

УДК 911.2.

## ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ИХ РАЗВИТИЯ

Е. И. Игнатов<sup>1,2</sup>, И. В. Землянов<sup>1</sup>, А. Ю. Санин<sup>1</sup>, Е. В. Борщенко<sup>1</sup>,  
П. Н. Терский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия

Приводятся результаты применения расчетных методов для всех типов берегов различных районов Онежского озера, за исключением Северного Прионежья. В частности, были применены такие методы, как ветроэнергетический и волноэнергетический. Предварительно на основе морфогенетического анализа выделены следующие типы берегов: первичные слабоизмененные экзарационные тектонические, абразионные, в том числе и абразионно-денудационные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные, лагунные, дельтовые и антропогенные. Применение ветроэнергетического метода позволило рассчитать относительную мощность вдольбереговых потоков наносов и их направление. Волноэнергетический метод обеспечил возможность количественной оценки емкости вдольбереговых потоков наносов, которая сильно – в некоторых случаях на порядок – различается от участка к участку. Наибольшие значения характерны для средней части восточного побережья озера, что объясняется сильными ветрами, характерными для этого района. Произведено сопоставление расчетных профилей динамического равновесия с реальными поперечными профилями подводного берегового склона. Сопоставление показало малую степень выработки профилей, которые, как правило, значительно отличаются от профилей динамического равновесия. Это указывает на юность значительной части берегов, но важную роль здесь играет и слой отмытой из ледниковых отложений крупной гальки и валунов. Для большинства участков береговой зоны Онежского озера имеет место определенный дефицит наносов, что активизирует развитие абразионных берегов.

Ключевые слова: морфогенетические типы и динамика берегов; Онежское озеро; расчетные методы; подводный береговой склон; вдольбереговой поток наносов; абразия; аккумуляция.

**E. I. Ignatov, I. V. Zemlyanov, A. Yu. Sanin, E. V. Borshchenko, P. N. Tersky. APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING METHODS FOR STUDYING THE DYNAMICS OF LAKE ONEGO SHORES**

The results of applying computational methods are reported for all types of Lake Onego shores in different parts of the lake except for its northern part. In particular, the wind energy and wave energy methods were applied. The shores were first typified based on morphogenetic analysis and the following types were identified: primordial, abrasional, abrasion-accumulative, accumulative, lagoon, deltaic, anthropogenic, etc. Application of the wind energy method allowed to determine the relative capacity of longshore drift and its direction. The wave energy method helped quantify the longshore drift, whose

capacity varies extensively among sites, sometimes by an order of magnitude. The values were the highest in the middle part of the lake's eastern shore, due to strong winds, which are common in this area. The calculated dynamic equilibrium profiles were compared with the actual shoreface cross-section. This comparison showed a low degree of profile erosion. The profiles typically differed significantly from the dynamic equilibrium profile. This proves that a large part of the shore is not very old, but the layer of large pebbles and boulders washed out of glacial deposits also plays an important role. There is a lack of sediments in most of Lake Onego shore areas, which stimulates abrasion.

**Keywords:** shore morphogenetic types and dynamics; Lake Onego; computational methods; shoreface; longshore drift; abrasion; accumulation.

---

## **Введение**

Изучение современной динамики берегов крупных озер и водохранилищ и прогноз их развития имеет важное теоретическое и практическое значение. Такой прогноз невозможно подготовить без учета знаний об истории развития берегов и их современном состоянии, их физико-географических особенностей, а также без проведения их морфогенетической типизации.

Существует два подхода к изучению динамики берегов морей и крупных внутренних водоемов: комплексные натурные наблюдения, в том числе организация стационара или даже сети стационаров, и применение расчетных методов для изучения динамических процессов, происходящих на берегах. Второй способ приобретает все большую популярность благодаря своей сравнительной дешевизне и универсальности.

Применение расчетных методов позволяет оценить направление, относительную интенсивность и примерное распределение по подводному береговому склону движущихся вдоль берега наносов и мощность вдольберегового потока наносов [Руководство..., 1975].

Выполненные с использованием факторного анализа береговой системы расчеты позволили выявить зависимости между гидрометеорологическими условиями региона и показателями динамики наносов вдольбереговой зоны озера. В то же время они позволяют изучить изменения поперечного профиля подводного берегового склона и последствия этого процесса для динамики берегов. Количественная и качественная оценка емкости вдольберегового потока наносов может быть осуществлена при помощи таких расчетных методов, как ветроэнергетический и волноэнергетический. Для изучения изменений поперечного профиля подводного берегового склона и их последствий осуществляется сопоставление полученных в ходе полевых работ фактических эхолотных поперечных профилей с расчетными профилями динамического равновесия.

Использованные расчетные методы намного дешевле полевых исследований и требуют меньших временных и трудовых затрат. Другое их преимущество – возможность определения параметров потоков наносов и развития береговой зоны за многолетний период времени, что часто невозможно определить за один полевой сезон, который может характеризоваться существенными отклонениями климатических показателей от многолетних значений. Недостатком представляется несколько меньшая точность в сравнении с результатами полевых исследований и недостаточный учет местных особенностей.

