

References

1. Redondo J.A. Brackish-, sea- and wastewater desalination. – Desalination № 138 (2001) p. 29–40.
2. Prepodgotovka vody v energetike / V.G. Dzyubenko, A.I. Bon, N.I. Solodokhin, V.P. Dubyaga / Membrany – 2004. Tezisy Vserossijskoj nauchnoj konferentsii. – M.: Vladimir, 2004. – P. 52.

The material was received at the editorial office
15.03.2016.

Information about the authors

Savkov Ivan Mikhailovich, a researcher; ZAO Scientific – technical center «Vladipor»; 600016, Vladimir, Boljshaya Nizhegorodskaya ul., d. 77. tel.: +79645577799; e-mail: savkovivan21@gmail.com

Zakharov Stanislav Leonidovich, doctor of technical sciences, professor of the chair «Standardization and engineering-computer graphics»; The Russian chemical – technological university named after Mendeleev, Miuskaya pl., d. 9; tel.: +79150808015; e-mail: staszaharov@yandex.ru.

УДК 502/504:627.01

Д.Н. ИОНОВ¹, И.И. ГРИЦУК^{1,2}

¹ Институт водных проблем РАН, Москва, Россия;

² Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ КАК РЕЗУЛЬТАТА ДЕФОРМАЦИИ БЕРЕГОВОГО СКЛОНА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО В СЕБЯ МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ, НА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ

Процессы термоабразии и термоденудации – одни из основных факторов разрушения морских, речных и озерных берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами (ММП). Исследование, прогнозирование и моделирование разрушения берегов в криолитозоне вызваны производственной необходимостью и представляют большой научный интерес. Деформации русел северных рек и речных склонов, несмотря на имеющиеся проблемы и высокую важность, в настоящее время изучены мало. Особенностью моделируемых условий является подбор материала берегового склона и параметров волновых процессов по характеристикам подобным натурным. В качестве материала, слагающего модель, использовался карьерный люберецкий песок. Выполнен первый этап исследований деформаций берегов на лабораторной модели, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, при воздействии волн с различными характеристиками. Прослеживается взаимосвязь между объемами деформаций, их параметрами и волновыми характеристиками. Также выявлена прямая зависимость механизма формирования склона от критериев волновых воздействий.

Транспорт наносов, параметры волнения, деформации берегов, многолетнемерзлые грунты, экспериментальные исследования, лабораторная модель.

Введение. Водный поток в реках вызывает перенос осадка, и соотношение между параметрами потока (направление, скорость, глубина) и количеством переносимого материала является очень интересным и в то же время сложным явлением, что имеет несколько принципиально важных инженерных аспектов: например, эрозии вокруг структур, повторного заполнения очищенных каналов или резервуаров, эрозии в нижних бьефах водохранилищ, морфологические изменения в реках и т.п.

Общий транспорт наносов разделяется на следующие типы:

- влекаемые наносы являются той частью осадка, которая относительно непрерывно взаимодействует с дном;
- сальтирующие наносы состоят из очень мелких частиц, которые перемещаются водой, но со дна не поднимаются;
- взвешенные наносы с дном не взаимодействуют.

Возникновение рифелей увеличивает донное напряжение трения, и эта группа наносов обуславливается общим напряжением трения.

Общий транспорт наносов состоит из сложного взаимодействия между много-

численными взаимосвязанными переменными. Теоретические подходы в исследовании транспорта наносов основаны на упрощенных и идеализированных предположениях. Эмпирические методы подчеркивают только определенное число параметров, которые, как полагают их разработчики, являются более уместными. Поэтому применимость уравнения для оценки общего транспорта наносов при натуральных экспериментах на реках полагается не только на теоретические формулировки, но также и на данные, используемые в его развитии и калибровке. В прошлом большое количество уравнений транспорта осадка было развито с использованием данных, полученных из лабораторных экспериментов с мелкими потоками.

Совокупностью поступления наносов и транспортирующей способности потока является расход наносов. Расход наносов может быть больше поступления наносов сверху лишь при эрозии, иначе дополнительному количеству наносов просто неоткуда взяться. С другой стороны, расход наносов не может быть больше, чем транспортирующая способность потока (по определению).

