и аккумулятивные берега (см. рис. 4), что позволяет в пределах данного региона сопоставлять профили разных типов. Только здесь – практически повсеместно для береговой зоны – характерны донные песчаные отложения (см. рис. 2, 3), поэтому совмещение профилей для Западного Прионежья наиболее показательно, и именно эти профили приводятся в статью.

Некоторые из построенных профилей равновесия оказались менее приглубыми в сравнении с реальными профилями, а часть – более отмелыми; разница между линиями профилей варьирует от участка к участку. Это указывает на чередование фрагментов берега с преобладанием то абразионных, то аккумулятивных процессов, причем разной степени интенсивности. Характер процессов и их интенсивность, в свою очередь, определяются степенью устойчивости берегоформирующих пород к волновому воздействию и высотой берегового уступа, так как волновое воздействие в пределах региона примерно одинаково.

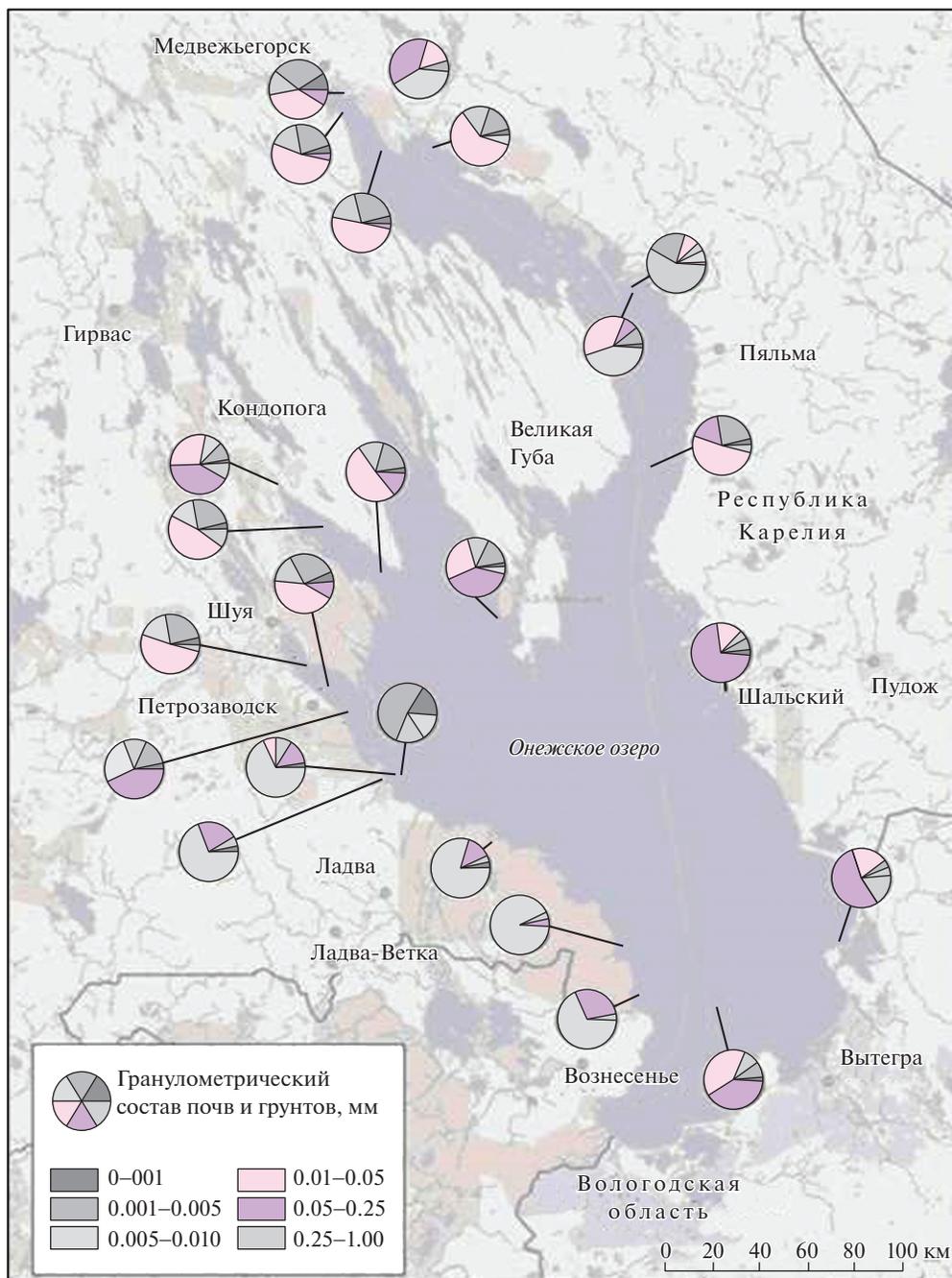


Рис. 2. Гранулометрический состав донных отложений по данным собственных исследований на ключевых участках.