В течение 2014–2015 года сотрудниками Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова были организованы полевые исследования Онежского озера и его водосборного бассейна. На основании анализа собранного материала, а также фондовых и литературных данных была осуществлена морфогенетическая типизация берегов и выполнено районирование побережий. Каждому типу берега присущи свои физико-географические, морфологические и динамические особенности, что учитывалось при применении расчетных методов впоследствии. За счет использования маломерного судна и специального оборудования были построены около 30 продольных профилей подводного берегового склона для разных частей акватории озера. Они были сопоставлены с расчетными, с так называемыми профилями динамического равновесия. Составление подводных профилей было дополнено водолазным исследованием подводного берегового склона и осуществлением отбора проб донных грунтов. Впоследствии они были подвергнуты гранулометрическому анализу, что позволило использовать полученные по их крупности данные для построения профилей динамического равновесия для ключевых участков.

Совмещение результатов анализа фондовых и литературных данных, собственных полевых исследований и проведенных расчетов позволило выделить участки береговой зоны

разных районов побережья Онежского озера, для которых характерны наибольшие морфодинамические и литодинамические изменения береговой зоны.

Цель исследования: оценка морфологии и динамики различных типов берегов Онежского озера с применением расчетных методов.

Задачи исследования:

1. Типизировать берега Онежского озера по морфогенетическому принципу.

2. Дать обзор существующим расчетным методам, которые могут быть применены для изучения динамики берегов Онежского озера.

3. Произвести качественную оценку воздействующей на берега Онежского озера волновой энергии и выявить соотношения ее прямой (направленной по нормали к береговой линии) и вдольбереговой составляющих.

4. Рассчитать емкость вдольбереговых потоков наносов Онежского озера, кроме его северной части, по волноэнергетическому методу В. В. Лонгинова.

5. На основании сопоставления расчетных профилей равновесия и фактических измеренных профилей подводного берегового склона оценить морфодинамическое состояние береговой зоны и определить прошлые и будущие тренды в ее эволюции.

## Материалы и методы

Основной движущей силой для абразии берегов и вдольберегового перемещения наносов является поток волновой энергии. Решающим фактором для него является ветер, так как именно он, будучи носителем энергии, возбуждает волнение и течения. Однако важную роль играет и размер водоема, определяющий длину разгона ветровых волн. Ветер определяет интенсивность абразии морского берега и подводного берегового склона, направление перемещения и расход вдольберегового потока наносов. Объемные показатели расхода наносов, как правило, пропорциональны величинам потока волновой энергии. Таким образом, для дистанционного определения литодинамических условий береговой зоны в рамках отдельно взятого региона необходим расчет волновых энергетических характеристик.

Для выполнения данной работы использовались гидрометеорологические методы. К ним относятся ветроэнергетический и волноэнергетический [Руководство..., 1975]. Также было осуществлено построение профилей равновесия для подводного берегового склона с последующим их сопоставлением с реальными профилями. Основная цель применения

гидрометеорологических методов: качественная и количественная характеристика вдольберегового потока наносов, которая становится возможной после проведения расчетов с использованием данных по ветру, волнению, глубинам и конфигурации береговой линии. В настоящее время существует несколько методов расчета волновых энергетических характеристик, не считая многочисленных эмпирических формул. Большинство из этих формул получены в результате анализа данных наблюдений при частных условиях и не могут быть распространены на более общие случаи, сомнительным представляется и их использование без учета региональных особенностей.

В ходе применения гидрометеорологических методов берег разбивается на некоторое количество участков, в зависимости от его конфигурации. В ходе данного исследования весь берег Онежского озера, за исключением его северной части, был разбит на 25 участков.

### *Ветроэнергетический метод*

Ветроэнергетический метод позволяет на качественном уровне оценить емкость вдольберегового потока наноса, а также определить его направление. Исходными данными, необходимыми для его применения, являются главным образом характеристики ветра. Учитывается также дальность разгона волн.

Ветроэнергетический метод целесообразно применять для выявления общей тенденции развития берегов, для прогнозирования развития береговых процессов, разработки долгосрочных мероприятий по защите берегов. Применяется он также с целью реконструкции этих процессов для воссоздания истории развития побережья. Расчеты по данному методу позволят сравнить интенсивность вдольберегового потока наносов и динамики берегов для выделенных районов. Впервые ветроэнергетический метод был предложен И. Мунх-Петерсоном [1933] и В. Г. Глушковым [1934], над ним работали В. В. Лонгинов [1963, 1966], И. А. Правоторов [1961] и другие исследователи [Руководство..., 1975]; он позволяет подсчитать ветровую составляющую волновой энергии на основании климатических данных и морфологии бассейна (глубина, конфигурация берегов и т. д.). Общая формула для расчета по ветроэнергетическому методу И. А. Правоторова [1961] имеет вид:

$$E = \rho W^n D^m \text{ [Руководство..., 1975],}$$

где  $\rho$  – повторяемость ветра в пределах данного румба или полурумба, в долях единицы или

%;  $W$  – осредненная скорость ветра, м/с;  $D$  – предельная дальность.

