

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Институт географии Российской академии наук  
Ассоциация геоморфологов России  
Алтайский государственный университет  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Посвящается  
100-летию Института географии Российской академии наук,  
60-летию Геоморфологической комиссии Российской академии наук,  
30-летию Ассоциации геоморфологов России

## **XXXVI ПЛЕДУМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КОМИССИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Всероссийская научно-практическая конференция  
с международным участием

**ГЕОМОРФОЛОГИЯ – НАУКА XXI ВЕКА**



Барнаул

Издательство  
Алтайского государственного  
университета  
2018

**А.В. Поздняков, Ю.С. Пупышев**

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

*E-mail: synergyia.pol@gmail.com*

## **ДИНАМИКА АБРАЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ВОДНОГО БАССЕЙНА**

*Аннотация.* Описывается процесс абразионного размыва берегов при постоянном равномерном снижении уровня бассейна и приводятся расчеты величины размыва при формировании клифов и сопряженных с ними отмелей на отдельных абразионных уровнях. В качестве примера рассматривается деградация Чуйско-Курайского ледово-подпрудного озера в позднелейстоцен-голоценовое время. Для определения величины и объемов абразионного действия волн предлагается расчет размывающей энергии ветровых волн за период формирования одной абразионно-аккумулятивной ступени.

*Ключевые слова:* береговые процессы, абразия, абразионные уступы, ледниково-подпрудные озера, континуально-дискретный процесс.

**A.V. Pozdnyakov, Yu.S. Pupyshv**

*Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

*E-mail: synergyia.pol@gmail.com*

## **DYNAMICS OF ABRASION-ACCUMULATIVE PROCESSES IN CONDITIONS OF CONTINUOUS REDUCTION OF THE WATER BASIN LEVEL**

*Annotation.* The process of abrasion erosion of the banks is described with a constant uniform decrease in the basin level and calculations of the erosion value during the formation of cliffs and associated sandbanks at individual abrasion levels are given. As an example, the degradation of the Chui-Kurai ice-pond lake in the late Pleistocene-Holocene time is considered. To determine the magnitude and volume of the abrasion action of waves, it is proposed to calculate the smearing energy of wind waves during the period of formation of one abrasion-accumulative step.

*Keywords:* coastal processes, abrasion, abrasion ledges, glacial-pond lakes, continual-discrete process.

*Введение.* Механизм абразии при длительной стабильности уровня морей и озер достаточно изучен, он изложен в учебниках по курсам динамики морских берегов. Механизм же

формирования клифов и сопрягающихся с ними прибрежных отмелей и пляжей (бенча) в условиях непрерывно понижающегося уровня бассейна недостаточно раскрыт

На первый взгляд кажется, что равномерное понижение с небольшой скоростью уровня водного бассейна не должно сопровождаться образованием береговых морфологически дискретных абразионно-аккумулятивных форм. С позиции здравой логики кажется, что лестница абразионных уступов отражает прерывистость понижения уровня акватории, уступы и сочленяющиеся с ними субгоризонтальные площадки-зародыши прибрежных отмелей фиксируют остановку понижения уровня озера. На самом деле во многих природных явлениях равномерность протекания процесса выражается в морфологически прерывистой форме

Например, равномерное трансгрессивное или регрессивное изменение высоты уровня моря сопровождается континуально-дискретным процессом образования абразионно-аккумулятивных штормовых валов [5]. При этом их высота и расстояние между ними закономерно изменяются в зависимости от направленности процесса – трансгрессии или регрессии морского бассейна. Другой пример – плоскостной сток воды на слабонаклонной поверхности террас на крутом склоне закономерно трансформируется в ручейковый сток, формирующий располагающиеся на равном расстоянии друг от друга эрозионные ложбины. Или (мало кому известное) равномерное движение слоя воды, наблюдаемое на пологонаклонной гладкой поверхности (например, на дорогах с асфальтовым покрытием во время дождя), самопроизвольно превращается в дискретную форму, на удивление, устойчивого грядового движения воды.

Классическим примером континуально-дискретного типа движения вещества и рельефообразования являются грядовая форма перемещения аллювия в руслах рек или дискретный процесс формирования эрозионных террас в условиях непрерывного вреза рек при условии одновременного меандрирования. Формирование же абразионно-аккумулятивных микроуступов на морских берегах в периоды отлива или в условиях понижения уровня водохранилищ ГЭС (например, на берегах Зейского и Бурейского водохранилищ в процессе их сработки) или под действием судоходных волн на спаде паводка на равнинных реках – известный наблюдаемый и проверяемый факт.