Если говорить про берега Онежского озера в целом, сопоставление профилей равновесия и профилей подводного берегового склона позволяет говорить о малой степени их выработанности, особенно для Северного Прионежья, что объясняется относи-



**Рис. 3.** Гранулометрический состав донных отложений (по [19]).

1 – камни, галька, гравий; 2 – осадки разной крупности; 3 – песок; 4 – песок заиленный; ил: 5 – крупноалевритовый, 6 – мелкоалевритовый, 7 – глинистый.

тельной молодостью берегов. В свою очередь, преобладание участков с заметно несопадающими друг с другом профилями равновесия и профилями подводного берегового склона указывают на слабую степень потенциальной устойчивости значительной части берегов Онежского озера и их подводных береговых склонов.

Конфигурация профилей равновесия зависит от крупности материала, которая учтена в формуле, используемой для построения профилей. Основные характеристики последних приводятся в табл. 2. Сопоставление профилей динамического равновесия и профилей подводного берегового склона для различных участков показано на рис. 5.

Для профилей бухты Заячьей (рис. 5, а) зафиксирован существенный дефицит наносов, особенно на глубинах от 5 до 11 м, но он имеет место и на глубинах менее 5 м, следовательно, стоит ожидать дальнейшей абразии или размыва берега средней интенсивности. В целом аналогичные выводы можно сделать и для профилей бухты Шок-