Формула расчета  $D$  имеет следующий вид:

$D_{пр} = 0,8W^2$ , где  $W$  – осредненная скорость ветра, м/с [Руководство..., 1975].

Показатели степени для формулы  $E = \rho W^n D^m$  приняты согласно Кнапсу [1968],  $n = 3$ ,  $m = 0,33$ . В реальных расчетах полученный результат также умножают на коэффициент  $k$ , который отражает полноту румбового сектора, то есть отношение ко всему сектору активной его доли [Руководство..., 1975].

Результаты, полученные в ходе расчетов по ветроэнергетическому методу, позволяют сопоставить величину вдольбереговой и поперечной составляющих волновой энергии. Для тех участков берега, для которых преобладает вдольбереговая составляющая, характерен дефицит наносов и, как следствие, абразия или размыв. Исключением могут быть участки берегов со значительным приходом наносов, например, смежные с устьями рек либо участки, на которых имеет место искусственная подсыпка грунта. Для участков побережья с преобладанием поперечной составляющей волновой энергии характерны относительная стабильность берега и быстрые темпы изменения поперечного профиля подводного берегового склона.

#### *Волноэнергетический метод*

Количественная оценка, или оценка абсолютной величины волновой энергии, может быть получена с помощью волноэнергетического метода. Энергия волн рассчитывается исходя из силы и повторяемости ветров различных направлений с использованием эмпирических коэффициентов. В отличие от ветроэнергетического метода волноэнергетический метод позволяет получить абсолютные значения величины волновой энергии для любого участка, что впоследствии позволяет количественно оценить емкость вдольберегового потока наносов. А. М. Жданов [Руководство..., 1975] предложил рассчитывать энергию волн для всех баллов и полурумбов волнения следующим образом:

$$E = \frac{\chi^{cp} h^2}{8\tau^{cp}} \text{ [Руководство, 1975]},$$

где  $\chi^{cp}$  – средняя длина волны;  $h$  – высота волны;  $\tau^{cp}$  – средний период волны;  $E$  – энергия за секунду на погонный метр фронта волны.

Волновая энергия подсчитывается в условных единицах. Для перехода к емкости потока наносов, которая выражается в объемных

величинах, использована формула В. В. Лонгина, которая имеет следующий вид:

$$Q = 80000T^{1,25} \text{ [Руководство..., 1975]},$$

где  $T$  – наносодвижущая сила, действующая вдоль берега и выраженная в условных единицах.

Из литературы [Руководство..., 1975] известно, что  $T = E \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между направлением ветров данного румба и экспозицией данного участка берега,  $E$  – волновая энергия в условных единицах, которая ранее была подсчитана с применением ветроэнергетического метода. Таким образом, волноэнергетический метод может быть употреблен лишь «в связке» с ветроэнергетическим методом.

Под емкостью вдольберегового потока наносов понимают его потенциальную мощность, т. е. тот объем наносов, который он потенциально способен перемещать за определенный период времени, например за один год.

Как правило, емкость вдольбереговых потоков наносов составляет десятки и сотни тысяч тонн в год, в зависимости от гидрометеорологических условий, конфигурации берегов, а также материалов, преобладающих в пляжевых и донных отложениях. Оценка объема переноса наносов очень важна для решения ряда прикладных задач: определения скоростей абразии и аккумуляции берега, скорости заносимости судоходных каналов и подходов к портовым сооружениям и т. д.

#### *Построение поперечных профилей подводного берегового склона и их сопоставление с профилями равновесия*

Данный метод базируется на постулате учения о развитии морских берегов о существовании поперечного профиля динамического равновесия подводного берегового склона, описанного, в частности, В. П. Зенковичем [1962], а также на сравнении друг с другом.

Профили подводного берегового склона были получены в результате полевых исследований на ключевых участках. Построение профилей равновесия было выполнено по методике Дина – Брууна [Леонтьев, 2001].

Профиль Дина описывается формулами

$$h = Ax^{2/3}; A = 0,067W_s^{0,44} \text{ [Леонтьев, 2001]},$$

где  $h$  – глубина;  $x$  – расстояние от берега;  $w_s$  – гидравлическая крупность наносов, выраженная в см/с<sup>-1</sup>.

