



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-182-191

УДК 519.714

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТОКА НА ПРОТАИВАНИЕ ПОДВОДНОГО СКЛОНА И ТЕМПЫ БЕРЕГОВОЙ ЭРОЗИИ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

В.К. Дебольский¹, О.Я. Масликова¹, Д.Н. Ионов¹,
И.И. Грищук^{1,2}, Н.Т. Джумагулова³

¹ Институт водных проблем РАН

ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

² Российский университет дружбы народов

ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

³ Московский государственный строительный университет

Ярославское шоссе, 26, Москва, Россия, 129337

В гидравлической лаборатории РУДН выполнены исследования разрушения подводного и надводного берегового склона в условиях, имитирующих криолитозону, в зависимости от типа грунта, слагающего откос, и угла уклона. Показано, что скорость эрозии подводного склона отстает от скорости протаивания мерзлого грунта. Работа водного потока значительно превышает влияние остальных факторов (температура, влияние ветра, солнечная радиация), приводя к образованию ниш вымывания. Работа является продолжением исследования динамики берегового склона водных объектов в условиях криолитозоны [1–4].

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, мерзлый грунт, протаивание, эрозия почв, водные поток

Введение

Мерзлота является причиной как чрезвычайной стабильности русловых потоков вследствие своих сковывающих и цементирующих свойств, так и причиной определенной нестабильности (например, при техногенных нагрузках) в условиях криолитозоны. Это приводит к тому, что огромное количество исследований, проводящихся в разное время, дают спектр противоречивых результатов, даже в рамках одной географической местности и даже одного потока. Вполне вероятно, что комбинации различных факторов могут приводить к различным соотношениям скоростей сезонного протаивания грунта и эрозии, что требует особой тщательности и осторожности, особенно при инженерном проектировании. Не всегда представляется возможным провести натурные наблюдения, а уж тем более сравнивать абсолютные скорости боковой эрозии различных мерзлых русел нерегулируемых потоков, но вполне возможно допустить, что влияние на размыв внешних условий является более стабилизирующим фактором в зоне мерзлоты, чем в районах, не принадлежащих криолитозоне. Поэтому коллективом авторов были проведены эксперименты с мерзлыми грунтами разного состава в лаборатории РУДН.

Экспериментальные исследования влияния потока на размыв подводного склона

Интенсивность разрушения берегов северных водоемов связана с тем, что размыв подводного берегового склона, сложенного мерзлыми льдистыми породами, осуществляется под действием не только механической, но и тепловой энергии движущейся воды. При этом интенсивность размыва мерзлых пород зависит от температуры [1] и льдистости пород [2].

Ранее [3] была получена формула для транспортирующей способности водного потока с учетом изменения льдистости:

$$S = 2,4 \cdot 10^{-9} \frac{U^3}{ghw(i^2 + 10^{-6})}, \quad (1)$$

где S — транспортирующая способность потока; U — средняя скорость потока; h — глубина потока; w — гидравлическая крупность незамерзшего материала; i — льдистость за счет ледяных включений в долях единицы (д.е.).

Из формулы транспорта наносов (1) и формулы Дарси—Вейсбаха для потока на склоне с учетом льдистости получаем формулу размыва твердого вещества поверхностным стоком [4]:

$$S = \frac{6 \cdot 10^{-9}}{w(i^2 + 10^{-6})} \frac{\sqrt[3]{gq_{\text{ск}}}}{\lambda^{4/3}} \text{tg } \alpha^{4/3}, \quad (2)$$

где S — транспортирующая способность склонового потока; $q_{\text{ск}}$ — удельный расход склонового потока; λ — коэффициент сопротивления, или потери энергии на трение по длине — определяется экспериментально; α — угол уклона берега.

Таким образом, видим, что зависимость размыва твердого вещества от угла уклона (при прочих равных условиях) будет иметь степенной (4/3) вид (рис. 1).

В гидравлической лаборатории РУДН была проведена серия экспериментов с полистиролом и с различным углом уклона для определения влияния потока на темпы эрозии.