В зарегулированных реках при установившемся режиме донные наносы перемещаются грядами и не очень активно переходят во взвешенное состояние, а те наносы, которые поступают в большом количестве в русло извне во взвешенном состоянии, чаще всего переносятся транзитом. Однако при попусках с гидроузлов картина кардинально меняется. К тем наносам, которые поступают в большом количестве в русло извне во взвешенном состоянии, добавляется приличное количество наносов, поднятых волной, т.е. те наносы, которые обычно переносятся грядами. Перемещение гряд и размывы происходят активнее.

Ряд ученых, таких, как Энгелунд и Хансен, Экерс и Вайт, Ван Рейн [4] и Альберт Молинас [6], провел серии экспериментов и исследований по выявлению формул и критериев, наиболее подходящих для вычисления общего расхода наносов.

Энгелунд и Хансон [4] первоначально получили формулу для вычисления придонного переноса по дюнам в однонаправленном потоке путем рассмотрения баланса энергии для переноса. Позже эта формула была использована для вычисления полного переноса наносов при возмущениях,

а также введены модификации для вычисления приливно-отливных волн (Ван Де Графф и Ван Оверим). Однако их теория, когда относится к смеси наносов, содержащих большое количество средних фракций, имеет ограничения:

$$q_t = V \frac{0,05C\tau_{b,wc}^2}{(s-1)^2 d_{50} \rho^2 g^{5/2}}. \quad (1)$$

Также Энгелунд и Хансон [5] развили формулу для вычисления донного переноса наносов потоком. Эта формула позже использовалась для вычисления переноса наносов при волнении. Для вычисления вдольберегового переноса она имеет следующий вид:

$$q_t = V \frac{0,05C\tau_{b,wc}^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{u_0}{V} \right)^2 \right]^2}{(s-1)^2 d_{50} \rho^2 g^{5/2}}. \quad (2)$$

Экерс и Вайт [4] развивали полную теорию для крупных и средних наносов в однонаправленном потоке. Крупные наносы, как они предполагали, перемещаются перекатыванием, тогда как средние наносы перемещаются за счет вихрей. Эмпирические коэффициенты в формуле Экерса и Вайта были получены по данным лабораторных и натуральных экспериментов.

Подобно Энгелунду и Хансону формула, предложенная Экерсом и Вайтом, первоначально была предложена для расчета общего расхода наносов потоком, но была позже модифицирована Ван Де Граффом и Ваном Овером для описания волнового переноса:

$$q_t = V \frac{1}{1-p} d_{35} \left(\frac{V}{V_*} \right)^n \frac{C_{d,gr}}{A^m} (F_C - A)^m. \quad (3)$$

Для донных наносов Ван Рейн использовал подход Бэгнольда, предполагающего, что частицы наносов, подсакивающие под влиянием гидродинамических сил и силы их веса, определяют движение частиц наносов в придонной области. Особенности сальтации частиц были определены путем решения уравнения движения для индивидуальной частицы наноса. Расход донных наносов вычисляется как произведение между концентрацией движущихся наносов c_b , скорости частицы u_b и толщины слоя наносов δ_b :

$$q_b = c_b u_b \delta_b. \quad (4)$$

Формула Ван Рейна [4] наиболее согласована с данными, полученными в результате экспериментов с волновым и направленным потоком. Удовлетворительные результаты для всех условий, кроме условий волнового потока, показала формула Экерса и Вайта. Существенные расхождения с данными экспериментов показала формула предложенная Энгелундом и Хансоном.

Таким образом, в настоящее время не существует формула для расчета транспорта наносов, учитывающей все различные факторы включая волновые процессы.

Материал и методы исследования. В рамках настоящего исследования был выполнен ряд экспериментальных работ на лабораторной модели сложенной

мерзлыми грунтами. Исследования проводились в открытом гидравлическом лотке (далее – лоток) лаборатории «Гидрологической и технической безопасности гидросооружений» кафедры «Гидравлики и гидротехнических сооружений» инженерного факультета Российского университета дружбы народов.

В качестве материала, слагающего модель использовался карьерный люберецкий песок естественного состояния крупностью $d_{50} = 0,20$ мм. Надводная часть модели берегового склона выдерживалась в морозильной камере при температуре -18 °С в течение 24 ч, а параметры назначались в соответствии с представленными ниже схемами (рис. 1).