Следует отметить, что под  $w_s$  понимают именно гидравлическую крупность наносов, которую не следует путать с традиционной гранулометрической крупностью, измеряемой

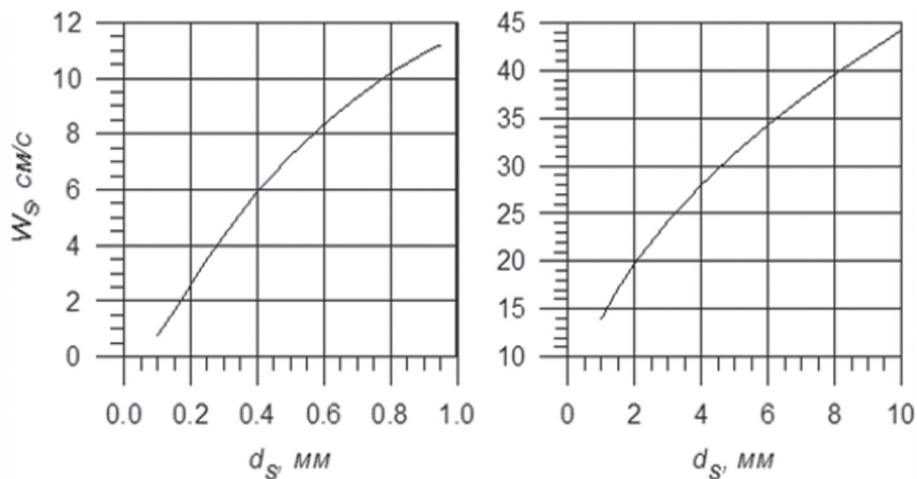


Рис. 1. Определение  $w_s$  по среднему размеру твердых частиц  $d_s$ , на графике слева – для песка, справа – для гравия [Леонтьев, 2001]

Fig. 1. Determination of  $w_s$  by the average size of solid particles  $d_s$ , on the left in the diagram it is shown for sand, on the right – for gravel [Leontiev, 2001]

в мерах длины. Под гидравлической крупностью понимают скорость падения частиц наносов в стоячей воде при 10 градусах Цельсия [Зенкович, 1962].

Параметр  $A$  в среднем имеет величину порядка  $10^{-1}$ , но может достаточно заметно колебаться в зависимости от крупности наносов. Чем больше размер наносов, тем больше требуется времени на их перемещение (при прочих равных условиях).

Чтобы определить  $w_s$  по среднему размеру твердых частиц  $d_s$ , можно воспользоваться зависимостью ван Рейна, которая приводится в работе И. О. Леонтьева [2001] и показана на рис. 1.

## Результаты и обсуждение

### Результаты применения ветроэнергетического метода

Применение ветроэнергетического метода позволило получить качественное соотношение вдольберегового и поперечного потока волновой энергии (рис. 2). Цифрами обозначены участки, на которые был разделен берег, перпендикулярные к берегу стрелки обозначают поперечную составляющую потока, параллельные берегу – продольную, вдольбереговую составляющую, а их направление отображает преобладающее направление потока наносов.

Расчеты проводились для всей акватории Онежского озера, за исключением ее северной части. Вдольбереговые потоки наносов здесь маломощны или отсутствуют, преобладают

слабоизмененные берега, на которых динамические процессы выражены незначительно.

Преобладание вдольбереговой составляющей обеспечивает повышенную мощность транспорта наносов, что стимулирует абразию. Сопоставление полученных результатов с картой типов берегов [Исследование..., 2015] это подтверждает. В пределах участков с преобладающей вдольбереговой составляющей практически все берега являются абразионными или абразионно-аккумулятивными. Там, где имеет место преобладание нормально направленной к берегу составляющей, преобладает аккумуляция.

В пределах восточного берега поперечная составляющая преобладает в северной части региона, и там также преобладают абразионно-аккумулятивные берега. В Южном Прионежье в силу низменного характера берегов преобладает аккумулятивный тип, несмотря на различное соотношение вдольбереговой и поперечной составляющей наносодвижущей силы.

### Результаты применения волноэнергетического метода

Волноэнергетический метод позволил подсчитать годовые емкости вдольберегового потока наносов на ключевых участках, для некоторых из них результаты приведены в таблице.

Из таблицы видно, что для разных участков они существенно отличаются, эти отличия подтверждаются и очень разными темпами абразии и аккумуляции, отмеченными при полевых наблюдениях. Однако следует уточнить, что была