Полистирол обладает меньшей плотностью и большей плавучестью, чем песок. Следовательно, для него можно подобрать такие скорости, которые будут размывающими для полистирола, но неразмывающими для песка. Таким образом, авторам удалось смоделировать двухслойную породу, слои которой имеют различные физические свойства (аналогично природным условиям: сезонноталый подвижный слой и слой ММП).

Предварительно полистирол смочили водой так, чтобы вода заполняла все пространство между частицами (насыщенный влагой грунт) и заморозили. Затем замороженные формы вложили в склон, имеющий естественный для песка угол откоса.

Полистирол был погружен в поток на 5,5 см, на поверхности оставалось 2 см. Можно было наблюдать различную скорость таяния замороженных кусков полистирола в потоке и на воздухе. Через 20 мин погруженная часть полностью

оттаяла и размывлась, тогда как верхняя часть оставалась скованной льдом еще 20 мин, и только под воздействием проседания и погружения в поток подвергалась размыву (рис. 2).

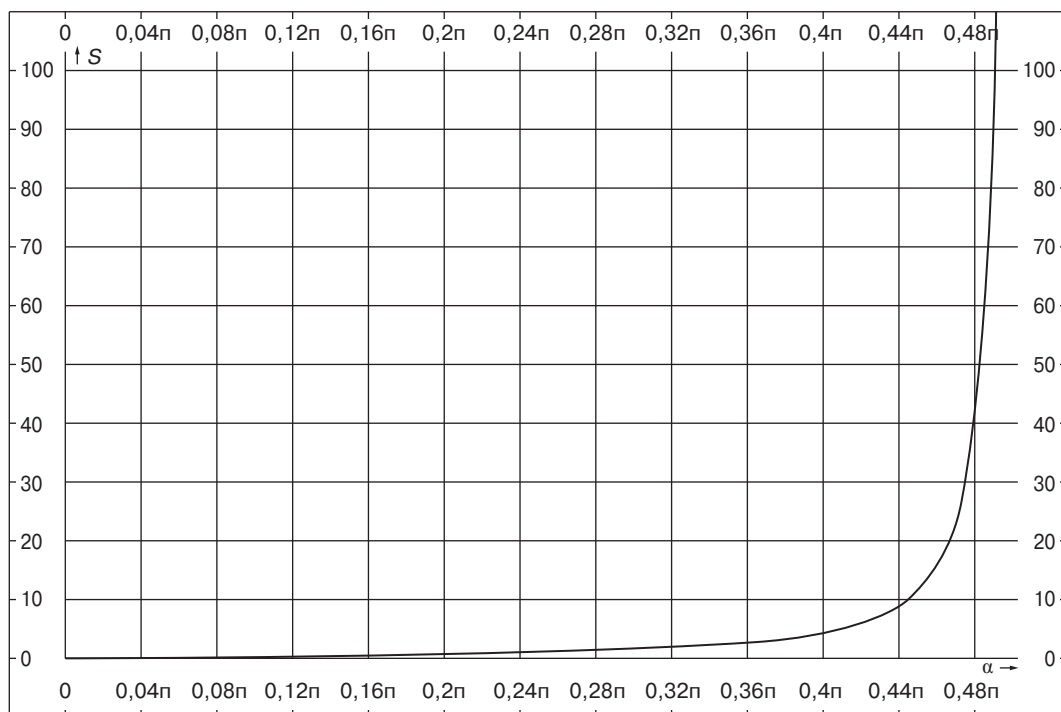


Рис. 1. Зависимость размыва твердого вещества со склона от угла уклона берега (при прочих равных условиях)

[Fig. 1. Dependence of washout of solid substance from a slope from a coast bias corner (other things being equal)]

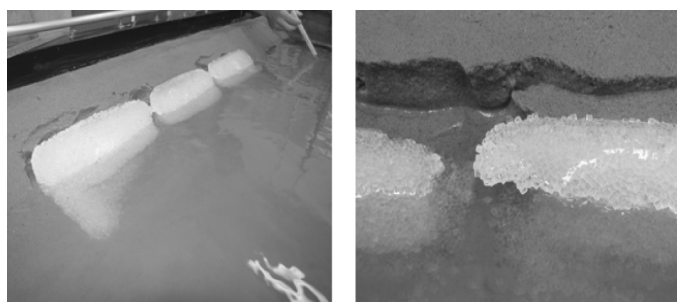


Рис. 2. Влияние потока на подводный размыв оттаявшего материала

[Fig. 2. Influence of a stream on underwater washout of the thawed material]

На участках берегового откоса, лежащих выше уреза воды, влияние потока не распространяется, и в отсутствии каких-либо внешних условий (дождь, снеготаяние, любых других факторов, вызывающих склоновые потоки) протаивание грунта не вызывает подвижки материала, а только частное проседание.