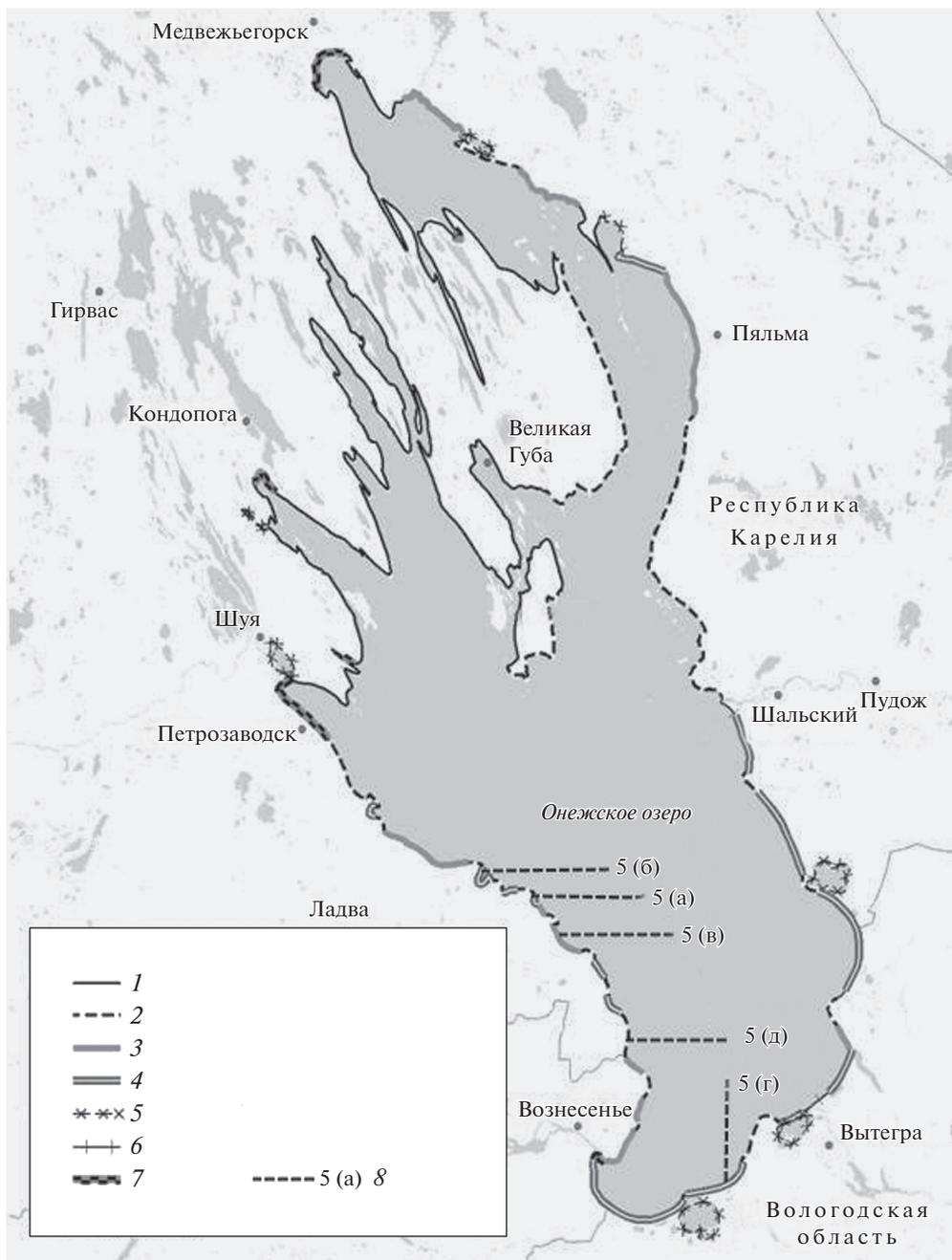


Рис. 4. Типы берегов Онежского озера [1].

1 – первичные, слабоизмененные или неизменные, 2 – абразионные, 3 – абразионно-аккумулятивные, 4 – аккумулятивные, 5 – лагунные, 6 – дельтовые, 7 – антропогенные (техногенные); 8 – местоположение построенных профилей подводного берегового склона, совмещенных с равновесными профилями (см. рис. 5, а–д).

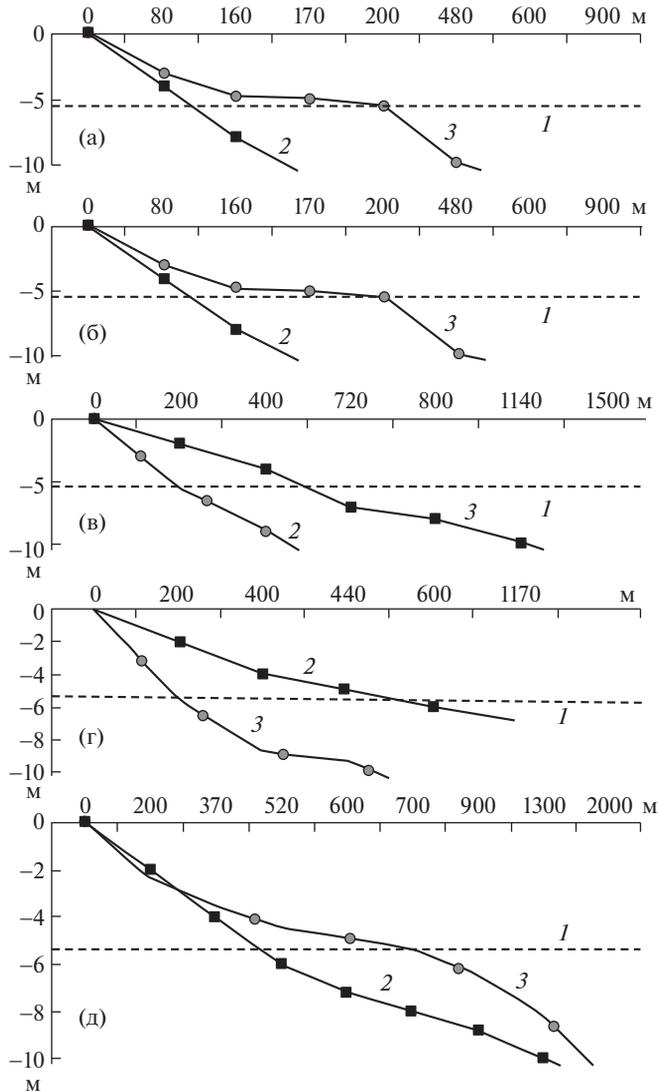
**Таблица 2.** Основные характеристики ключевых участков, используемых для построения профилей равновесия

Номер профиля	Привязка профилей	Расположение профилей	Средняя крупность донных отложений на глубинах 0–10 м, мм	Значения параметра $A$ для участка
1	Бухта Заячья	Западное Прионежье	0.5	0.158
2	Бухта Шокша		0.5	0.158
3	Бухта Розмегская		0.5	0.158
4	Бухта Гиморецкая		0.5	0.158
5	Устье р. Мегры	Южное Прионежье	0.1	0.067

