

УДК 551.435.11(470.22)

РАЗВИТИЕ ЭВОРЗИОННЫХ АНАЛОГОВ СКЭБЛЕНДОВ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ОДНОЙ ИЗ КАРЕЛЬСКИХ ГЭС[#]

© 2023 г. А. А. Лукашов^{1,*}, Т. Л. Смоктунович²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

² Московский педагогический государственный университет, географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: smoluk@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.08.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Реки Карелии отличаются геологической молодостью, оформившись как флювиальные комплексы лишь в голоцене. Малый возраст в сочетании с прочностью кристаллических пород Балтийского щита обусловили невыработанность их продольного профиля. В основании порогов местами развиваются процессы формирования миниатюрных скэблендов. Подобная гидравлическая ситуация складывалась и у фронта деградирующего ледника. Благоприятны для мощного воздействия на скальное ложе также нижние бьефы плотин ГЭС. На осушенных в ходе гидротехнического освоения отрезках скального ложа полугорных потоков можно встретить следы бурной глубинной эрозии, сопровождавшейся явлениями неизбежной эвразии и гидродинамической кавитации. Показателен миниатюрный скэбленд, выработанный в нижней части крупного порога Маткожня на реке Нижний Выг в зоне Беломорско-Балтийского канала. Почти вся трасса канала проложена по долине этой реки, лишь на отдельных отрезках между шлюзами русло канала пробито в стороне, поэтому там сохранилась почти обезвоженная прежняя долина. Коренные породы обнажаются здесь по всему руслу; многочисленны стаканоподобные формы микрорельефа диаметром и глубиной до первых метров в кристаллических породах докембрия. Вклад эвразии в денудацию кристаллических сланцев в днище долины Выга является весьма значимым, хотя само эвразийно-кавитационное воздействие осуществляется редко и в течение ограниченного времени. Подобные процессы естественного происхождения действовали до создания водохранилищ на порожисто-водопадных участках как в долине Выга, так и других крупных рек Карелии. Аварийные спуски воды через высокие водосливные плотины могли усиливать разрушительное воздействие потока на его коренное ложе. Образование эвразийных микроформ у порога Маткожня является частично техногенно обусловленным. Карельские кавитационно-эвразийные комплексы форм могут рассматриваться как миниатюрные аналоги гигантских позднеплейстоценовых скэблендов северо-запада США, Скандинавии, Алтая.

Ключевые слова: Балтийский щит, продольный профиль рек, плотины на порогах, аномальные расходы на быстринах, эвразия, гидродинамическая кавитация

DOI: 10.31857/S2949178923020068, **EDN:** ECMBDJ

ВВЕДЕНИЕ

В рельефе днищ долин полугорных рек на территории Фенноскандии местами складывается обстановка, напоминающая в миниатюре скэбленды — знаменитые “изрезанные земли” на востоке штата Вашингтон (США). Скэбленд — это эрозионный ландшафт, образовавшийся в результате катастрофического паводка. Впервые термин был введен Д.Х. Бретцем (Bretz, 1923)

именно для описания последствий эрозии базальтового плато Колумбия в результате прорывов вод подпрудного ледникового озера Миссула (Missoula), существовавшего на территории нынешнего штата Монтана. Д.Х. Бретц перенял термин, который наряду с термином “скэброк” использовался фермерами на северо-западе США для описания областей, где денудация удалила рыхлый чехол и обнажила подстилающие породы. Подобные “изрезанные земли” занимают площадь ~40000 км². Это — впечатляющий комплекс анастомозирующих эрозионных форм в лёссовых породах и в базальтах, включающий канавки, выбоины, скальные впадины, каналы и

[#] Ссылка для цитирования: Лукашов А.А., Смоктунович Т.Л. (2023). Развитие эвразийных аналогов скэблендов в нижнем бьефе одной из карельских ГЭС // Геоморфология и палеогеография. Т. 54, № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S2949178923020068>; <https://elibrary.ru/ECMBDJ>



Рис. 1. Скэбленды в лёссах и базальтах плато Колумбия на востоке штата Вашингтон, сформированные катастрофическими паводками при прорыве ледниково-подпрудного озера Миссула. Фото Travelguru.

Fig. 1. The scablands in the loess and basalts of the Columbia Plateau in eastern Washington State formed by catastrophic floods during the breakthrough of the glacial-dammed Lake Missoula. Photo Travelguru.

водопады, сформированные гигантскими сбросами воды (Bourke, 2006).

Озеро Миссула существовало вплоть до 13000 л. н. Река Кларк-Форк, подпруженная лопастью ледникового покрова Кордильер, двигавшейся с се-



Рис. 2. Положение района исследований (в качестве основы использованы карты Bing Maps).

Fig. 2. The position of the research area. Backing with Bing Maps.

вера — с территории нынешней канадской провинции Британская Колумбия, разрушила эту ледяную плотину. В течение двух суток она сбросила на прилегающие районы базальтового плато водные массы объемом до 2100 км³, накопившиеся в озере. Хлынувшие потоки оставили в ложе реки реликты кратковременно действовавших водопадов (рис. 1). Глубокие эвразийские ванны были выбиты в скалах низвергавшимися потоками при участии гидродинамической кавитации (Райс, 1980; O'Connor, Baker, 1992; Magee, 1996). Опираясь на описанный рельеф штата Вашингтон, термин “scabland” в англоязычной геологической литературе приобрел суженное значение — возвышенное, выровненное, покрытое базальтами пространство с маломощным почвенным слоем, редкой растительностью, обычно прорезанное глубокими сухими каналами (Толковый словарь..., 2002).

В отечественной специальной литературе наряду с горными рассматриваются “равнинные скэбленды” (от англ. *scab* — струп, корка, короста, *land* — земля) — участки, где в земную поверхность врезаются многочисленные ущелья, каньоны, каналы. Последние, вероятно, не только сильно отличаются от горных (Рудой, 1994, 2005), но и обладают рядом специфических черт.