Таким образом, была проверена формула (1) — влияние скорости потока на продольный транспорт наносов (видны размывы в подводной части и навесы над водой, где скорость течения равна нулю).

Экспериментальное исследование связи протаивания подводного склона и темпов береговой эрозии

В работе [5] проведено наиболее полное на сегодняшний момент теоретическое исследование движение фронта протаивания в зависимости от глубины размыва талого грунта при типичных значениях теплофизических параметров для различных скоростей движения фронта эрозии и установлены закономерности процесса.

При увеличении скорости фронта эрозии (рис. 3) происходит увеличение скорости фронта протаивания. При этом рост скорости фронта эрозии приводит к уменьшению толщины талой прослойки. Такое развитие процесса термоэрозии соответствует предельно-термоэрозионному типу размыва, основным механизмом которого служит тепловой фактор. Однако в дальнейшем он переходит в термоэрозионный тип, характер взаимодействия водного потока с породой в этом случае определяется уже механическими факторами (прочностные свойства мерзлых пород, кинетическая энергия водного потока). При росте льдистости мерзлых грунтов скорость движения фронта протаивания замедляется, толщина талой прослойки уменьшается.

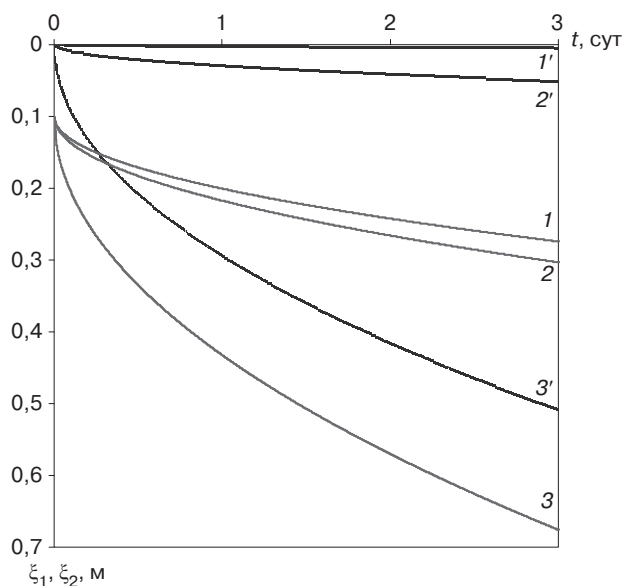


Рис. 3. Динамика фронтов эрозии (1', 2', 3') и протаивания (1, 2, 3) при различных значениях коэффициента теплопроводности

[Fig. 3. Dynamics of fronts of an erosion (1', 2', 3') and thawing (1, 2, 3) at various values of coefficient of heat conductivity]

Увеличение температуры водного потока, взаимодействующего с мерзлым грунтом, способствует росту талой прослойки, так как оттаивание породы про-

исходит быстрее. Скорость протаивания намного опережает интенсивность размыва и происходит постепенное нарастание талого слоя, идет размыв и вынос разупрочненного грунта.

На коэффициент теплопроводности оказывает сильное влияние плотность, состав включений, льдистость и состояние пород (талое — мерзлое). С увеличением льдистости повышается значение коэффициента теплопроводности. При прочих равных условиях скорость протаивания увеличивается в направлении: глины — супеси — пески.

Натурные исследования на нескольких реках Аляски [6] показали, что скорость протаивания подводного берегового склона зависит от текстуры материала и температуры воды. Результаты наблюдений [6] показывают общую тенденцию эрозии отставать от оттаивания. При этом сравнение скоростей эрозии и скоростей протаивания на двух реках Аляски показало равные результаты, независимо от свойств грунтов (рис. 4). Это как раз те случаи, когда отрицательная температура играла доминирующую роль, не давая грунту оттаять.