ша, которая расположена поблизости (рис. 5, б). На абразионно-аккумулятивном берегу бухты Розмегской (рис. 5, в), напротив, в будущем аккумуляция будет преобладать над абразией, так как совмещение профилей указывает на наличие некоторого избытка наносов. Аналогичные выводы можно сделать по абразионно-аккумулятивному берегу бухты Гиморецкой, совмещение профилей для которой приводится на рис. 5 (г). Наконец, на участке берега напротив устья р. Мегры (рис. 5, д) произойдет размыв сформировавшихся там пляжей (берег здесь аккумулятивный), что, впрочем, довольно типично для всего озера и связано, по всей видимости, с подъемом его уровня на 0.4 м в середине прошлого столетия [17, 20].

Следует уточнить, что сделанные выводы не обязательно распространяются на все побережье вышеупомянутых бухт, а только на те участки берега, для которых выполнено профилирование. Фигура, которая образуется тремя линиями: профилем подводного берегового склона, профилем равновесия и линией глубины замыкания, представляет собой графическое отображение объема дефицита или избытка (первый имеет место в случае, если линия профиля равновесия проходит над линией реального профиля подводного берегового склона) наносов. Разнообразие соотношений фактического профиля подводного берегового склона и профилей равновесия отображает не только разнообразие типов берегов озера, но и различия в размерности частиц наносов. В реальных условиях наносы имеют сложный гранулометрический состав разнородных частиц, который трудно учесть в расчетных формулах [17]. Использование такого параметра, как медианный диаметр частиц наносов не компенсирует этот недостаток, так как показывает только одну величину и не отражает полностью все разнообразие размерности частиц состава наносов. Неточности, допускаемые при усреднении размера частиц донных отложений, используемых для расчета конфигурации профиля равновесия, снижают точность последней.

Достаточно значительная разница в положении большинства профилей равновесия и профилей подводного берегового склона может быть объяснена “молодостью” берегов и прочностью большинства берегоформирующих пород, особенно в Северном Прионежье, это приводит к тому, что во многих районах на текущий момент подводный береговой склон слабо изменен под влиянием береговых процессов. Другими словами, его конфигурация не просто не приблизилась к конфигурации профиля равновесия, но и даже не начала приближаться к ней. Часто он защищен от воздействия волн озера так называемой “валунно-глыбовой отмосткой” – чехлом из крупнообломочного моренного материала, который его покрывает.



**Рис. 5.** Сопоставление профилей подводного берегового склона и профилей равновесия для бухт Заячьего (а), Шокша (б), Розмегская (в), Гиморецкая (г) и для участка устья р. Мегры (д). *1* – нижняя граница зоны волнового воздействия; *профили: 2* – подводного берегового склона, *3* – равновесия.

## ВЫВОДЫ

Каждому из семи выделенных для Онежского озера типов берегов свойственны свои особенности профилей подводного берегового склона и профилей динамического равновесия, в том числе и различная степень их устойчивости. Наибольшей устойчивостью обладают аккумулятивные берега с профилем подводного берегового склона, близким по форме к профилю динамического равновесия. Сравнительно устойчивы также лагунные и дельтовые, в несколько меньшей степени – абразионно-аккумулятивные. В наибольшей степени профиль равновесия отличается от профиля

подводного берегового склона для слабоизмененных и абразионных берегов; для аккумулятивных и дельтовых, напротив, они близки друг к другу (но бывают и исключения).

Анализ полученных профилей приближает к возможности прогнозирования их поведения в долгосрочной перспективе (на несколько десятилетий), и оценке степени устойчивости подводного берегового склона, но здесь имеется немало трудностей. За это время могут измениться уровень озера (устойчивые участки берега после этого могут стать неустойчивыми), крупность донных отложений, сила волнового воздействия.

Совмещение профилей подводного берегового склона и профилей равновесия позволяет примерно оценить расстояние, на которое берег может потенциально отступить или наступить при сохранении текущего уровня озера и размерности донных отложений. Также анализ совмещенных профилей дает возможность оценить примерный объем аккумуляции береговых отложений на подводном береговом склоне, но не темпы их накопления. Последние зависят от наличия впадающих рек и объемов их твердого стока, общей циркуляции вод озера, силы и направления ветров и волнения.