Большая часть фрагментов скального ложа карельских рек, эродированных ниже водопадов и порогов, малодоступна для наблюдений. Такие участки обычно затоплены реками, водохранилищами или каналами. Лишь ниже водосливной плотины Маткожненской ГЭС Выгского каскада трассы Беломорско-Балтийского канала (ББК) летом 2021 г. нам предоставилась возможность детально ознакомиться со специфическим микрорельефом, в формировании которого глубинная эрозия эпизодически действовала совместно с эвразией и гидродинамической кавитацией (рис. 2).

Создание ББК было завершено в 1933 г.; для прохода судов с осадкой до 4 м построены 19 шлюзов. Водохранилища канала удерживаются 15 плотинами, в том числе 15-метровой Маткожненской (возведенной известным гидротехником О.В. Вяземским) преимущественно на порогах Нижнего Выга. Для обеспечения устойчивости плотин в составе искусственно укрепленного ложа потока, входящего в комплекс гидротехнического сооружения, созданы водобои, принимающие энергию воды, падающей из верхнего бьефа. Ниже по профилю располагается рисберма, над которой скорости потока снижаются. Когда уклон потока с рисбермы превышает уклон устойчивого русла, размыв ложа неизбежен. Непосредственно за кромкой схода возникает зона местного размыва со сложной пульсационно-поворотной структурой (Чеботарев, 1978).

МЕТОДЫ

Натурные наблюдения и измерения на местности сопровождались фотофиксацией гидрологической и геоморфологической обстановок. Дешифрирование космических снимков в системе Google позволило уточнить пространственные соотношения результатов морфодинамических преобразований. Изучение геоморфологической, гидрологической и геологической литературы было дополнено знакомством с архивными материалами. Сравнительно-географический анализ позволил предположительно наметить отдаленные аналогии присутствующих в Карелии комплексов с “изрезанными землями” на северо-западе США. Определенные аналогии анализируемого рельефа были выявлены и с уникальными формами эворзионно-кавитационного происхождения на территории Швейцарии, южной Финляндии, южной Норвегии и Швеции (Rudberg, 1960).

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ

Карелия — зона преимущественно выпахающего действия покровных ледников, в том числе последнего валдайского. Хотя “за океаном” полагают, что последнее оледенение резко завершилось 15 тыс. л. н. — “The last glaciation ... ended abruptly 15000 years ago” (Mathez, Webster, 2004, с. 223), здесь его таяние 13–10 тыс. л. н. происходило постепенно. В этот период сформировались и реки Карелии. Они врезаются в прочные кристаллические метаморфические и магматические породы Балтийского щита и протекают через многочисленные озера. Карельские реки часто имеют плохо оформленные долины и невыработанный продольный профиль (Север Европейской..., 1966; Спиридонов, 1978). Как отмечал еще в 1988 г. С.С. Воскресенский, “прошло слишком мало времени после исчезновения ледника, чтобы реки могли срезать неровности русла, образованные прочными породами” (Воскресенский, 1968, с. 41). Продольный профиль многих рек нередко имеет ступенчатый характер — сохранились уступы трудно размываемых геологических структур.

Выг — одна из крупных карельских рек, впадающая с юго-запада в Онежскую губу Белого моря. Она протекает через Выгозеро, которое условно делит реку на Верхний и Нижний Выг. Высота порога стока зарегулированного Выгозера 89 м над у. м. Почти вся долина Нижнего Выга, начиная от Выгозера, была использована для прокладки Беломорско-Балтийского канала, питающегося за счет поверхностных водотоков и подземных вод. Лишь на отдельных отрезках между шлюзами русло канала было прорыто в стороне от реки, и

на этих участках в рельефе сохранилась прежняя долина, почти обезвоженная или с малым количеством воды в скальном русле. Порожистость Нижнего Выга, предопределенная не только молодостью реки, но и расположением данного участка в “фокусе” пересечения активизированных древних разломов (Лукашов, 1976), была использована в ходе проектирования и возведения плотин Беломорско-Балтийского канала.

Озера в тектоно-экзарационных впадинах поверхности Балтийского щита обеспечивали естественную зарегулированность стока, которую предстояло еще повысить, используя озерные котловины для создания водохранилищ. Уже к 1933 г. были заполнены водохранилища, затопившие большую часть долины и увеличившие акватории проточных озер. Так, уровень Выгозера был поднят на 7 м, его площадь выросла почти в два раза, а подъем уровня Маткожненского водохранилища составил около 1.5 м над прежним уровнем одноименного озера. Трасса канала в бассейне Белого моря протяженностью около 190 км проходит через шесть крупных озер: Маткозеро и Торос (между шлюзами 8 и 9), Выгозеро и Телекино (между шлюзами 9 и 10), Воицкое (между шлюзами 10 и 11) и Шавань (между шлюзами 11 и 12). Общий перепад уровней воды 102 м.

Контрасты уровней соседних водохранилищ были использованы для постройки в 1950–1960-е годы XX в. Выгского каскада сравнительно небольших ГЭС, включавшего Ондскую, Палокоргскую, Маткожненскую, Выгостровскую и Беломорскую. Проектное задание и технический проект Маткожненской ГЭС разработаны в 1948 г. В тот же год начато ее строительство. Пуск первого агрегата состоялся 1 января 1953 г. (Самойлов, 2003).