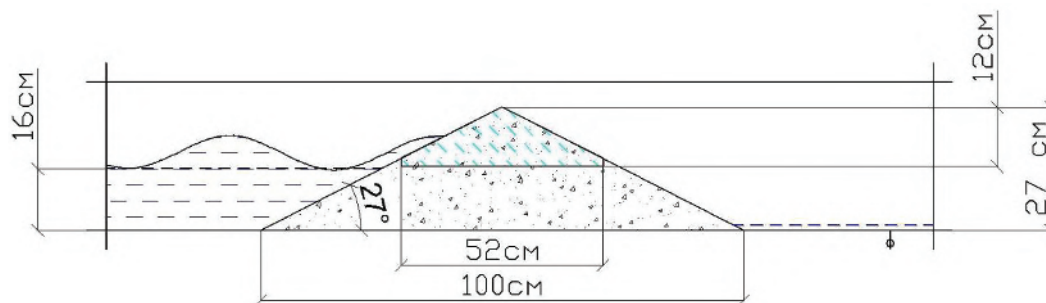


Рис. 1. Схема гидравлической модели

Лоток циркуляционного типа с возможностью изменения уклона дна в сечении имеет прямоугольную форму и оснащён программируемым волнопродуктором. Его длина составляет 16,0 м, ширина – 0,3 м, высота стенок – 0,4 м.

Модель представляет собой отсыпку из песка крупностью $d_{50} = 0,20$ мм с углами откосов 27° . Ее габариты: высота – 27 см, длина в основании – 100 см, ширина – 30 см. Глубина воды перед моделью составляет 16 см. Для экспериментов с замороженным грунтом верхняя часть модели (12 см от её общей высоты) выдерживалась в морозильной камере в течение 24 ч при температуре -18 °С, предварительно грунт увлажнялся, после чего замороженная часть устанавливалась на нижнюю, заранее отсыпанную в лотке часть модели. Для экспериментов с грунтами, имеющими положительные температуры, модель формировалась увлажненным грунтом на всю высоту (27 см) непосредственно в самом лотке (рис. 2).

По результатам первого этапа исследований на лабораторной модели было проведено более 40 экспериментов с целью

определения оптимальных волновых и модельных параметров, а также методики эксперимента в целом. В результате анализа результатов предварительных экспериментов были определены наиболее подходящие для целей исследования волновые характеристики, на основании которых выполнены чистовые эксперименты. Следует отметить, что повторяемость результатов одного эксперимента достаточно высокая, а разница показаний между экспериментами, проведенными при одинаковых волновых и модельных параметрах, варьируется от 1 до 4%.

В качестве вспомогательного элемента для визуальной оценки модели и проводимого на ней эксперимента был выполнен прозрачный шаблон модели, разлинованный ячейкой 5×5 см, который размещался непосредственно на стенке лотка в месте расположения модели (рис. 3).

Результаты и обсуждения. По данным экспериментов построены кривые и установлены зависимости для объема деформации модели и общего фильтрационного режима от волновых параметров (рис. 4, 5).