Значительное несовпадение профилей динамического равновесия и фактических профилей подводного берегового склона для большинства берегов Онежского озера указывает на имеющий место дефицит наносов (реже их избыток). Дефицит даже при неизменном уровне озера и отсутствии других значимых для динамики берегов изменений обуславливает потенциальную активность абразионных процессов. Дополнительно активизирует их подъем уровня Онежского озера на 0.4 м, который имел место вследствие строительства Свирской ГЭС [20], что снижает степень устойчивости его берегов в целом и их подводного берегового склона и осложняет ее оценку.

Изучение имеющейся литературы и полевые исследования позволили выявить сдерживающие факторы, которые существенно замедляют абразионные процессы для большей части берегов Онежского озера. К ним относятся сильная изрезанность берега, существенно ослабляющая волновое воздействие в многочисленных губах и заливах, даже широких, а также прочность кристаллических берегоформирующих пород, преимущественно докембрийского возраста, прикрытых лишь тонким слоем четвертичных ледниковых отложений. Важную роль в сдерживании абразии играет также “валунно-галечная отмостка”, распространенная на многих участках, особенно в Северном Прионежье, которая сдерживает волновое воздействие.

На примере берегов Онежского озера показана возможность применения метода построения профилей равновесия для прогноза динамики берегов и оценки устойчивости берега и подводного берегового склона для крупных озер, водохранилищ и морских берегов, что актуально для всех побережий, используемых человеком.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-302-00545\18.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лонгинов В.В. Энергетический метод оценки вдольбереговых перемещений наносов в береговой зоне моря // Тр. СоюзморНИИпроекта. 1966. № 12 (18). С. 13–28.
2. Правоторов И.А. О применении гидрометеорологического метода изучения вдольберегового перемещения морских наносов // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1961. № 2. С. 34–43.
3. Корзинин Д.В. Рельеф подводного берегового склона северного побережья Самбийского полуострова (Юго-Восточная Балтика) // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 78–81.
4. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.

5. Дачев В.Ж., Леонтьев И.О. Механизм и теоретические предпосылки поперечного байпасса морских наносов // Труды на Института по океанология. Т. 5. Варна. 2005. С. 161–169.
6. Игнатов Е.И., Каплин П.А. ТЭД “Каспий”. М.: Экопрос, 1992. 48 с.
7. Игнатов Е.И. Береговые морфосистемы. М.–Смоленск: Маджента, 2004. 352 с.
8. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Наука, 1962. 710 с.
9. Зарбаилов А.Ю. Ветроволновой режим и условия плавания на Ладожском и Онежском озерах. М.: Транспорт, 1966. 83 с.
10. Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях. М.: Гидрометеоиздат, 1975. 244 с.
11. Исследование современного состояния и качества вод Онежского озера: Отчет о НИР (заключительный) по ГК № 31/14 от 16.09.2014 / ФГБУ “ГОИН”. Рук. Землянов И.В. 2015. 622 с.
12. Филатов Н.Н., Калинин Н.М., Куликова Т.П., Литвиненко А.В., Лозовик П.А. (ред.) Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 2015. 375 с.
13. Волков И.М., Кононенко П.Ф., Федичкин И.К. Гидротехнические сооружения. М.: Колос, 1968. 464 с.
14. Семенович Н.Н. Донные отложения Онежского озера. Л.: Недра, 1973. 104 с.

### Stability of Different Coast Types of Lake Onega

E. I. Ignatov<sup>a</sup> and A. Yu. Sanin<sup>b,#</sup>

<sup>a</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of geography, Moscow, Russia*

<sup>b</sup> *Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: eather86@mail.ru*

Comparison of the calculated profiles of dynamic equilibrium and the actual profiles of the underwater coastal slope showed that the majority of the shores of Lake Onega are characterized by poor stability. The profiles of the underwater coastal slope were obtained as a result of field work, including depth measurements and analysis of particle size distribution of bottom sediments along the profile line. Dynamic equilibrium profiles were obtained using the Dean-Brown formula, taking into account the prevailing size of bottom sediments.

Previously, 7 morphogenetic types of shores were identified along the Onega Lake shores: poorly altered, abrasive, erosional-aggrading, aggrading, deltaic, lagoonal and technogenic. For various reasons, slightly modified and accumulative types can be considered relatively stable, but their stability is noticeably reduced due to an increase in the water level of the lake, which was about 0.5 m in the 20<sup>th</sup> century. Erosional coasts are the least stable. Weakly altered shores are common in the Northern Prionezhye, aggrading shores are found in the Southern and Eastern regions. Erosional shores predominate in the Western Prionezhye, and fragmentarily occur in the Eastern one. Instability and active dynamic processes characteristic of a significant part of the shore, cause long-term risks for their economical, in particular, recreational use.