В естественном состоянии р. Нижний Выг, площадь бассейна которой составляет 27 тыс. км², насчитывал в длину 112 км; падение 82 м, средний уклон реки был равен 0.73 м/км (0.00073). Длина реки от истока из оз. Выгозеро до впадения в Белое море ныне равна 102 км. Это малоозерная часть Выгозерского бассейна, площадь озер составляет менее 10% площади всего водосбора. На сохранившемся естественном участке реки длиной менее 10 км между шлюзами № 12 и 13 Беломорканала ширина днища извилистой долины меняется от 120 до 600 м, река обтекает многочисленные, покрытые лесом острова. Возможно, здесь уже наблюдается подпор воды от Маткожненского водохранилища. Хотя в низовьях реки холмистый рельеф сменяется Прибеломорской низменностью, вплоть до самого устья Выг остается порожистой рекой и обладает выраженным приустьевым порогом стока (это еще одно свидетельство невыработанности профиля долины). Названия многих порогов обозначены на крупно-

масштабных картах. Ряд порогов Нижнего Выга, например, Золотец близ селения Выгостров, имели вид величественных водопадов. Таким образом, равнинная в целом река при пересечении протяженных скальных порогов неоднократно приобретает черты “горной” (Rudberg, 1960). На таких отрезках до своего зарегулирования она обладала слабо разработанной долиной. Местами к воде обрывались крутые уступы коренных пород первично тектонической природы, а сама река отличалась частично загроможденным крупными обломками прочным скальным ложем. Нижнему Выгу были присущи незначительные глубины, большие уклоны и скорости течения. Поток расходовал свою энергию почти исключительно на глубинную эрозию. При пересечении рекою серии каменистых гряд образуются быстрины, характеризующиеся бурным неупорядоченным течением.

Невыработанность продольного профиля Нижнего Выга отчасти связана с тем, что его низовья имеют рекордно молодой возраст по сравнению с однопорядковыми реками других районов Карелии. Еще 14 тыс. л. н. — на лужской стадии дегляциации валдайского (вислинского) ледникового покрова — рассматриваемая территория была подо льдом, в области соприкосновения и виргации беломорской и онежской лопастей льда (Евзеров, 2020). На невской стадии дегляциации кромка покрова располагалась у с. Лямцы в западной части Онежского п-ова, к СЗ от залива Ухта (в створе устья р. Нюхчи). Приледниковый этап развития Беломорского бассейна — таяние и разрушение ледникового покрова — происходил здесь в течение интерстадиала аллерёд (13900–12650 кал. л. н.). Однако низовий Выга все еще не существовало, ибо на стадиях салпауселька I и II (11–10.5 тыс. л. н.) они были затоплены водами пресноводного бассейна, занимавшего южную часть современного Онежского залива Белого моря (Величко и др., 2015; Рыбалко и др., 2018).

Заслуживает внимания и гипотеза об открытии в позднеледниковье — на первом этапе масштабной регрессии 13.2 тыс. л. н. — стока из Онежского приледникового озера в котловину Белого моря. Перелив значительных масс талых вод через порог стока на Онежско-Выгозерском водоразделе на протяжении 800–1000 лет мог сформировать саму долину Нижнего Выга, а возможно, и отрезки скэбленда ниже порогов и водопадов (Квасов, 1976; Субетто и др., 2019). Данное событие могло привести к образованию эвронно-кавитационных форм рельефа.

К настоящему времени сохранились лишь небольшие естественные отрезки скального ложа долины, но они очень интересны. В самых низовьях — между Выгостровской (построенной на

пороге Золотец) и Беломорской ГЭС — на расстоянии около 8 км от своего устья порожистый Выг делился на рукава, разделенные гранитоидными островами, разбиваясь на порожистые протоки, которые частично пересыхали. Ныне большинство островов перестало быть таковыми, однако они сохранили названия: Выгостров, Бол. Малинин (Залавруга) и др. Между ними к востоку от основного, забранного плотинами русла, наблюдается серия полностью или частично высохших протоков и “стариц” Выга. Протоки имеют на многих участках скальное ложе и разделяются не аллювиальными, а гранитоидными холмами и грядами — оглаженными ледником слабонаклонными поверхностями коренного цоколя бывших островов. Это район знаменитых беломорских петроглифов, созданных 5700–5000 л. н. В результате строительства ББК, двух ГЭС и плотины участки прежнего русла Нижнего Выга высохли, и теперь до петроглифов можно добраться пешком (Лобанова, 2015).

Другой естественный фрагмент скального ложа реки сохранился на порогах Маткожня у поселка Сосновец. ББК обходит эти пороги с востока по пробитому вручную (!) в коренных породах отрезку между шлюзами 14 и 15. Скальное ложе реки с почти пересохшим руслом обнажено между каналом — с одной стороны — и гидротехническими сооружениями Маткожненской ГЭС — с другой (рис. 3). Оно “начинается” восточнее плотины Маткожненского водохранилища и через 2 км “уходит под урез” ниже створа шлюза 15, где трасса канала вновь возвращается в долину Выга. Перепад уровней у этого шлюза составляет 4.2 м.

В скальном ложе реки обнажаются моноклинально залегающие пласты верхнеархейских магнетит-амфибол-кварцевых кристаллических сланцев беломорского метаморфического комплекса (лопий 1–2), падающих на СЗ под углом, близким к 30°. По их простирацию, в углублениях между пластами по всему руслу протекает или застаивается некоторое количество воды. Метаморфизованные терригенные осадки и метаграувакки составляют в данном блоке 10–40% объема разрезов — в виду того, что на современном уровне среза интрузивные породы преобладают над супракрустальными (Ранний докембрий..., 2005). Всего в 13.5 км к СВ, близ пос. Золотец в русле Нижнего Выга обнажаются гранитоиды близкого возраста (именно на них сохраняются упомянутые выше петроглифы Залавруги, включая знаменитые “Бесовы следки”).

Ширина днища долины на пороге около 80 м, оно постепенно расширяется вниз по течению; глубина русла 1.5–2 м. Высота задернованных и поросших лесом коренных бортов долины около 6 м. Пойма и террасы отсутствуют. Единый про-

тяженный тальвег прежнего русла не выражен. По скальному ложу кулисообразно располагаются пониженные на 0.5–1 м участки дна длиной от первых метров до первых десятков метров. Имеются единичные, возвышенные на 1–1.5 м коренные микроострова в русле, поросшие молодыми деревьями.