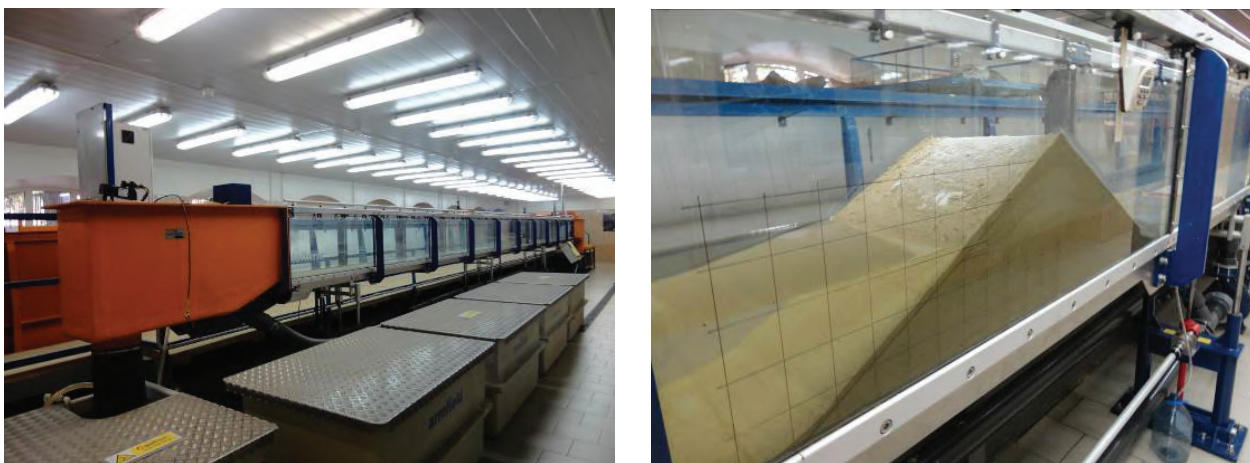


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки и модели

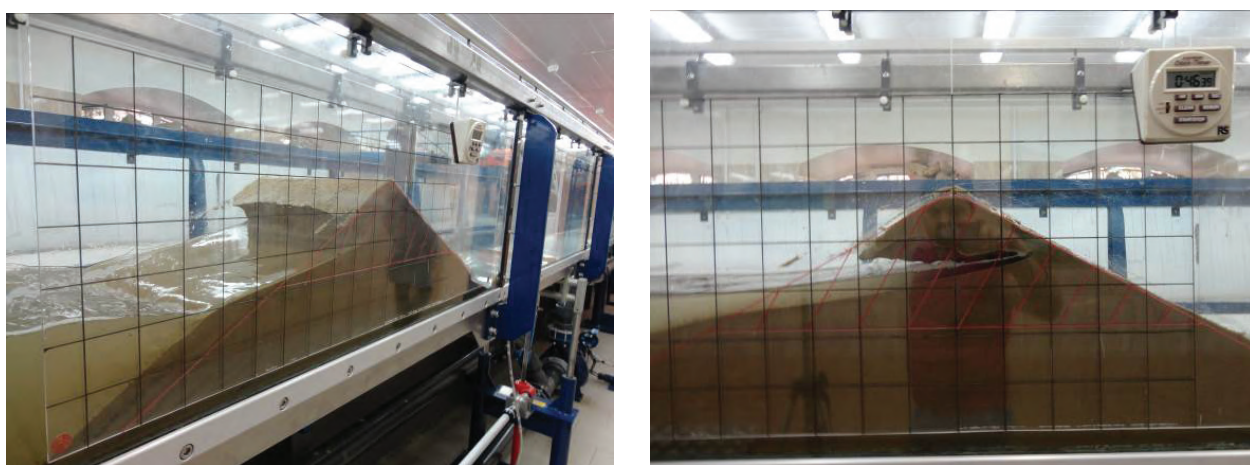
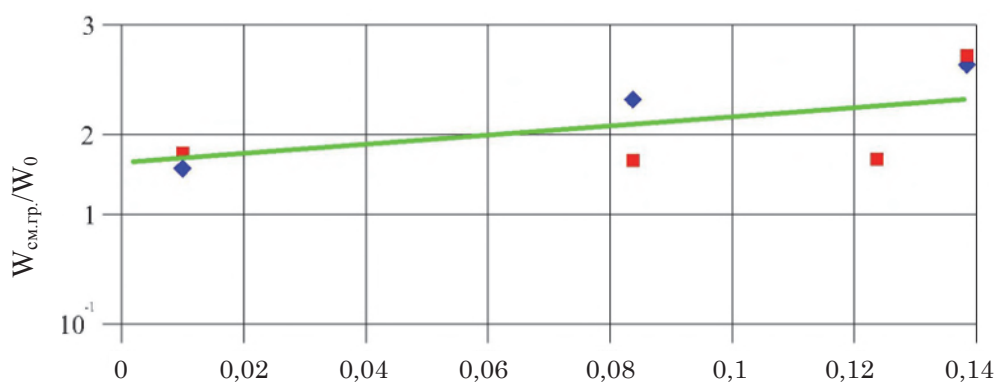