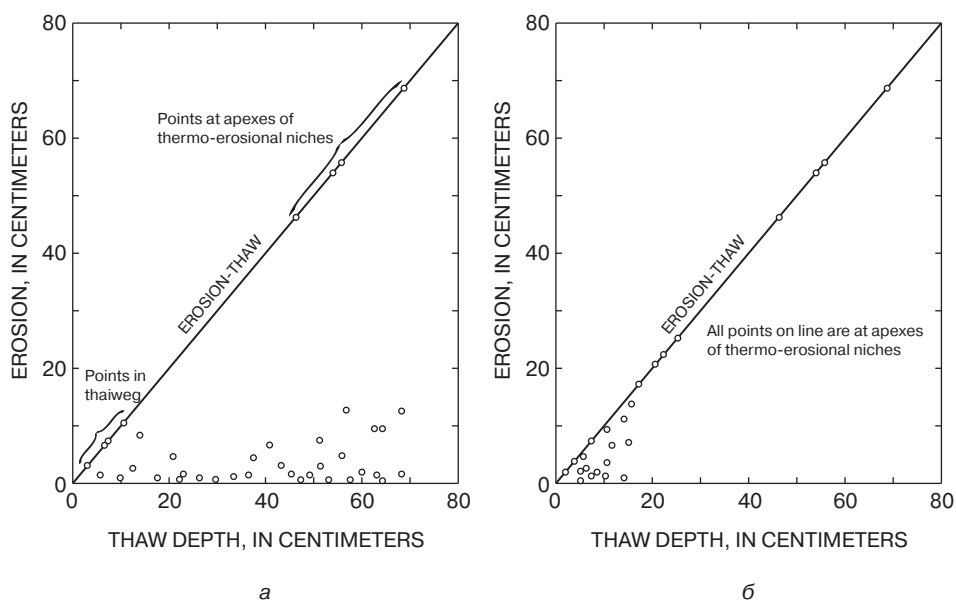


Рис. 4. Сравнение скоростей протаивания и эрозии на примере рек Аляски:
а — для несвязанного типа грунта; б — для связанного

[Fig. 4. Comparison of speeds of thawing and erosion on the example of the rivers of Alaska]

Эксперименты с различным углом откоса проводились для смоченного замороженного грунта (аналог подводного склона в условиях криолитозоны) и для естественного замороженного (аналог надводного склона в тех же условиях). Проводились замеры изменения профиля относительно начала эксперимента по времени для трех случаев: 26° (естественный угол залегания откоса), 40 и 50°. Были проведены замеры оттаивания и эрозии в течении времени, построены графики протаивания грунта различной заморозки и графики размыва для каждого эксперимента в зависимости от времени. Полученные графики однозначно интерполируются логарифмической зависимостью. Для уклона берега 40° логарифми-

ческая аппроксимация этих зависимостей представлена на рисунке 5. Для других углов уклона графики имеют аналогичный характер.