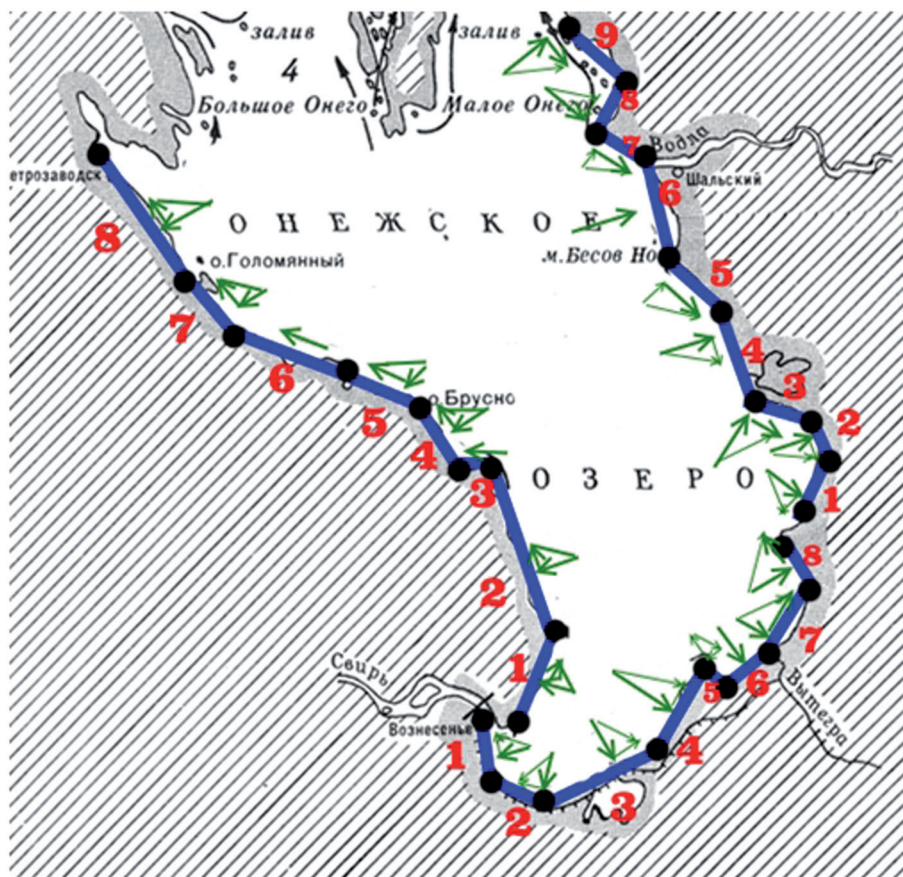


Рис. 2. Соотношение вдольбереговой и поперечной компонент наносодвижущей силы для южного, западного и восточного побережья Онежского озера  
 Fig. 2. Correlation of longshore and cross-section components of sediment-moving power for southern, western, and eastern shores of Lake Onego

рассчитана емкость потока наносов, а не его фактическая мощность. Если последняя меньше, чем емкость, имеет место дефицит наносов, что усиливает абразию; если мощность превышает емкость, начинаются аккумулятивные процессы, абразия сильно ослабевает или прекращается. Однако прямой зависимости между потенциальной емкостью вдольберегового потока наносов и типом берега все же не получено.

Выявлено несколько конкретных примеров, подтверждающих взаимосвязь результатов, полученных в ходе применения расчетных методов, и результатов обобщения фондовых и литературных, а также полевых данных, в частности, распределения берегов по типам. Так, на западном берегу Онежского озера между островами Брусно и Голомянный преобладают абразионно-аккумулятивные и аккумулятивные берега. Применение ветроэнергетического метода показало преобладание на этом участке поперечной составляющей волновой энергии. Вдольбереговой поток наносов направлен здесь в сторону Петрозаводской губы. Севернее острова

Голомянного, по всей видимости, происходит его «разгрузка». Материал, поступающий в ходе абразии берегов южнее и выносимый реками, откладывается. Здесь преобладают уже аккумулятивные и дельтовые берега. Уменьшение мощности вдольберегового потока наносов подтверждается и результатами применения волноэнергетического метода.

Для восточного и западного берега озера характерно чередование абразионно-аккумулятивных (реже абразионных) и абразионных участков. Применение ветроэнергетического метода также показало чередование участков с незначительным преобладанием вдольбереговой или поперечной составляющих волновой энергии. В Южном Прионежье широко распространены аккумулятивные берега, что хорошо сопоставляется с результатами применения ветроэнергетического метода. Исключение составляет участок берега между устьями Андомы и Вытегры и района мыса Новый нос (район озера Мегрского), на котором преобладает поперечная составляющая.

Результаты подсчета емкости потока наносов

Results of drift capacity calculation

№ участка Site No.	Название участка (в скобках приводится название ближайшего пункта наблюдений за волнами) Site name (the closest point for wave observing is given in brackets)	Преобладающий на участке тип берегов Prevalent type of shores	Величина волновой энергии за секунду на пог. м берега Wave energy magnitude per second per running meter of the shore	Объем потока наносов, т/год Sediment drift volume, tpa
1	Район поселка Деревянное (Шелтозеро) Derevyannoye settlement area (Shyoltozero)	Аккумулятивные Accumulative	0,1284	1013,9
2	Бухта Шокша – бухта Заячья (Шелтозеро) Shoksha Bay – Zayachya Bay (Shyoltozero)	Абразионно-аккумулятивные Abrasion-accumulative	0,357	2819
3	Гиморецкая бухта (Шелтозеро) Gimoretskaya Bay (Shyoltozero)	Абразионно-аккумулятивные Abrasion-accumulative	0,1284	1131,98
4	Свирская губа (поселок Вознесенье) Svirskaya Bay (the settlement of Voznesenye)	Аккумулятивные Accumulative	0,274	1452
5	Район устья Андомы (Андома) The mouth of the Andoma River (Andoma)	Абразионные, абразионно-аккумулятивные Abrasional, abrasion-accumulative	1,0389	10614
6	Устье реки Руданка – мыс Муромский (Андома) The mouth of the Rudanka River – Cape Muromsky (Andoma)	Абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные, дельтовые Abrasion-accumulative, accumulative, deltaic	1,0389	5927
7	Мыс Бесов нос – мыс Крестовый наволоок (о. Василисин) Cape Besov Nos – Cape Krestovy Navolok (Vasilisin Island)	От абразионных до аккумулятивных From abrasional to accumulative	0,908	15527