РАЗВИТИЕ МИНИАТЮРНОГО СКЭБЛЕНДА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ МАТКОЖНЕНСКОЙ ПЛОТИНЫ

За менее чем 10000 лет своего существования р. Нижний Выг, отличающаяся быстрым полугорным течением и преобладанием глубинной эрозии, все еще не стесала “головы” более устойчивых пластов горных пород. За счет прочных выступов скальных гряд порога Маткожня абсолютная шероховатость русла превышает здесь 1–1.5 м. Пульсирующее воздействие гидродинамических давлений локализуется именно ниже относительно устойчивых в противоденудационном отношении “узлов”. При этом имеет место подъем наносов придонного слоя турбулентного потока. Перемещение наносов, включая валунную фракцию, осуществляется сальтацией по дну. На верхней границе придонного слоя скачкообразно изменяются кинематические характеристики потока, в том числе достигают максимума пульсационные скорости. Известно, что определяющую роль в структуре турбулентности потока играют элементы пульсации при взаимодействии потока и его ложа. Размыв включает срыв частиц со дна и взвешивание их вертикальными импульсами мгновенных скоростей. В связи с дискретностью структуры и циклическим характером пульсационных течений в придонном слое воздействие потока на дно осуществляется периодическими импульсами гидродинамического давления (Карасев, 1970).

Как отмечает К.М. Беркович, задержка влекомых наносов в водохранилищах — одна из причин развития ниже плотин глубинной эрозии. На сокращении величины размыва и дальности его распространения сказываются, в том числе, выходы в русле прочных пород (Беркович, 2004). В данном случае речь не идет, как, скажем, на Енисее, о десятках километрах дальнего действия эрозионного эффекта перехвата наносов (от плотины Маткожненской ГЭС до шлюза № 16 всего 11 км), но бурный характер течения реки в прежнем русле Нижнего Выга сохраняется, как минимум, до створа северо-восточной окраины пос. Сосновец (рис. 3). Коренные породы обнажаются здесь по всему руслу; лишь в разрозненных карманах — в качестве “намека” на базальную фацию аллювия — встречаются мелкие валуны и галька разных размеров и классов окатанности (рис. 4). На рассматриваемом отрез-



Рис. 3. Фрагмент зоны Беломорско-Балтийского канала на отрезке шлюзов 14 и 15 (снимок Google). Естественное русло реки обезвожено; основной сток направлен на турбины Маткожненской ГЭС (к югу от пос. Сосновец).

Fig. 3. GOOGLE satellite image of a fragment of the zone of the White Sea-Baltic Canal on the segment of locks No. 14 and 15. The natural riverbed is dehydrated; the main flow is directed to the turbines of the Matkozhnenskaya HPP (south of the village Sosnovets).

ке скального ложа реки при непосредственных ударах воды о твердую поверхность оголенной кристаллической породы возникает явление гидравлического удара — в форме резкого повышения давления в жидкости.

На твердой поверхности пластов кристаллических пород в русле Выга видны редкие микроформы рельефа — округлые западины с вертикальными стенками диаметром от 3 до 30 см, частично заполненные водой. Глубина “стаканоподобных” западин близка к их диаметру или превышает его; на дне некоторых из них нередко присутствуют галька и мелкие валуны (рис. 5). Транспортировка столь крупных окатанных обломков требовала весьма значительных скоростей потока. Фактические скорости при глубине 1 м на горных реках могут достигать 4.8 м/с. Мелкие валуны попереч-



Рис. 4. Оголенное скальное ложе р. Выг на пороге Маткожня. Вдали — водосливная плотина Маткожненской ГЭС. Фото А. Лукашова.

Fig. 4. The bare rock bed of Vyg River You are on the threshold of Matkozhnya. In the distance is the spillway dam of the Matkozhnenskaya HPP. Photo by A. Lukashov.

ником до 15 см перемешаются уже при скоростях 1.6–2.5 м/с. При уже отмеченной ступенчатости естественного продольного профиля Нижнего Выга ему присуще неоднократное изменение “горности”, когда на порогах поток превращался в стремнины (быстротоки) со скоростями, намного превышающими размывающие величины для галечно-валунных наносов, которые выносятся за пределы порожистых отрезков (Виноградова, Чалов, 2004).

Подобные встреченным на Нижнем Выге стаканоподобные формы микрорельефа диаметром и глубиной до первых метров — “стаканы” и “колодцы” в кристаллических породах — описаны в литературе. Эвормионные котлы и колодцы диа-



Рис. 5. Оголенное скальное ложе р. Выг в нижней части порога Маткожня. Микрорельеф многочисленных эвормионно-кавитационных углублений с валуно-галечным материалом паводкового транзита. Фото А. Лукашова.

Fig. 5. The bare rock bed of the Vyg River in the lower part of the Matkozhnya threshold. In the microrelief — numerous evormion-cavitation depressions; in the washouts — boulder-pebble material of flood transit. Photo by A. Lukashov.

метром свыше 1.5 м и глубиной более 4 м возникали, вероятно, при прорывах больших объемов вод. Нередко они сохраняются как памятники природы в музеях и национальных парках. Так, эвормионные колодцы и окатанные валуны, обнаруженные в 1872 г. на окраине города Люцерна, стали первыми природными экспонатами швейцарского Музея ледникового периода. Они встречаются, в том числе, на осушенных порожищно-водопадных участках русел карельских и финских рек (Вуоксы, Суны и других). Полусферические бокаловидные эвормионные стаканы присутствуют, в частности, на р. Суна под водопадом Кивач и в ее сухом русле у древнего вулкана Гирвас. В природном парке у пос. Аскола (Южная Финляндия, окрестности Порвоо) доступны для обозрения 20 углублений в гранитных скалах с отшлифованной внутренней поверхностью. Крупнейший эвормионный котел Niidenkirnut (“выбывина”, финск.) высверлен здесь шаровидным валуном (“мячом богов”). Эффектные устья эвормионных стаканов можно видеть и в парке “Иматранкоски” (южная Финляндия). На каменной лестнице близ каньона при входе в отель-замок российских государей обломки горных пород, вращаясь в эвормионных котлах, ваннах и стаканах окатываются и часто принимают шаровидную форму (<https://terve.su/ispolinskie-kotly-v-finlyandii>). Водовороты в эвормионных ваннах под водопадами вырабатывают в скалистом ложе и бортах долины ямы и углубления — “исполиновые котлы” (Четырехязычный..., 1980, с. 491).