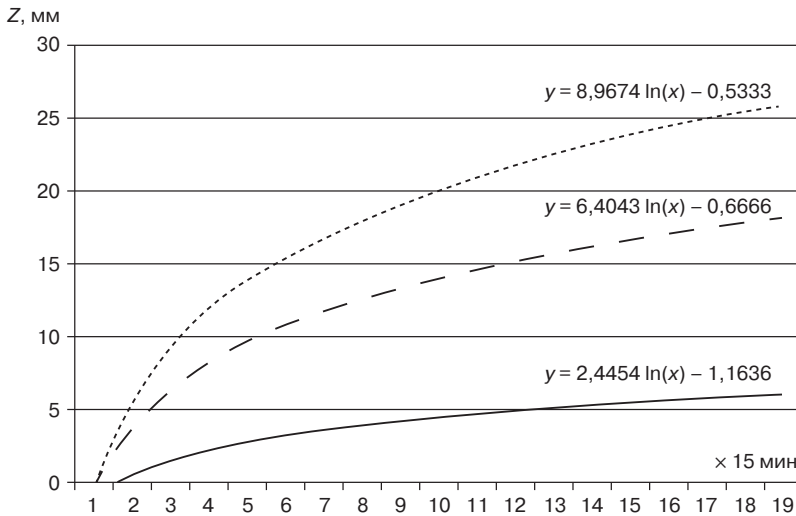


Рис. 5. Зависимость фронта протаивания Z , мм (логарифмическая аппроксимация) от времени t : пунктирная линия — для смоченного грунта, точечная — для естественного влажного; сплошная линия — движение фронта эрозии. Замеры проводились каждые 15 мин

[Fig. 5. The movement of the front of thawing (logarithmic approximation): a dashed line — for the moistened soil; dot — for natural damp; the continuous line — the movement of the front of an erosion]

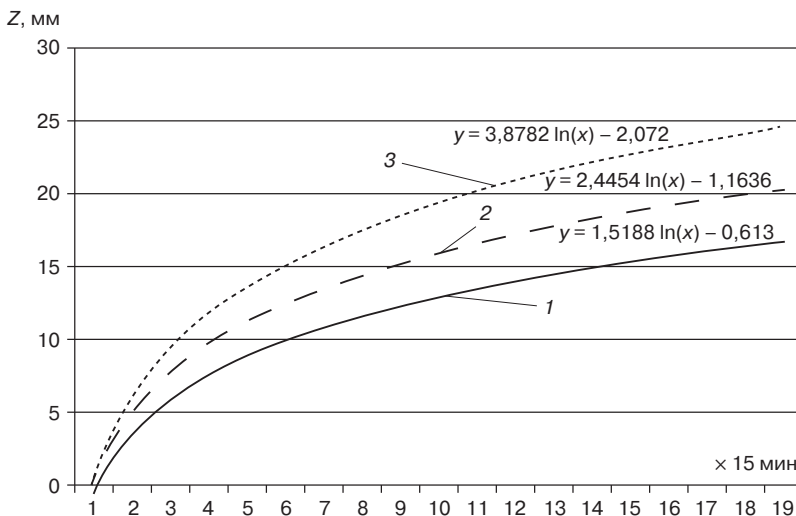


Рис. 6. Графики зависимости фронта эрозии Z , мм от времени t : 1 — для угла 27° ; 2 — для 40° ; 3 — для 50°

[Fig. 6. Schedules of dependence of speed of an erosion from time: 1 — for a corner of 27 degrees; 2 — for 40 degrees; 3 — for 50 degrees]

Из графиков видно, что начало эрозии (размыва) происходит спустя некоторое время после начала протаивания, а скорость эрозии значительно отстает от скорости протаивания минимум в 2 раза. Протаивание замороженного естественно-

го грунта и замороженного смоченного (например, такой грунт образуется ниже уреза воды в самом потоке, замерзая вместе с ним) отличаются примерно в 1,5 раза.

Хотя скорость протаивания смоченного и замороженного грунтов отличается, размыву подвергается только участок, находящийся в воде. Верхняя, надводная часть склона, подвергалась проседанию. Надо заметить, что в случае с углом 50° логарифмическая зависимость эрозии наблюдалась до определенного момента (спустя 2 ч 30 мин). Далее наблюдался отрыв большого куска грунта сверху. Это как раз тот случай, когда образуются, кроме солифлюкции, поверхностные оползни.

Если сопоставить значения эрозии для различных углов уклона (рис. 6) в одинаковые моменты времени, то можно увидеть, что зависимость этих значений будет описываться функцией $\text{tg } \alpha^{4/3}$ с определенным коэффициентом. Значения этого коэффициента рассчитываются по уравнению (2). Таким образом, экспериментально подтверждена зависимость, полученная ранее в теоретическом виде.

Эрозия подводного берегового склона в условиях криолитозоны — сложный физический процесс, окончательный результат которого зависит от массы факторов. И только рассматривая все эти факторы в совокупности, можно с определенной достоверностью спрогнозировать поведение породы в определенной точке земного шара в определенное время года и при определенных метеоусловиях.