*Результаты сопоставления профилей равновесия и фактических профилей подводного берегового склона*

Существует несколько классификаций фактических профилей береговой зоны, оптимальной из которых представляется классификация, разработанная В. В. Лонгиновым [Руководство..., 1975]. Он выделяет три их основных типа:

1. Приглубые, для которых характерно непрерывное возрастание деформации волны вплоть до ее разрушения непосредственно у уреза. Сюда же относятся берега, сложенные прочными коренными породами, которым свойственна значительная крутизна подводного берегового склона. Волны на таких участках обладают значительной разрушительной силой. Уклон берега до изобаты 5 м составляет более 0,02. Для таких профилей характерен дефицит наносов из-за подстилающих коренных пород, устойчивых к размыву, что существенно сдерживает

абразионные процессы. Пример – участки в бухте Шокша, в бухте Рыбрека, в районе Челмужской косы в ее верхней части и др.

- Отмелые, с постепенным забуруниванием и рассыпанием волны, медленной деформацией волны и отсутствием процесса ее опрокидывания. Предельный случай – волна не доходит до берега вовсе. Уклон берега до изобаты 5 м – менее 0,01. Сюда относится фактический профиль в бухте Уя и др.
- Промежуточные, со средней крутизной, с многократным разрушением волны и с возрастанием ее деформации каждый раз перед разрушением. После каждого разрушения высота волны становится меньше. Уклон берега до 5 м – примерно 0,01–0,02. Здесь может быть как дефицит наносов, так и их избыток, но во втором случае их тоже недостаточно для формирования отмелого профиля. К таким профилям относится фактический профиль в устье реки Вытегра, около поселка Каскесручей, в районе Медвежьегорска.

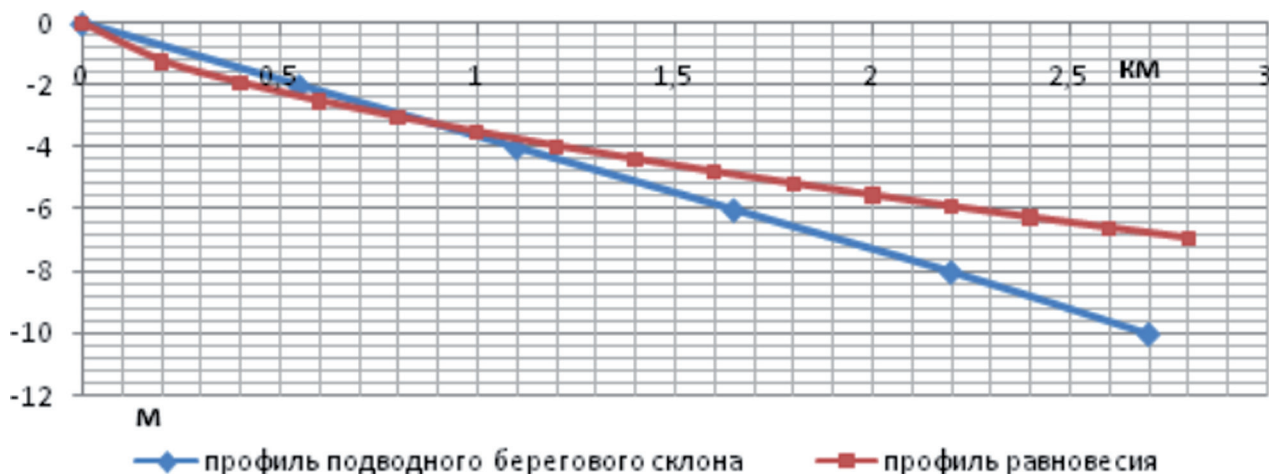


Рис. 3. Фактический и расчетный профили от мыса Карицкие носы

Fig. 3. Actual and calculated profiles from Cape Karitskie Nosy

Разумеется, такое разделение достаточно условно, тем не менее большинство построенных в ходе исследования фактических профилей подводного берегового склона можно отнести к одному из выделенных типов. В некоторых случаях профили, построенные в пределах одной бухты, могут относиться к разным типам, например, профиль в северной части бухты Рыбрека относится к промежуточному, а в ее средней части – к отмелому.

Для отмелых и промежуточных фактических профилей часто характерны один или несколько подводных песчаных валов, расположение которых зависит от волнового режима, количества наносов, уклона профиля.

Конфигурация многих фактических профилей существенно осложнена формами рельефа, чаще всего ледникового происхождения (озы и др.). Особенно хорошо это проявляется на профиле в бухте Уя, в Повенецком заливе и др.