Рис. 3. Процесс деформации модели в ходе эксперимента. Верхняя часть модели выдержана в морозильной камере при температуре -18°C



$$\frac{h_e}{\lambda_e} \frac{Fr}{\ln \frac{\lambda_e}{H}}$$

- ◆ — для мерзлых грунтов
- — для грунтов с положительными температурами

Рис. 4. График зависимости объема деформации мерзлого и немерзлого грунтов моделируемого склона при волновом воздействии

Относительный объем деформации мерзлого и немерзлого грунтов склона при волновом воздействии можно аппроксимировать соотношением (5):

$$\frac{W_{см.сп.}}{W_0} = \frac{1}{4} \left(\frac{h_e}{\lambda_e} \frac{Fr}{\ln \frac{\lambda_e}{H}} \right)^{\frac{1}{15}}, \quad (5)$$

где $W_{см.сп.}$ – объем грунта смытого в процессе эксперимента; W_0 – общий объем грунта размываемой модели (до начала эксперимента); h_e – высота волны; λ_e – длина волны; H – глубина воды перед моделируемой отсыпкой; $Fr = \frac{V^2}{gh_e}$, где V – скорость набегания волны на верховой откос модели.

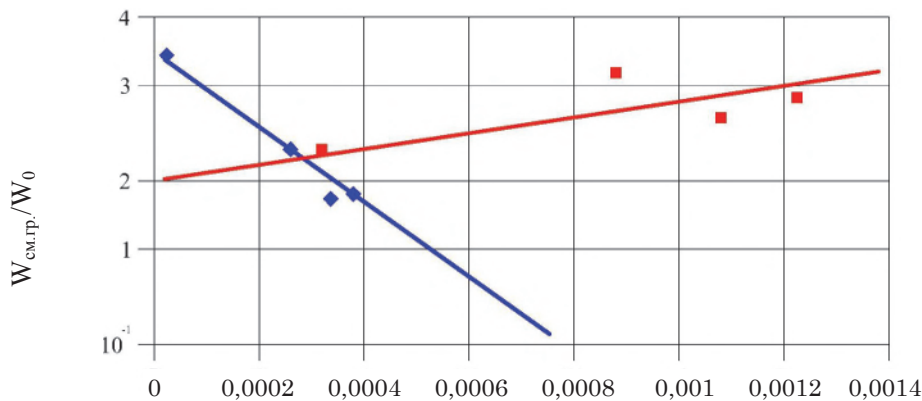
Зависимость объема фильтрации от влияния волнового воздействия можно

аппроксимировать соотношением (6) для мерзлого и (7) немерзлого грунтов:

$$\frac{W_{фил.}}{W_{наб}} = 3,3 \cdot 10^2 \left(\frac{h_e}{\lambda_e} \frac{\omega \cdot Fr}{\sqrt{gH} \ln \frac{\lambda_e}{H}} \right)^{-\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

$$\frac{W_{фил.}}{W_{наб}} = 0,82 \left(\frac{h_e}{\lambda_e} \frac{\omega \cdot Fr}{\sqrt{gH} \ln \frac{\lambda_e}{H}} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (7)$$

где $W_{фил.}$ – фильтрационный расход через тело модели; $W_{наб}$ – объем набегающей волны; h_e – высота волны; λ_e – длина волны; H – глубина воды перед моделируемой отсыпкой; ω – гидравлическая крупность; $Fr = \frac{V^2}{gh_e}$, где V – скорость набегания волны на верховой откос модели.



$$\frac{h_e}{\lambda_e} \frac{\omega \cdot Fr}{\sqrt{gH} \ln \frac{\lambda_e}{H}}$$

- ◆ — для мерзлых грунтов
- ■ — для грунтов с положительными температурами

Рис. 5. График зависимости объема фильтрации от волновых параметров

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования на лабораторной модели показали, что размыв тела моделируемой откоса, сложенного грунтом с отрицательной температурой, при возникновении волновых явлений происходит интенсивнее, чем при прочих равных условиях откоса сложенного песком с положительной температурой.

2. Объем деформации мерзлой модели в среднем на 27% превышает объем деформации модели, сложенной грунтом с положительной температурой.

3. Серии экспериментов показали, что моделирование волновых процессов и воз-

никающих в результате этих воздействий деформаций достаточно с большой долей достоверности описывает естественные процессы переформирования берегового склона и переноса наносов.