Феноменологически механизм образования абразионно-аккумулятивных террас в условиях понижения уровня моря рассматривался [2], а затем в аналитической форме [1]. Ими теоретически была доказана возможность формирования морских террас вследствие длительного непрерывного понижения уровня моря.

Причины разрывов в динамике абразионно-аккумулятивной морфоскульптуры. Динамика геосистем (и природных в целом) в абсолютном большинстве определяется главным образом развитием процесса с насыщением [6], объективно предполагающим разрыв в формировании морфоскульптуры (в данном случае образование уступов), при непрерывном (континуальном) потоке энергии на входе геосистемы. В рассматриваемом аспекте с насыщением формируются бенч  $L(t)$  и связанный с ним клиф: энергия волн  $E(t)$  по мере увеличения  $L(t)$  объективно уменьшается. И если уровень  $Y(t)$  акватории понижается, то при одних и тех же энергетических характеристиках ветровых волн и их потенциальной абразионной возможности (континуальность) формируется соответствующая  $Y(t)$  связь – «бенч – клиф».

Вследствие равномерного понижения уровня водной поверхности, абразионно-аккумулятивная деятельность волн выходит из зоны влияния созданных или аккумулятивных форм  $L$ , где соотношения длины волн и глубины воды становятся оптимальными для абразионно-

аккумулятивной деятельности, абразионно-аккумулятивный процесс возобновляется и формируется очередная абразионно-аккумулятивная ступень. Так продолжается в течение всего времени равномерного понижения уровня моря (озера или техногенного водохранилища). На Зейском водохранилище ГЭС при понижении уровня вследствие энергетической сработки данный процесс в миниатюре можно наблюдать в течение нескольких часов.

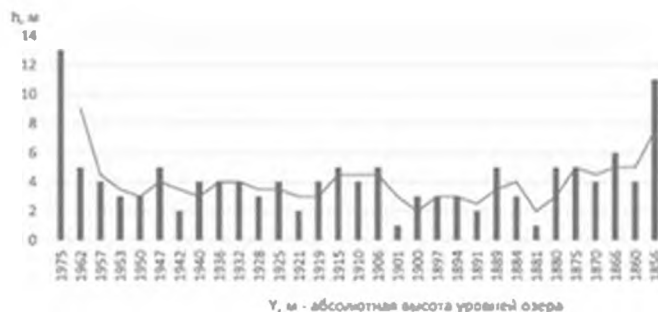
Объем разрушения берега ( $V, м^3/т$ ), обуславливающий увеличение длины прибрежной отмели ( $L_0 + \Delta L(t)$ ) и играющий роль обратной отрицательной связи, убывает по закону  $V(t) = V_0 p - q(t)$ , в этой формуле  $q$  – расход (объем) вещества, удаляемого из системы «бенч-клиф», а  $r$  – коэффициент размываемости грунтов.

Естественно, что чем медленнее понижается уровень водной поверхности и чем больше продолжительность действия ветрового волнения, тем более выраженными становятся элементы профиля равновесия на пологих склонах. Но наиболее морфологически контрастной становится абразионно-аккумулятивная морфоскульптура бенч-клиф в условиях неравномерного понижения уровня. Такова в кратком изложении теоретическая суть континуально-дискретного механизма формирования абразионно-аккумулятивной морфоскульптуры.

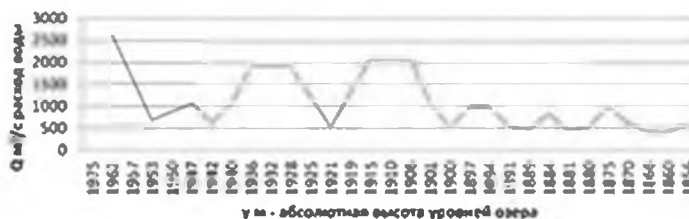
Краткая характеристика абразионно-аккумулятивных процессов на берегах Чуйско-Курайского озера. В результате проведенного анализа распределения абразионных уступов на бортах Чуйско-Курайской котловины установлены морфометрически четко выраженные абразионно-аккумулятивные уступы различной высоты [6]. Построенные по ним тренды распределения высот (см. рис. А) и расходов воды (см. рис. Б) характеризуются периодичностью чередования кластеров уступов и уровней понижения озера. Тренд имеет вид ясно выраженной сезонности: кластеры высоких уступов (4–7 м) чередуются с кластерами высот 1–3 м, свидетельствуя, таким образом, что понижение уровня озера было длительным, а на стохастичность распределения высот абразионных уступов накладывались периодически действовавшие упорядоченные процессы, наиболее вероятной причиной которых были сезонные (зима-лето) изменения водопрпускной способности каналов стока в ледовой плотине.