На западном побережье Онежского озера в целом преобладают промежуточные и приглубые профили, значительная часть берегов здесь относятся к абразионным. Очевиден дефицит наносов и преобладание абразии над аккумуляцией. Для восточного берега характерно наличие всех трех типов профилей подводного берегового склона. Для южного берега преобладают профили подводного склона отмелого и промежуточного типа. В Северном Прионежье типы профилей разнообразны. Часто встречаются упомянутые выше берега с приглубым подводным береговым склоном, сложенные прочными горными породами, устойчивыми к абразии. Они испытывают сильное волновое воздействие, но активные абразионные процессы им несвойственны.

В ходе выполнения работ кроме фактических профилей подводного берегового склона были построены также профили равновесия по методике Дина – Брууна. Профили равновесия заметно отличаются от фактических профилей при сопоставлении, но эта разница изменяется от участка к участку. Большая выпуклость, характерная для многих фактических профилей в сравнении с профилями равновесия, указывает на слабую степень выработанности большинства из них. В настоящее время фактические профили подводного берегового склона по своей конфигурации в большинстве своем отличаются достаточно существенно от конфигурации профиля равновесия. Из всех профилей лишь один, построенный через мыс Карицкие носы, в общих чертах совпадает с профилем равновесия (рис. 3). Это объясняется преобладанием аккумулятивных и дельтовых берегов на этом участке, для которых характерно достаточное количество наносов.

Значительная разница в положении большинства профилей равновесия и фактических профилей подводного берегового склона может быть объяснена «молодостью» берегов и прочностью большинства берегоформирующих пород, особенно в Северном Прионежье. Важную роль играет также наличие галечно-валунного «чехла» на многих участках, который препятствует размытию волнами подводного берегового склона. Это приводит к тому, что во многих районах подводный береговой склон слабо изменяется при штормовых воздействиях. Другими словами, его конфигурация не просто не приблизилась к морфометрическим характеристикам профиля равновесия, но и не начала приближаться к ней.



## Выводы

В результате сопоставления результатов расчетов с данными полевых исследований, а также с литературными и фондовыми материалами выявлены следующие тенденции:

1. Для участков берегов с преобладанием вдольбереговой составляющей волновой энергии характерны активные абразионные процессы. На них формируются абразионные и абразионно-аккумулятивные берега.
2. Для участков берегов с преобладанием поперечной составляющей волновой энергии характерны сравнительно стабильные абразионно-аккумулятивные и аккумулятивные берега.
3. Результаты расчетов с использованием волноэнергетического метода позволяют выделить участки берегов с наибольшей волновой энергией. Это восточный берег Онежского озера, особенно его участок, расположенный севернее мыса Бесов нос. Величина волновой энергии здесь почти на порядок превышает этот показатель для западных и южных берегов. Это объясняется заметно большей средней силой ветров и повторяемостью экстремальных ветров. При прочих равных условиях (прочность берегоформирующих пород, уклон подводного берегового склона, высота берегового уступа и т. д.) различие в величине волновой энергии приводит к различным скоростям абразии или размыва берега, а также к более высокому темпу аккумулятивных процессов.
4. Сопоставление фактических профилей поперечного берегового склона с расчетными профилями равновесия показывает малую степень выработанности многих из них, что указывает на юность значительной части берегов озера. Медленная эволюция берегов объясняется прочностью пород, слагающих некоторые из них, сильной изрезанностью береговой линии и слабым волнением

в многочисленных губах, бухтах и заливах. Малая интенсивность абразионных процессов на таких берегах в значительной мере объясняется наличием на многих участках подводного берегового склона галечно-валунного «чехла», который сдерживает изменчивость и трансформацию подводного берегового склона, а следовательно, и берега.

## Литература

Глушков В. Г. Роль влияния ветра, вектор миграции, вектор перемещения наносов и вектор лобового воздействия // За рационализацию гидрологии: Сб. науч. тр. Л.: ГГИ, 1934. С. 13–27.

Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: АН СССР, 1962. 711 с.

Исследование современного состояния и качества вод Онежского озера: Отчет о НИР (заключительный) по ГК № 31/14 от 16.09.2014 / ФГБУ «ГОИН». Руководитель И. В. Землянов. М., 2015. 622 с.

Кнапс Р. Я. О расчете мощности вдольбереговых потоков песчаных наносов в море // Океанология. 1968. Т. 8, вып. 5. С. 848–857.

Леонтьев И. О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.

Лонгинов В. В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. М.: АН СССР, 1963. 379 с.

Лонгинов В. В. Энергетический метод оценки вдольберегового перемещения наносов в береговой зоне моря // Труды Союзморниипроекта. 1966. № 12(18). С. 13–28.

Мунх-Петерсон И. Движения наносов вдоль берега бесприливных морей // Доклады IV Гидрологической конференции Балтийских стран. Л., 1933. С. 36–41.

Правоторов И. А. О применении гидрометеорологического метода изучения вдольберегового перемещения морских наносов // Вестн. МГУ. Сер. геогр. 1961. № 2. С. 28–33.

Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях. М.: Гидрометеоиздат, 1975. 244 с.

Поступила в редакцию 10.11.2017

## References

Glushkov V. G. Roza vliyaniya vetra, vektor migratsii, vektor peremeshcheniya nanosov i vektor lobovogo vozdeistviya [Speed distribution wind rose; migration vector; sediment transport vector; frontal impact vector]. *Za ratsionalizatsiyu gidrologii* [Hydrology Rationalization]. Leningrad: GGI, 1934. P. 13–27.

*Issledovanie sovremennogo sostoyaniya i kachestva vod Oнежского озера: Otchet o NIR (zaklyuchitel'nyi) po GK № 31/14 ot 16.09.2014. FGBU "GOIN"* [Research on the current state and quality of the water of Lake

Onego: the research report (final) in accordance with the GC № 31/14 dated 16.09.2014. FSBI "SOI"]. Moscow, 2015. 622 p.

Knaps R. Ya. O raschete moshchnosti vdol' beregovykh potokov peschanykh nanosov v more [On the calculation of the rate of longshore sand drifts to a sea]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1968. Vol. 8, iss. 5. P. 848–857.

Leont'ev I. O. Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov [Coastal dynamics: waves, currents, and sediment flow]. Moscow: GEOS, 2001. 272 p.

*Longinov V. V.* Dinamika beregovoi zony besprilivnykh morei [Dynamics of the coastal belt of tideless seas]. Moscow: AN SSSR, 1963. 379 p.

*Longinov V. V.* Energeticheskii metod otsenki vdol' beregovogo peremeshcheniya nanosov v beregovoi zone morya [Energetic method of longshore drifts assessment in the coastal belt of a sea]. *Trudy Soyuzmorniiiproekta* [Proceed. of the State Scientific Research, Planning and Surveying Inst. of Maritime Transport]. 1966. No. 12(18). P. 13–28.

*Munkh-Peterson I.* Dvizhenie nanosov vdol' berega besprilivnykh morei [Drifts movements along the shores of tideless seas]. *Doklady IV Gidrologicheskoi konferentsii Baltiiskikh stran* [Proceed. of the 4<sup>th</sup> Hydrol. Conf. of the Baltic Countries]. Leningrad, 1933. P. 36–41.

*Pravotorov I. A.* O primenenii gidrometeorologicheskogo metoda izucheniya vdol' beregovogo

peremeshcheniya morskikh nanosov [On the application of the hydrometeorological method for studying sea sediments transport along the shores]. *Vestn. MGU. Ser. geogr.* [Moscow Univ. Bull. Series 5. Geography]. 1961. No. 2. P. 28–33.

*Rukovodstvo po metodam issledovaniy i raschetov peremeshcheniya nanosov i dinamiki beregov pri inzhenernykh izyskaniyakh* [A manual on methods for research and calculations of sediment transport and coasts dynamics for engineering surveys]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1975. 244 p.

*Zenkovich V. P.* Osnovy ucheniya o razvitii morskikh beregov [Foundations of sea coasts dynamics]. Moscow: AN SSSR, 1962. 711 p.

*Received November 10, 2017*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Игнатов Евгений Иванович**

ведущий научный сотрудник, д. г. н.  
Государственный океанографический институт  
им. Н. Н. Зубова  
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034

заведующий лаб. геоморфологии морских берегов  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова  
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991  
эл. почта: ign38@mail.ru

### **Землянов Игорь Владимирович**

заведующий лаб. автоматизированных систем, к. ф.-м. н.  
Государственный океанографический институт  
им. Н. Н. Зубова  
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034  
эл. почта: ivz@geocentre.ru

### **Санин Александр Юрьевич**

младший научный сотрудник, к. г. н.  
Государственный океанографический институт  
им. Н. Н. Зубова  
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034  
эл. почта: eather86@mail.ru

### **Борщенко Евгения Вадимовна**

старший научный сотрудник, к. г. н.  
Государственный океанографический институт  
им. Н. Н. Зубова  
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034  
эл. почта: ev.borshchenko@gmail.com

### **Терский Павел Николаевич**

научный сотрудник, к. г. н.  
Государственный океанографический институт  
им. Н. Н. Зубова  
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034  
младший научный сотрудник  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова  
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991  
эл. почта: pavel\_tersky@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### **Ignatov, Evgeny**

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute  
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia

Lomonosov Moscow State University  
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia  
e-mail: ign38@mail.ru

### **Zemlyanov, Igor**

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute  
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia  
e-mail: ivz@geocentre.ru

### **Sanin, Alexander**

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute  
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia  
e-mail: eather86@mail.ru

### **Borshchenko, Evgenia**

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute  
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia  
e-mail: ev.borshchenko@gmail.com

### **Tersky, Pavel**

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute  
6 Kropotkinsky Per., 119034 Moscow, Russia

Lomonosov Moscow State University  
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia  
e-mail: pavel\_tersky@mail.ru