Интересно отметить, что подобные формы могли образовываться и кратковременными крутопадающими бурными потоками талых ледниковых вод непосредственно перед фронтом “отступавшего” ледника. Именно такую трактовку допускает У. Хольтедаль для крупнейшего в Норвегии ледникового котла Бруфоссхёлен (южная Норвегия). После того, как при строительстве плотины Тунхевд р. Логен (правый приток р. Гломмы) была отведена в новое русло, посреди ложа реки открылась двойная крутосклонная впадина длиной 35 м и глубиной до 15 м, врезанная в твердые метаморфизованные порфиры. На дне ее обнаружили хорошо окатанные мелкие валуны (Хольтедаль, 1958).

Суть эвормии — кавитационное разрушение коренных пород. Оно развивается на контакте ложа с воздушно-водяной смесью. Гидродинамические кавитационные каверны возникают в жидкости из-за местных понижений давления в результате увеличения скорости течения. При искривлении линии тока воды, движущейся с критической скоростью (например, при попадании струи в углубление на изломе профиля русла), и при падении потока с высоты в нем происходит резкое уменьшение давления и внутри него образуются пузыри-пустоты водяного пара. Пузырьки

возникают в области низкого давления — при падении водной массы с уступа водопада, порога или обычной стремнины, где вода перемешивается с воздухом. Мобилизуются в пузырьки и растворенные в воде газы. Когда давление вновь и столь же резко возрастает (струя тормозится, “выныривая” из углубления, или обрушивающийся поток достигает дна), каверны в жидкости с силой захлопываются. Возникает эффект разрушительного микровзрыва с сопутствующей ударной волной. Даже при скоростях потока всего около 5 м/с кавитация по своему динамическому воздействию отвечает скоростям 100 м/с.

Сила гидродинамического удара при “захлопывании” одного пузырька ничтожна. Но, например, при многодневных катастрофических паводках, когда формируются гигантские скэбленды, суммарная энергия миллиардов микровзрывов способна выдалбливать в кристаллическом основании как огромные — сотни метров в диаметре и десятки метров глубиной — водобойные ванны и котловины, так и миниатюрные углубления. По мнению некоторых исследователей (Кнэл и др., 1974), пузырьки в зоне высокого давления могут не разрушаться, а сжиматься до чрезвычайно малых размеров, и тогда в них возникает давление порядка многих сотен и тысяч атмосфер, что также приводит к точечно-сферическому разрушению каменистого ложа. Кавитационные лунки разрастаются, в том числе, и за счет воздействия абразивного обломочного материала, содержащегося в падающих вращающихся струях. Постепенно расширяющиеся лунки соединяются друг с другом, образуя единую сферическую кавитационно-эворзионную полость — котел, чашу (ванну). Когда подобные отрицательные микроформы объединяются, формируется общий выработанный профиль эрозионной долины водного потока.

Уклоны на Маткожненском пороге Выга достаточны для создания многочисленных мелких эворзионных западин. Присутствуют ли подобные формы на других порогах Выга — проверить трудно, так как они либо затоплены водами водохранилищ, либо (Воицкий, Угольный, Дубин) находятся в зоне приливно-отливного воздействия беломорских волн. Искусственно почти осушенный порог Маткожня на Нижнем Выге в данном отношении уникален для зоны Беломорско-Балтийского канала.

Эворзия не избирательна — она не “нащупывает” ослабленные зоны коренного ложа: микрозападины “стаканов” и “стаканчиков” могут возникнуть на монолитной скальной поверхности (рис. 4). Но в дальнейшем близкое расположение друг к другу разнообразных по размеру эворзионных микроформ способствует возникновению и росту экзогенных трещин в скальной породе, а

затем ведет к ее разрушению. В голоцене мощные сливы воды были возможны после сильных ливней, бурного снеготаяния, обвалов грунтовых масс в водоемы.

Новый этап эворзии и хаотичное вращение обломков разного размера в трещиноватой эворзионной чаше приводили к разрушению не только последней, но и всей кромки пласта. Таким образом, в русле постепенно фактически шла глубинная эрозия. На доступных для наблюдения безводных наиболее денудированных участках ложа видно, что они состоят из серии полуразрушенных кавитационно-эворзионных западин и их фрагментов.

За голоцен паводковые спуски воды по Выгу, вызывавшие эворзионно-кавитационные процессы, вероятно, были многократными. Судя по свежести форм микрорельефа, по отсутствию следов выветривания и пятен накопных лишайников на стенках некоторых эворзионных микроформ, последнее такое событие могло произойти совсем недавно — ~10 л. н. Дело в том, что Маткожненское водохранилище обладает минимальной резервной емкостью (емкостью формирования), которая может быть использована для срезки последствий половодий и паводков. В чрезвычайных условиях эксплуатации гидротехнического сооружения в верхнем бьефе Маткожненской ГЭС временно допускается т.н. “форсированный подпорный уровень” выше нормального. Но и этого однажды оказалось недостаточно для предотвращения аварии. По сведениям ФГБУ “Карельский ЦГМС”, за период 7–8 августа 2012 г. в бассейне р. Нижний Выг выпала месячная норма осадков. Резкое увеличение расхода воды в притоках Выга (хотя боковая приточность составляет там всего около 25%) привело к размытию полотна автомобильной и железной дорог в окрестностях пос. Сосновец, к прорыву плотины водохранилища, подъему воды и затоплению машинного зала Маткожненской ГЭС, работа которой возобновилась только через полгода. Из-за создавшейся угрозы в сухое русло Нижнего Выга через водопропуски плотины Маткожненского водохранилища был осуществлен сброс больших объемов воды.