Выводы

Интенсивность разрушения берегов северных водоемов связана с тем, что подводный береговой склон, сложенный мерзлыми льдистыми породами, размывается под действием не только механической, но и тепловой энергии движущейся воды. При этом интенсивность размыва мерзлых пород зависит от температуры и льдистости пород.

Скорость эрозии значительно отстает от скорости протаивания минимум в 2 раза. Протаивание замороженного естественного грунта и замороженного смоченного отличаются примерно в 1,5 раза.

Протаивание замороженного сухого грунта и замороженного смоченного (например, такой грунт образуется ниже уреза воды в самом потоке, замерзая вместе с ним) отличаются примерно в 1,5 раза.

Значение размыва оттаивающих пород непосредственно связана с углом залегания откоса вследствие добавления к основному воздействию потока таких явлений, как солифлюкция и оползни. При увеличении угла откоса талый увлажненный грунт легко сползает по слою еще мерзлого грунта.

Слои грунта, лежащие глубже, будут испытывать те же деформации с некоторым запаздыванием (в зависимости от скорости протаивания). Таким образом, в результате многолетних размывов будет происходить непрерывное оттаивание пород и смыв вновь образующегося деятельного слоя со скоростью, соответствующей механическим свойствам подстилающих грунтов. Деформации будут происходить до тех пор, пока не обнажатся скальные породы и/или размываемый слой не приобретет естественный для данного типа грунтов угол откоса.

Экспериментально показано, что зависимость размыва твердого вещества от угла уклона (при прочих равных) будет иметь степенной (4/3) вид. Таким образом, экспериментально подтверждена зависимость, полученная ранее в теоретическом виде.

Хотя мерзлота отличается чрезвычайной нестабильностью, как может быть нестабильным такое вещество, как лед, тем не менее, нет никаких оснований считать, что русла рек в криолитозоне с физической точки зрения отличаются от аналогичных русел в умеренных широтах. Просто в первом случае в уравнение добавляется дополнительная переменная — льдистость, и уравнения решаются с учетом реальных показателей окружающей среды (скорость ветра, температура, освещенность).

Полученные результаты исследования одной из составляющих единого термогидродинамического процесса (радиационное снеготаяние) являются необходимой частью общего прогноза влияния изменения климата на течение деструкционных криогенных процессов в зоне ММП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Грицук И.И., Масликова О.Я., Ионов Д.Н.* Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды. М.: Лед и Снег, 2013. № 1(121). С. 104–110.
- [2] *Котляков А.В., Грицук И.И., Масликова О.Я., Пономарев Н.К.* Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона. М.: Лед и Снег, 2011. № 2 (114). С. 92–98.
- [3] *Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К.* Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород. М.: Лед и снег, 2012. № 3(119). С. 73–78.
- [4] *Масликова О.Я., Козлов Д.В.* Влияние зимних и весенних условий на размыв рек в криолитозоне. М.: Природообустройство, 2014. № 1. С. 54–59.
- [5] *Хусаинова З.Р.* Теоретическое исследование процессов термоэрозии и термокарста многолетнемерзлых пород: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2007.
- [6] *Scott K.M.* Effect of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska, Geological Survey Professional Paper 1068, 1978, Library of Congress Catalog — card No. 78-600058.

© Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н.,
Грицук И.И., Джумагулова Н.Т., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 февраля 2017

Дата принятия к печати: 14 марта 2017

Для цитирования:

Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н., Грицук И.И., Джумагулова Н.Т. Лабораторное исследование влияния потока на протаивание подводного склона и темпы береговой эрозии в условиях криолитозоны // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 182–191.