4. Результаты указанных в статье исследований позволяют разработать физико-математическую модель трансформации береговых склонов под воздействием волновых процессов, имеющую в отличие от приведенных выше физический смысл. Ранее подобная фундаментальная проблема не ставилась, однако известны эти явления и их последствия, часто приводящие к катастрофам.

5. Результаты работы могут найти широкое применение в области проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на шельфе, гидротехнических сооружений транспортной и энергетической отраслей.

Библиографический список

1. Дебольская Е.И. Динамика водных потоков с ледяным покровом. – М.: МГУП, 2003. – 279 с.

2. Дебольский В.К., Зайдлер Р., Масель С. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. – М.: Наука, 1994. – 303 с.

3. Лабораторное исследование деформаций берегового склона, включающего мерзлый грунт / В.К. Дебольский, Д.Н. Ионов, И.И. Грицук, Н.К. Пономарёв, Е.К. Синиченко // Вестник РУДН. – 2015. – № 2. – С. 25–31.

4. Bayram A. Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements / A. Bayram, M. Larsen, H.C. Miller,

N.C. Kraus // Coastal Engineering, 44. 2001. P. 79–99.

5. Engelund F. Dispersion of floating particles in uniform channel flow / F. Engelund // J. Hydraul. Div., Proc. ASCE. Vol. 95. № 4. 1969.

6. Molinas A. Transport of sediment in large sand-bed rivers / A. Molinas // J. of Hydraulic Research. Vol. 39. № 2. 2001.

Материал поступил в редакцию 23.03.2016.

Сведения об авторах

Ионов Дмитрий Николаевич (Ionov Dmitriy Nikolaevich), инженер; Институт водных проблем РАН; 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; тел.: 8 (499) 135–72–01; e-mail: dima_ionov@mail.ru

Грицук Илья Игоревич^{1,2} (Gritsuk Ilya Igorevich),¹ кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Институт водных проблем РАН; 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; кандидат технических наук, доцент²; Российский университет дружбы народов; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; тел.: 8(499)135-72-01, e-mail: grizli2881@mail.ru

D.N. IONOV, I.I. GRITSUK

Institute of water problems

Russian university of peoples' friendship

INVESTIGATION OF SEDIMENTS TRANSPORT AS A RESULT OF SHORE SLOPE DEFORMATION INCLUDING PERMAFROST ON THE LABORATORY MODEL

Processes of thermal abrasion and thermal denudation are ones of the main factors of destruction of sea, river and lake shores formed by permafrost soils (PFS). The research, forecasting and modeling of coasts destruction in the cryolite zone are caused by the operational needs and are of great scientific interest. Deformation of channels of northern rivers and river slopes despite the existing problems and high importance, now have been studied not enough. The specific feature of the modeled conditions is selection of the material of the shore slope and parameters of wave processes according to the characteristics similar to the natural ones. The Lyubertsy career sand was used as the material for model. The first stage of investigations of shores deformations on the laboratory model formed by permafrost soils under the influence of waves with different characteristics was fulfilled. The interconnection is evident between the volumes of deformations, their parameters and wave characteristics. It is evidence of the relationship between the amount of strain, their parameters and wave characteristics. There is also found a direct dependence of the mechanism of slope formation from the criteria of wave impacts.

Transport of sediments, wave parameters, deformations of shores, permafrost soils, experimental investigations, laboratory model.

References

1. Deboljskaya E.I. Dinamika vodnyh potokov s ledyanym pokrovom. – М.: MSUEE, 2003. – 279 с.

2. Deboljsky V.K., Zaidler R., Masselj S. Dinamika ruslovyh potokov i litodinamika pribrezhnoj zony morya. – М.: Nauka, 1994. – 303 с.

3. Laboratornoye issledovaniye deformatsij beregovogo sklona, vklyuchayushchego merzlyy grunt / V.K. Deboljsky, D.N. Ionov, I.I. Gritsuk, N.K. Ponimarev, E.K. Sinichenko // Vestnik RUDN. –2015. – № 2. – S. 25–31.

4. Bayram A. Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison

between predictive formulas and field measurements / A. Bayram, M. Larsen, H.C. Miller, N.C. Kraus // Coastal Engineering, 44. 2001. P. 79–99.