Известно, что “передний фронт волны попуска характеризуется увеличенными уклонами потока и повышенными скоростями течения, особенно в придонных слоях” (Чалов, 2019, с. 130). Для нижнего бьефа водовыпускного подпорного сооружения — плотины Маткожненской ГЭС высотой 14–15 м — и в обычных условиях эксплуатации характерны т.н. “сверхволновые потоки”. Бурное состояние потока отличается при этом глубиной, меньшей критической глубины для данного расхода. Число Фруда превышает 1, т.е. удвоенная удельная кинетическая энергия в дан-

ном сечении превышает его потенциальную энергию. Течение в подобных случаях сопровождается периодическим возникновением и разрушением волн на поверхности потока, что способствует его аэрации (Чеботарев, 1978). Аэрация, в свою очередь, служит предпосылкой развития кавитации. Аварийный спуск воды при 15-метровой высоте плотины таким образом мог вызвать явление кавитации и возникновение серии эвормионных стаканов и впадин на порогах. То есть в данной ситуации образование эвормионных микроформ в ложе Выга у порога Маткожня является частично техногенно обусловленным.

Вклад эвормии в денудацию кристаллических сланцев в днище долины Выга на пороге Маткожня является весьма значимым, хотя сами эвормионно-кавитационные процессы происходят редко и в течение ограниченного времени. Подобные процессы естественного происхождения действовали до создания водохранилищ на порожисто-водопадных участках в русле Выга и других крупных рек Карелии.

Геоморфологическая обстановка, сформировавшаяся в нижнем бьефе Маткожненской ГЭС, в том числе, в результате аварийного сброса воды из водохранилища 7–8 августа 2012 г., напоминает в миниатюре “изрезанные земли” на востоке штата Вашингтон (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карельские кавитационно-эвормионные комплексы форм, связанных как с природными, так и с техногенными катастрофическими паводками (гидросферными катастрофами), вполне могут рассматриваться как миниатюрные аналоги позднеледникового скэбленда северо-запада США, Скандинавии и Алтая. Большая часть подобных геоморфологических комплексов на территории Карелии в настоящее время пребывает в подводных условиях — в нижних бьефах гидравлических станций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена в рамках темы НИР кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова “Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беркович К.М. (2004). Антропогенные изменения русловых процессов // География, общество, окружающая среда. Том VI. Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: Городец, С. 486–493.

Величко А.А., Фаустова М.А., Писарева В.В., Карпухина Н.В. (2015). Реконструкция ландшафтов, формировавшихся на окраине Скандинавского ледникового покрова в период его деградации (в интервале от максимума похолодания до начала голоцена) // Актуальные проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена: Материалы Всероссийской научной конференции “Марковские чтения 2015 года”. М.: Географический факультет МГУ, С. 49–51.

Виноградова Н.Н., Чалов Р.С. (2004). Горные реки и реки в горах: продольный профиль, морфология и динамика русел // География, общество, окружающая среда. Том VI. Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: Городец, С. 460–469.

Воскресенский С.С. (1968). Геоморфология СССР. М.: Высшая школа, 368 с.

Евзеров В.Я. (2020). Основные события эволюции поздневалдацкого оледенения в Карело-Кольском регионе с дополнением к ранее опубликованным данным о мощностях строительных материалов // Вестник Кольского научного центра РАН. № 1. С. 26–33.

<https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.1.003>

Карасев И.Ф. (1970). Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоиздат, 268 с.

Квасов Д.Д. (1976). Происхождение котловины Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. Л.: Наука, С. 7–40.

Кнэлл Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. (1974). Кавитация. М.: Мир, 678 с.

Лобанова Н.В. (2015). Петроглифы в низовьях р. Выг: проблемы хронологии и периодизации // Российская археология. № 4. С. 16–33.

Лукашов А.Д. (1976). Новейшая история Карелии. Л.: Наука, 109 с.

Райс Р.Дж. (1980). Основы геоморфологии. М.: Прогресс, 576 с.

Ранний докембрий Балтийского щита / В.А. Глебовицкий. (2005). СПб: Наука, 711 с.

Рудой А.Н. (1994). Скейбленд Центральной Азии // Природа. № 8. С. 3–20.

Рудой А.Н. (2005). Гигантская рябь течения (история исследований, диагностика, палеогеографическое значение). Томск: Изд-во ТГПУ, 224 с.

Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Семенова П.Р. и др. (2018). История формирования Беломорской котловины и четвертичного покрова Белого моря по данным геологического картирования // Мат-лы Всерос. науч. конф. “Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология”: сборник статей. М.: КДУ, Университетская книга, С. 141–146.

Самойлов А.Е. (2003). Канал // Капитан-клуб. № 1. С. 116–119.

Север Европейской части СССР. (1966). М.: Наука, 452 с.

Спиридонов А.И. (1978). Геоморфология европейской части СССР. М.: Высшая школа, 332 с.