Сведения об авторах:

Дебольский Владимир Кириллович, профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, гидродинамика, водные ресурсы, гидрохимия, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: vdebolsky@mail.ru

Масликова Оксана Яковлевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: oksana68@mail.ru

Ионов Дмитрий Николаевич, инженер лаборатории «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: dima_ionov@mail.ru

Грицук Илья Игоревич, кандидат технических наук, доцент департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. Старший научный сотрудник лаборатории «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Джумагулова Назира Тентимишовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ). *Сфера научных интересов:* гидравлика, водоснабжение и канализация. *Контактная информация:* e-mail: dnazira@rambler.ru

LABORATORY STUDY INFLUENCE OF FLOW ON THAWING OF UNDERWATER SLOPES AND THE PACE COASTAL EROSION OF RIVERS, OCCURING IN THE PERMAFROST ZONE

V.K. Debolskiy¹, O.Ya. Maslikova¹, D.N. Ionov¹, I.I. Gritsuk^{1,2}, N.T. Jumagulova³

¹ Russian Academy of Sciences Water Problems Institute
Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

² Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

³ Moscow State University of Civil Engineering
Yaroslavl highway, 26, Moscow, Russia, 129337

In the RUDN hydraulic laboratory researches of destruction of an underwater and surface coastal slope in the conditions imitating a kriolitizona depending on type of the soil composing a slope and a bias corner are executed. It is shown that the speed of an erosion of an underwater slope lags behind the speed of thawing of frozen soil. Work of a water stream considerably exceeds influence of other factors (temperature, wind influence, solar radiation), leading to formation of niches of washing away. Work is continuation of a research of dynamics of a coastal slope of water objects in the conditions of a kriolitizona [1—4].

Key words: laboratory experience, frozen ground, thawing, soil erosion, water flow

REFERENCES

- [1] Debolskaya Ye.I., Debolskiy V.K., Gritsuk I.I., Maslikova O.Ya., Ionov D.N. Modelirovanie deformatsiy rusel, slozhennykh merzlymi porodami, pri povyshenii temperatury okruzhayushchey sredy [Modeling beds strains composed of frozen soils, with an increase in ambient temperature]. M.: Led i Sneg, 2013. № 1(121). S. 104—110.

- [2] Kotlyakov A.V., Gritsuk I.I., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya ldistosti gruntov, slagayushchikh ruslo rek, na dinamiku beregovogo sklona [Experimental study of the effect of ice content soils composing the riverbeds, the dynamics of the coastal slope]. M.: Led i Sneg, 2011. № 2 (114). S. 92–98.
- [3] Gritsuk I.I., Debolskiy V.K., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K. «Vliyanie osadkov v vide dozhdy na deformatsii beregovogo sklona rusel rek v usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod» [The impact of rain on the coastal slope deformation of riverbeds under permafrost]. M.: Led i sneg, 2012. № 3(119). S. 73–78.
- [4] Maslikova O.Ya., Kozlov D.V. «Vliyanie zimnikh i vesennikh usloviy na razmyv rek v kriolitozone» [Influence of winter and spring conditions in the river erosion in permafrost]. M.: Prirodoobustroystvo, 2014. № 1. S. 54–59.
- [5] Khusainova Z.R. «Teoreticheskoe issledovanie protsessov termoerozii i termokarsta mnogoletnemerzlykh porod» [A theoretical study of the processes and thermal erosion thermokarst permafrost]: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. Ufa, 2007.
- [6] Scott K.M. “Effect of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska”, Geological Survey Professional Paper 1068, 1978, Library of Congress Catalog — card No. 78-600058.

Article history:

Received: 28 February 2017

Accepted: 14 March 2017

For citation:

Debolskiy V.K., Maslikova O.Ya., Ionov D.N., Gritsuk I.I., Jumagulova N.T. (2017) Laboratory study influence of flow on thawing of underwater slopes and the pace coastal erosion of rivers, occuring in the permafrost zone. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 182–191.

Bio Note:

Vladimir K. Debolskiy, professor, doctor of technical sciences, head of laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, hydrodynamics, water resources, hydrochemistry, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: vdebolsky@mail.ru

Oksana Ya. Maslikova, Ph.D., senior researcher laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: oksana68@mail.ru

Dmitriy N. Ionov, Ph.D., engineer laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: dima_ionov@mail.ru

Ilya I. Gritsuk, Ph.D., associate arofessor of the department “Architecture and construction”, Engineering academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). Senior researcher laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Nazira T. Jumagulova, Ph.D., associate professor of department of “Hydraulic and hydraulic engineering”, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University. *Research interests*: hydraulics, water supply and sewerage. *Contact information*: e-mail: dnazira@rambler.ru