Для количественной оценки абразионно-аккумулятивных процессов на берегах Чуйско-Курайского ледово-подпрудного озера принимаются показатели волнения, установленные на основе многолетних наблюдений за динамикой климатических характеристик [3], согласно которым установившаяся скорость ветра в котловинах не превышает 2–5 м/с; преобладающее направление ветра шпротных румбов, а безветренные дни (штиль) по количеству превосходят сумму всех других – 65%. В то же время наблюдаются шквалистые порывы ветра до 30–40 м/с, которые в расчет энергии ветровых волн не принимаются, поскольку они отличаются кратковременным действием и потому высоких, полностью сформированных волн, достигающих максимальных показателей, не образуют. Учитывая, что продолжительность безледового периода на озерах и реках составляет всего 5 месяцев, 65% этого времени характеризуются безветрием, можно принять, что длительность абразионной деятельности составляла 95 дней. С наибольшей повторяемостью (10%) дуют ветры со скоростью 2–5 м/с, создающие волну высотой  $h = 0,3$  м (при длине разгона волны в 20 км и непрерывно действующем ветре в течение 10 часов), и только они характеризуются абразионно-аккумулятивной создательностью. Остальные ветры создают волны незначительной высоты в силу их эпизодичности и малой энергии, быстро теряющейся на начальной стадии формирования прибрежной отмели.

А



Б



#### Сезонные тренды изменения

(А) высот абразионных уступов и (Б) расходов воды (составлен по материалам [4])

Применительно к характеристике абразионных процессов берегов водохранилищ энергия ( $E$ ) ветровых волн определяется их высотой ( $h$ ), длиной волны ( $\lambda$ ) и весом ( $P$ ) объема воды. За единицу измерения энергии волн, в практике изучения абразионных процессов на водохранилищах [7] обычно применяется тонна-метры в секунду на погонный метр длины берега. Для определения скорости размыва слагающих берега пород, в одних методиках расчета используются коэффициенты устойчивости к размыву, а в других – коэффициенты размываемости ( $K$ ), измеряемые для разного состава рыхлых пород, в кубических метрах на тонна-метр работы волн.

Расчетное значение секундного потока энергии волн определяется по формуле полной энергии [7]:

$$E = 1/16 \rho g h^3 \lambda / \tau,$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота волны;  $\lambda$  – длина волны;  $\tau$  – период волны. Единица измерения энергии – тонно-метр на погонный метр – при условии подхода волн перпендикулярно к берегу.

Для оценки энергии ветровых волн на берегах Чуйско-Кураинского озера нами приняты следующие количественные характеристики ветрового волнения:  $\rho$  – плотность воды – 1000 кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,8 м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота волны,  $h = 0,3$  м;  $\lambda$  – длина волны 5 м;  $\tau$  – период волны = 1,9 с;  $v$  – скорость волны,  $v = \lambda/\tau$ , определяемая зависимостью  $v = 1,28\sqrt{\lambda}$ .

В соответствии с указанными условиями, секундное поступление энергии  $E_v$  подходящих по нормали к берегу волн (на один метр его длины) могло бы составлять  $0,145 \text{ т/с}$ .

Если полагать, что ветер с принятыми характеристиками действовал бы непрерывно в течение 95 суток (10% от всех ветров на рассматриваемой акватории, по продолжительности в секундах равный  $820800 \text{ с}$ ) на одном уровне воды, то годовая энергия подходящих по нормали к берегу ветровых волн составила бы  $E_p = 119016 \text{ т}$  на погонный метр берега.

Устойчивость к размыву  $K_p$  пород на склонах котловины характеризуется большим разнообразием. Среди них встречаются породы, прикрытые маломощным элювиальным чехлом и характеризующиеся  $K_p = 0,0003 \text{ м}^3/\text{тм}$ ; это отложения морен, представленные крупновалуновым материалом, цементированным «ледниковой мукой» (принят по аналогии с трудноразмываемыми флювиогляциальными галечниками с песком и валунами). На таких участках объем абразионного размыва при тех же параметрах волн составлял бы  $V = 33,8 \text{ м}^3$ , а морфометрические характеристики абразионных уступов зависели бы от величины понижения уровня за один безледовый период –  $T = 95 \text{ суток}$ .