Studies of the degree of coastal stability depending on their type by comparing the actual measured profiles of the underwater coastal slope with the constructed profiles of dynamic equilibrium are relevant for all the shores of seas and large inland waters, especially those that are intensively used by humans. This method of research allows us to identify sections of the shore with the least long-term risks for infrastructure facilities.

*Keywords:* Lake Onega, coastal stability, dynamic equilibrium profiles, shore type, abrasion, accumulation, coastal and bottom sediments

### ACKNOWLEDGEMENT

The research was performed with financial support RFFR, research project № 18-302-00545\18.

## REFERENCES

1. Longinov V.V. *Energeticheskii metod otsenki vdol' beregovykh peremeshchenii nanosov v beregovoii zone morya* (The energy method for the assessment of beach drift in the coastal zone of the sea). *Trudy SoyuzmorNIiproekta*. 1966. No. 12 (18). P. 13–28.
2. Pravotorov I.A. *O primeneniі gidrometeorologicheskogo metoda izucheniya vdol' beregovogo peremeshcheniya morskikh nanosov* (On the application of hydrometeorological method of studying beach drift of marine sediments). *Vestn. MGU. Ser. 5. geografiya*. 1961. No. 2. P. 34–43.
3. Korzinin D.V. *Rel'ef podvodnogo beregovogo sklona severnogo poberezh'ya Sambiiskogo poluostrova (Yugo-Vostochnaya Baltika)* (Relief of the underwater coastal slope of the northern coast of the Sambian Peninsula (South-Eastern Baltic)). *Vestn. MSU. Ser. 5. geografiya*. 2009. No. 6. P. 78–81.
4. Leont'yev I.O. *Pribezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov* (Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows). M.: GEOS, 2001. 272 p.
5. Dachev V.Zh. and Leont'yev I.O. *Mekhanizm i teoreticheskie predposylki poperechnogo baipassa morskikh nanosov* (Mechanism and theoretical background of the transverse bypass of marine sediment). *Trudove na Instituta po okeanologiya*. T. 5. Varna. 2005. P. 161–169.
6. Ignatov E.I. and Kaplin P.A. *TED "Kaspii"* (TED "Caspian"). M.: Ekopros, 1992. 48 p.
7. Ignatov E.I. *Beregovye morfosistemy* (Coastal morphosystems). M.—Smolensk: Madzhenta, 2004. 352 p.
8. Zenkovich V.P. *Osnovy ucheniya o razvitiі morskikh beregov* (Basics of the development of seacoasts theory). M.: Nauka, 1962. 710 p.
9. Zarbailov A.Yu. *Vetrovolnovoi rezhim i usloviya plavaniya na Ladozhskom i Onezhskom ozerakh* (Wind and wave regime and navigation conditions of Ladoga and Onega lakes). M.: Transport, 1966. 83 p.
10. *Rukovodstvo po metodam issledovaniі i raschetov peremeshcheniya nanosov i dinamiki beregov pri inzhenernykh izyskaniyakh* (Manual on methods of research and calculations of sediment movement and coast dynamics in engineering surveys). M.: Gidrometeoizdat, 1975. 244 p.
11. *Issledovanie sovremennogo sostoyaniya i kachestva vod Onezhskogo ozera: Otchet o NIR (zaklyuchitel'nyi) po GK No. 31/14 ot 16.09.2014* (Study of the current state and water quality of lake Onega) / FGBU "GOIN". Rukovoditel' Zemlyanov I.V. M. 2015. 622 p.
12. Filatov N.N., Kalinkina N.M., Kulikova T.P., Litvinenko A.V., and Lozovik P.A. (ed.) *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* (The largest dam lakes in the North-West of the European territory of Russia: the current state and ecosystem changes under climatic and anthropogenic influence). Petrozavodsk: Izd. Karelskogo nauchnogo centra RAN, 2015. 375 p.
13. Volkov I.M., Kononenko P.F., and Fedichkin I.K. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya* (Hydrotechnical constructions). M.: Kolos, 1968. 464 p.
14. Semenovich N.N. *Donnye otlozheniya Onezhskogo ozera* (Bottom sediments of lake Onega). L.: Nedra, 1973. 104 p.