Субетто Д.А., Потахин М.С., Зобков М.Б. и др. (2019). Развитие Онежского озера в позднеледниковье по

- результатам ГИС-моделирования // Геоморфология. № 3. С. 83–90.
<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019383-90>
- Терве – Путешествие по Финляндии [Электронный ресурс]. URL: <https://terve.su/ispolinskie-kotly-v-finlyandii> (дата обращения: 01.08.2022)
- Толковый словарь английских геологических терминов. Том. 2 / Дж. А. Джексон. (2002). М.: МЦГК “Геокарт”, ГЕОС, 637 с.
- Хольтедаль У. (1958). Геология Норвегии. Том II. М.: Изд-во иностранной литературы, 395 с.
- Чалов Р.С. (2019). Русловедение: теория, география, практика. Т. 3: Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: Красанд, 640 с.
- Чеботарев А.И. (1978). Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 308 с.
- Шукин И.С. (1980). Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. М.: Советская энциклопедия, 703 с.
- Bourke M.C. (2006). Scabland // Encyclopedia of Geomorphology (Ed. Goudé A.S.). Routledge, P. 912–914.
- Bretz J.H. (1923). The channeled scablands of the Columbia Plateau // Journal of Geology. Vol. 31. No. 8. P. 617–649.
- Magee K. (1996). From the Scabland to Mars: Preparing for the Pathfinder Mission // The Planetary report. Vol. XVI. No. 2. P. 10–14.
- Mathez E.A., Webster J.D. (2004). The Earth Machine. The Science of a Dynamic Planet. New York: Columbia University Press, 335 p.
- O'Connor J.E., Baker R.H. (1992). Magnitudes and implications of peak discharges from glacial Lake Missoula // Geological Society of America Bulletin. Vol. 104. P. 267–279.
- Rudberg S. (1960). Geology and Morphology // A geography of Norden (Ed. A. Somme). Bergen-Oslo, P. 27–40.

DEVELOPMENT OF THE MINIATURE ANALOGUE OF THE SCABLANDS OF THE WEST USA IN THE LOWER POOL OF ONE OF THE KARELIAN HYDROELECTRIC POWER STATIONS¹

A. A. Lukashov^{a, #} and T. L. Smoktunovich^b

^a Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^b Moscow State Pedagogical University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

[#] E-mail: smoluk@yandex.ru

Until the end of the Late Pleistocene, the modern river valleys of most of Scandinavia remained buried under the cover of continental ice. The rivers of the region, including the Karelian ones, are distinguished by their geological youth, having formed as fluvial complexes only in the Holocene. The young age, combined with the strength of the crystalline rocks of the Baltic Shield, has affected the fact that the rivers here are characterized by the lack of development of the longitudinal profile. At the base of the thresholds, at which the flow acquires the character of rapid, the processes of formation of miniature scaffolds develop in places. A similar hydraulic situation developed at the front of the degrading glacier. The lower reaches of dams of hydraulic stations are also favorable for a powerful impact on the rock bed. Numerous traces of violent deep erosion, accompanied by the phenomena of indiscriminate erosion and hydrodynamic cavitation, can be found on the kilometer-long sections of the exposed rock bed of semi-mountain streams drained during hydraulic development.

A miniature scaffold developed by powerful natural and technogenically provoked floods in the lower part of the large rapid Matkozhnia on the Nizhny Vyg River, in the zone of the White Sea-Baltic Canal, is indicative. Almost the entire route of the canal, starting from Vygozero, is laid along the valley of the Lower Vyg. Only in some sections between the locks, the channel bed was dug away from the river. There, the old valley is preserved either almost dehydrated or with a small amount of water in the rock bed. The bedrock is exposed along the entire riverbed. Small boulders and pebbles of different sizes and grades of rolling can be found only in scattered pockets along the river channel. There numerous glass-like forms of microrelief – with a diameter and a depth of up to the first meters – “glasses” and “wells” are formed on Precambrian crystalline rocks. The contribution of evorsia to the denudation of crystalline slates in the bottom of the Vyga Valley on the rapid Matkozhnia is very significant, although the evorsion-cavitation effect itself is carried out rarely and for a limited time. Similar processes of natural origin operated before the creation of reservoirs on rapid-waterfall sites in the Vyga Valley and other large rivers of Karelia; they were caused by natural factors. Emergency descents of water through high spillway dams could increase the destructive effect of the stream on its root bed. So, in particular, the formation of evorsion microforms in the bed of the Lower Vyg at the rapid Matkozhnia is partially technogenically caused. Karelian cavitation-evorsion complexes of forms associated with hydro-

¹ For citation: Lukashov A.A., Smoktunovich T.L. (2023). Development of the miniature analogue of the scablands of the west USA in the lower pool of one of the Karelian hydroelectric power stations. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 2. P. 3–13 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2949178923020068>; <https://elibrary.ru/ECMBDJ>

spheric catastrophes can be considered as miniature analogues of giant Late Pleistocene scablands of the northwestern USA.

Keywords: Baltic shield, longitudinal profile of rivers, dams on rapids, abnormal flow rates on rapids, evorsia, hydrodynamic cavitation, Scablands (scaffolds)

ACKNOWLEDGMENTS

The article was prepared within the framework of the research topic of the Department of Geomorphology and Paleogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University “Evolution of the natural environment, dynamics of relief and geomorphological safety of nature management”