Из приведенных расчетов следует, что в условиях понижавшегося уровня озера величина  $V$  размыва берега распределяется на всю оказавшуюся под воздействием волн площадь  $S$ , равную  $S = \Delta H \cdot z / \sin \alpha$ . Поэтому размеры  $L$  прибрежной отмели (ширина бенча в метрах) определяются как  $L = V/S$ , где  $\Delta H$  – величина понижения уровня воды, м,  $z$  – протяженность склона, м,  $\alpha$  – его крутизна. К примеру, согласно приведенным выше расчетам, при понижении уровня на 1 м и крутизне склона  $20^\circ$  объем размываемых склоновых отложений на одном метре берега составил бы  $34 \text{ м}^3$ , а ширина  $L$  прибрежной отмели достигала бы 10 м, тогда как при понижении уровня на 10 м она не превышала бы 3,4 м. Реальный физический смысл данных соотношений заключается в том, что с увеличением скорости понижения  $\Delta H(t)$  уровня озера уменьшается длительность абразионного воздействия на берега в заданной точке, при одних и тех же  $E(t)$  и  $K_p$ . Отсюда следует, что в условиях понижавшегося уровня озера каждый формировавшийся абразионный уступ характеризовался своими, так сказать, индивидуальными параметрами.

**Выводы.** Абразионно-аккумулятивные уступы могут формироваться и в результате равномерного понижения уровня акватории. Разрывы в динамике абразионно-аккумулятивной морфоскульптуры обуславливаются развитием процесса с насыщением – ослаблением энергии ветровых волн за счет увеличивающихся морфометрических характеристик в системе бенч-клиф. Но наиболее благоприятными условиями для этого являются чередование замедленных скоростей понижения и ускоряющихся.

Анализ изменения уровня ледово-подпрудного Чуйско-Курайского озера, проведенный по оставленным им следам абразионно-аккумулятивной деятельности, свидетельствует о когнитивно-дискретном и длительном понижении уровня озера [6].

### Библиографический список

1. Есин Н.В., Савин М.Т., Жилиев А.П. Абразионный процесс на морском берегу. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 200 с.
2. Ионин А.С., Калинин П.А. Особенности формирования морских террас // Известия АН СССР. Сер. геогр. № 5. 1956. С. 9–21.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 20. Ч. 1–6. СПб., 1993. 718 с.

- 4 Окушев П. А., Бородавко П. С. Реконструкция «флювиальных катастроф» в горах Южной Сибири и их параметры // Вестник Томск. гос. ун-та № 274. 2001. С. 3–12.
- 5 Pozdnyakov A.V. Synergetics of geosystems. Tomsk: Tomsk state university, 2005. 190 p
- 6 Поздняков А. В., Хон А. В. К методике оценки расходов воды в Чуйско-Курайском ледово-подпрудном озере в стадии деградации // Успехи естествознания 2018. № 1. С. 130–135
7. Сафьянов Г. А. Абразионный процесс и некоторые закономерности развития рельефа абразионного берега // Вестник Московского ун-та. Сер. геогр. 1966. Т. 5. № 4. С. 49–57.

**Ф.А. Романенко, М.М. Иванов, О.С. Шилова, В.Р. Беляев, Е.В. Гаранкина**

*Московский государственный университет, Москва, Россия*

*E-mail: faromanenko@mail.ru*

## **ХРОНОЛОГИЯ СЕЛЕВЫХ И СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ХИБИНСКИХ ГОРАХ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)**

*Аннотация* Анализируется массив данных о возрасте склоновых (лавинных, солифлюкционных) и селевых процессов в Хибинских горах (Кольский п-ов), определённом радиоуглеродным методом (около 40 дат) по погребённым почвам и озерным отложениям. Установлено, что для всех этих процессов характерны этапы усиления и ослабления, причем датировются в основном последние. Данные процессы протекали в Хибинах на протяжении всего голоцена, как во время временных потеплений, так и во время похолоданий.

*Ключевые слова* сели, солифлюкция, голоцен, водоснежные потоки, радиоуглеродное датирование

**F.A. Romanenko, M.M. Ivanov, O.S. Shilova, V.R. Belyaev, E.V. Garankina**

*Moscow State University, Moscow, Russia*

*E-mail: faromanenko@mail.ru*

## **CHRONOLOGY OF SLOPE AND DEBRIS FLOW PROCESSES IN THE Khibiny MOUNTAINS OF THE KOLA PENINSULA**

*Annotation* A chronological dataset on slope (avalanche, solifluction) and debris flow processes obtained by radiocarbon methodic (about 40 dates) on buried soils and lake sediments is analyzed for the Khibiny Mountains. Stages of intensification and stabilization for all these processes are established, and the age is retrieved mostly for the latter. These processes were active in the Khibiny for the entire Holocene, both during temporary warmings and coolings.

*Keywords* debris flows, solifluction, Holocene, slushflow, radiocarbon dating

Хибинские (максимальная высота 1200 м) и Ловозерские (1120 м) тундры – самые высокие горные массивы Кольского полуострова. Вскоре после начала освоения апатитово-не-