5. Engelund F. Dispersion of floating particles in uniform channel flow / F. Engelund // J. Hydraul. Div., Proc. ASCE. Vol. 95. № 4. 1969.

6. Molinas A. Transport of sediment in large sand-bed rivers / A. Molinas // J. of Hydraulic Research. Vol. 39. № 2. 2001.

The material was received at the editorial office
23.03.2016.

Information about the authors

Ionov Dmitriy Nikolaevich, engineer; Institute of water problems of RAS; 11933, Moscow, ul. Gubkina, d. 3, tel.: 8(499)135-72-01; e-mail: dima_ionov@mail.ru

Gritsuk Ilya Igorevich, candidate of technical sciences, senior researcher; Institute of water problems of RAS; 11933, Moscow, ul. Gubkina, d. 3; candidate of technical sciences, associate professor; The Russian university of peoples' friendship; 117198, Moscow, ul. Miklukho-Maklaya, d. 6; tel.: 8(499)135-72-01, e-mail: grizli2881@mail.ru

УДК 502/504:551.311.21

И.И. БАТЧАЕВ, Л.Б. ЧИГИРОВА, М.Т. АНАЕВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт»
Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик

СЕЛЕВОЙ ПОТОК В БЕЗЕНГИЙСКОМ УЩЕЛЬЕ

Целью работы являются исследования, направленные на изучение формирования исхода селевого потока с определением основных физико-механических и морфометрических характеристик, необходимых при проектировании селезащитных мероприятий, направленных на снижение угрозы негативного воздействия на хозяйственные объекты и их инфраструктуру, а главное – безопасности жизни людей. В работе дается описание исследования селевого потока, сошедшего 1 августа 2015 г. по р. Урель-суу в Безенгийском ущелье Кабардино-Балкарской республики. В результате натурного маршрутного обследования бассейна р. Урель-суу определены основные морфометрические характеристики сошедшего селевого потока – такие, как скорость потока, максимальный единовременный и средний расход селя, объем выноса грунтово-каменного материала с уточнением водосборной площади и длины реки.

Селевой бассейн, конус выноса, максимальный единовременный расход, селевой вал.

Район исследования – селевой бассейн р. Урель-суу – расположен на склоне юго-восточной экспозиции Главного Кавказского хребта (рис. 1). Река Урель-суу (с расходом 0,8–1,0 м³/с) берет свое начало на хребте Коргашилитау на высоте 3650 м н.у.м. и относится к бассейну р. Черек Безенгийский, впадая в нее в 11 км выше с. Безенги с левобережного склона на высоте 1760 м н.у.м., пересекая грунтовую дорогу в 400 м выше устья, ведущую к альплагерю «Безенги». Перепад высоты при длине реки 3 км составляет 1890 м со средним уклоном 0,63. В среднем течении (~ 1,2 км от устья) р. Урель-суу раздваивается, образуя V-образное ущелье с двумя рукавами, причем левый рукав длиннее правого на 0,7 км. Площадь селевого бассейна р. Урель-суу составляет 4,4 км²

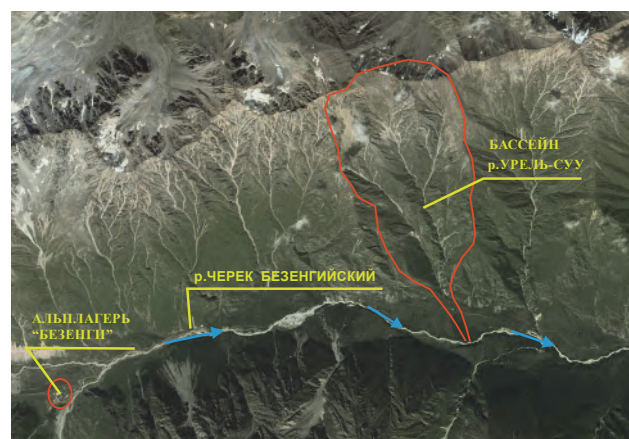


Рис. 1. Схема расположения селевого бассейна реки Урель-суу

1 августа 2015 г. по р. Урель-суу во второй половине дня сошел грязекаменный селя, причиной которого явились обильные лив-