REFERENCES

- Berkovich K.M. (2004). Anthropogenic changes of riverbed processes. *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda. Tom VI. Dinamika i vzaimodeistvie atmosfery i gidrosfery*. Moscow: Gorodets (Publ.), P. 486–493. (in Russ.)
- Bourke M.C. (2006). Scabland. *Encyclopedia of Geomorphology* (Ed. Goude A.S.). Routledge. P. 912–914.
- Bretz J.H. 1923. The channeled scablands of the Columbia Plateau. *Journal of Geology*. Vol. 31. No. 8. P. 617–649.
- Chalov R.S. (2019). *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 3: Antropogennyye vozdeistviya, opasnye proyavleniya i upravlenie ruslovymi protsessami* (Channel studies: theory, geography, practice. Iss. 3: Anthropogenic impacts, hazardous manifestations and channel management). Moscow: Krasand (Publ.), 640 p. (in Russ.)
- Chebotaev A.I. (1978). *Gidrologicheskii slovar'* (Hydrological dictionary). Leningrad: Hydrometeoizdat (Publ.), 308 p. (in Russ.)
- Evzerov V.Ya. (2020). The main events of the evolution of the Late Valdai glaciation in the Karelo-Kola region with an addition to the previously published data on the capacities of building materials. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. No. 1. P. 26–33. <https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.1.003>
- Glebovitskii V.A. (Ed.). (2005). *Rannii dokembrii Baltiskogo shchita* (Early Precambrian of the Baltic Shield). St. Petersburg: Nauka (Publ.), 711 p. (in Russ.)
- Holtedal U. (1958). *Geologiya Norveгии. Tom II* (Geology of Norway. Issue II). Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury (Publ.), 395 p. (in Russ.)
- Jackson J.A. (Ed.). (2002). *Tolkovyy slovar' angliiskikh geologicheskikh terminov. V dvukh tomakh. Tom 2* (Explanatory Dictionary of English geological terms. In two issues. Issue 2). Moscow: MTSGK “Geokart”, GEOS (Publ.), 637 p. (in Russ.)
- Karasev I.F. (1970). *Ruslovyye protsessy pri perebroske stoka* (Channel processes during runoff diversion). Leningrad: Hydrometeoizdat (Publ.), 268 p. (in Russ.)
- Knall R., Daly J., Hammit F. (1974). *Kavitatsiya* (Cavitation). M.: Mir (Publ.), 678 p.
- Kvasov D.D. (1976). Origin of the basin of Lake Onega. *Paleolimnologiya Oonezhskogo ozera*. Leningrad: Nauka (Publ.), P. 7–40. (in Russ.)
- Lobanova N.V. (2015). Petroglyphs in the lower reaches of the Vyg River: problems of chronology and periodization. *Rossiiskaya arkheologiya*. No. 4. P. 16–33. (in Russ.)
- Lukashov A.D. (1976). *Noveishaya istoriya Karelii* (The modern history of Karelia). Leningrad: Nauka (Publ.), 109 p. (in Russ.)
- Magee K. (1996). From the Scabland to Mars: Preparing for the Pathfinder Mission. *The Planetary report*. Vol. XVI. No. 2. P. 10–14.
- Mathez E.A., Webster J.D. (2004). *The Earth Machine. The Science of a Dynamic Planet*. New York: Columbia University Press (Publ.), 335 p.
- O'Connor J.E., Baker R.H. (1992). Magnitudes and implications of peak discharges from glacial Lake Mississoula. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 104. P. 267–279.
- Rice R.J. (1980). *Osnovy geomorfologii* (Fundamentals of geomorphology). Moscow: Progress (Publ.), 576 p. (in Russ.)
- Rudberg S. (1960). *Geology and Morphology. A geography of Norden* (Ed. A. Somme). Bergen-Oslo, P. 27–40.
- Rudoy A.N. (2005). *Gigantskaya ryab' techeniya (istoriya issledovaniy, diagnostika, paleogeograficheskoe znachenie)* (Giant ripples of the current (history of research, diagnostics, paleogeographic significance)). Tomsk: TSPU (Publ.), 224 p. (in Russ.)
- Rudoy A.N. (1994). Skeyblend of Central Asia. *Priroda*. No. 8. P. 3–20. (in Russ.)
- Rybalko A.E., Tokarev M.Yu., Semenova P.R. et al. (2018). The history of the formation of the White Sea basin and the quaternary cover of the White Sea according to geological mapping. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii “Pozdne- i postglyatsial'naya istoriya Belogo morya: geologiya, tektonika, sedimentatsionnye obstanovki, khronologiya”: sbornik statei*. Moscow: KDU, Universitetskaya Kniga (Publ.), P. 141–146. (in Russ.)
- Samoilov A.E. (2003). Channel. *Captain-club*. No. 1. P. 116–119. (in Russ.)
- Sever Evropeiskoi chasti SSSR*. (1966). The North of the European part of the USSR. Moscow: Nauka (Publ.), 452 p. (in Russ.)
- Shchukin I.S. (1980). *Chetyrokh “yazychnyi entsiklopedicheskii slovar' terminov po fizicheskoi geografii* (Quadrilingual encyclopedic dictionary of terms on physical geography). Moscow: Sovetskaya encyclopediya (Publ.), 703 p. (in Russ.)
- Spiridonov A.I. (1978). *Geomorfologiya evropeiskoi chasti SSSR* (Geomorphology of the European part of the USSR). Moscow: Vischaya shchkola (Publ.), 332 p. (in Russ.)
- Subetto D.A., Potakhin M.S., Zobkov M.B. et al. (2019). The development of Lake Onega in the Late Glacial period according to the results of GIS modeling. *Geo-*

- morfologiya*. No. 3. P. 83–90. (in Russ.)
<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019383-90>
- Terve.su. Finland [Electronic data]. Access way:
<https://terve.su/ispolinskie-kotly-v-finlyandii> (access date: 01.08.2022)
- The White Sea-Baltic Chanal named after Stalin. (1950). *Bol'shaya Sovetskaya entsyclopedia. 2 izdanie. Tom. 4.* Moscow: Sovetskaya entsyclopediya (Publ.), P. 461. (in Russ.)
- Velichko A.A., Faustova M.A., Pisareva V.V., Karpukhina N.V. (2015). Reconstruction of landscapes formed on the outskirts of the Scandinavian ice sheet during its degradation (in the interval from the maximum cooling to the beginning of the Holocene). *Aktual'nye problemy paleogeografii i stratigrafii pleistotsena: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Markovskie chteniya 2015 goda"*. Moscow: Geograficheskii facul'tet MGU (Publ.), P. 49–51. (in Russ.)
- Vinogradova N.N., Chalov R.S. (2004). Mountain rivers and rivers in the mountains: longitudinal profile, morphology and dynamics of riverbeds. *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda. Tom VI. Dinamika i vzaimodeistvie atmosfery i gidrosfery*. Moscow: Gorodets (Publ.), P. 460–469. (in Russ.)
- Voskresensky S.S. (1968). *Geomorfologiya SSSR* (Geomorphology of the USSR). Moscow: Vischaya shchkola (Publ.), 368 p. (in Russ.)