

УДК 556.5

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОГРАФА ПРОРЫВНОГО ПАВОДКА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЕРЕЛИВА**¹Распутина В.А., ¹Пряхина Г.В., ^{1,2}Попов С.В.**¹*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, e-mail: lerasputina88@gmail.com;*²*АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Ломоносов*

При быстрых размывах грунтовых плотин искусственных водоемов и моренных перемычек приледниковых озер формируются катастрофические прорывные паводки, которые относятся к опасным гидрологическим явлениям и влекут за собой масштабный материальный ущерб и нередко приводят к человеческим жертвам. Эти опасные гидрологические явления характеризуются внезапностью и быстротечностью, поэтому организация наблюдений за ними представляет собой крайне сложную и к тому же небезопасную задачу. Для изучения этих явлений чаще всего применяются методы математического и физического моделирования. В данной статье представлена разработанная авторами методика расчета гидрографа прорывного паводка, который образуется при разрушении грунтовой плотины в результате перелива воды через ее гребень. Верификация разработанной методики была проведена на результатах физических экспериментов, которые выполнялись на специальной экспериментальной установке и в натурных условиях. Полученные в результате физических экспериментов количественные характеристики прорывных паводков использовались для сравнения с данными, которые были получены при математическом моделировании. Сравнение смоделированных гидрографов прорывных паводков с полученными в результате физических экспериментов показало их сходимость. В настоящей работе также приведены результаты численных экспериментов, которые позволили получить зависимость расхода воды от начального размера прорыва, зависимости расходов воды от таких характеристик, как удельный вес материала, из которого сложена плотина, процентное содержание глины в этом материале и величина коэффициента шероховатости. Результаты работы были признаны удовлетворительными и показали работоспособность методики расчета.

Ключевые слова: прорывы грунтовых плотин, прорывные паводки, гидрограф прорывного паводка, опасные гидрологические явления, математическое моделирование, физическое моделирование

MODELLING EXPERIENCE OF THE OUTBURST FLOOD HYDROGRAPH DUE TO THE EARTH DAMS DESTRUCTION AS A RESULT OF OVERFLOW**¹Rasputina V.A., ¹Pryakhina G.V., ^{1,2}Popov S.V.**¹*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, e-mail: lerasputina88@gmail.com;*²*Polar Marine Geosurvey Expedition JSC, Lomonosov*

Catastrophic outburst floods are formed due to the destruction of earth artificial dams and moraine dams of the periglacial lakes. Outburst floods are dangerous hydrological phenomena that cause the large material damage and often lead to human losses. These dangerous hydrological phenomena are sudden and fleeting due to this the organization of observations is extremely difficult and unsafe. To study these hydrological phenomena the methods of mathematical modelling and physical modelling are most often used. This paper presents a methodology developed by the authors for calculating the outburst flood hydrograph, which is formed during the destruction of an earth dam due to water overflow through the crest. The methodology was verified using the results of physical experiments carried out on a special experimental setup and in natural conditions. The quantitative characteristics of outburst floods obtained as a result of physical experiments were used for comparison with the data obtained in mathematical modelling. Comparison of the simulated outburst flood hydrographs with obtained hydrographs as a result of physical experiments showed their convergence. The paper also presents the results of numerical experiments, which allowed to obtain the dependence of the discharge on the initial size of the breach, the dependence of the discharge on such characteristics as the specific gravity of the material from which the dam is built, the percentage of clay in this material and the roughness coefficient value. The results of the work were considered satisfactory and demonstrated the efficiency of the calculation method.

Keywords: earth dam outbursts, outburst floods, outburst flood hydrograph, dangerous hydrological phenomena, mathematical modelling, physical modelling

Прорывные паводки, образующиеся при разрушении искусственных и естественных грунтовых плотин вследствие их перелива, относятся к опасным гидрологическим явлениям и часто влекут за собой катастрофические последствия: значительный материальный ущерб и человеческие жертвы. Прорывы искусственных грунтовых плотин происходят в разных регионах нашей планеты с различными геоморфологическими

условиями, а прорывы естественных перемычек приурочены, как правило, к труднодоступным горным районам [1]. В последнем случае речь идет о моренных и приледниковых озерах. Переполнение их котловин (благодаря интенсивному притоку талых ледниковых вод, выпадению большого количества осадков или поступлению большого объема воды в результате прорыва моренного озера, расположенного

выше), а также уменьшение устойчивости плотины (в результате таяния ледяного ядра в моренной перемычке, фильтрации через рыхлый моренный материал, динамического движения ледяных глыб, снежных лавин и оползней, обвалов моренного материала и крупных валунов во время землетрясений) могут привести к запуску механизма прорыва и впоследствии спровоцировать сход селевых потоков [1-3].

В силу внезапности и быстротечности процессов прорывов организация наблюдений за ними крайне затруднена. Поэтому для изучения этих явлений целесообразным становится применение различных методов моделирования. В отечественной и зарубежной научной литературе достаточно много работ посвящено исследованию процесса прорыва искусственных грунтовых плотин [4-6] и внутриледниковых водоемов [7; 8]. Что касается прорывов естественных моренных плотин, то список опубликованных научных работ (особенно отечественных) не так обширен. В качестве примера можно отметить публикацию [3], где рассмотрены результаты моделирования прорывных паводков и селей в долине р. Гунт (Таджикистан) и семи долинах-притоках. Для этого была адаптирована двумерная модель движения водных и селевых потоков FLO-2D PRO (США) с использованием цифровой модели рельефа ALOS PALSAR (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>). Имеющиеся натурные данные о характеристиках прорывов в результате разрушений грунтовых плотин (время разрушения, морфометрия проранов, расходы воды) весьма ограничены, несмотря на многочисленность таких событий, и часто базируются лишь на свидетельствах очевидцев. Многие случаи прорывов плотин не фиксировались сразу после самого события или не были точно и полно описаны. В этой связи оценка эффективности моделирования путем сравнения характеристик модельных гидрографов с наблюдаемыми данными реальных прорывов вызывает определенные сложности.

В настоящей работе представлены результаты верификации модели расчета гидрографа прорыва при переливе через грунтовую дамбу. В отличие от моделей подобного класса [6; 9] авторами предложена аппроксимация поперечного сечения прорана, которая, по их мнению, более точно отражает процесс его развития; также предлагается учитывать изменение скорости потока в придонной части прорана на границе

с грунтом. Расчетные гидрографы сопоставлялись с данными, которые были получены авторами в ходе физического моделирования. На основе проведенных численных экспериментов показано влияние изменения характеристик грунта на скорость эрозии.

Материалы и методы исследования

Модель расчета гидрографа при прорыве грунтовой плотины

Предложенная модель расчета гидрографа прорывного паводка разработана авторами и основывается на следующих представлениях:

- формирование прорывного паводка при переливе воды через гребень плотины начинается с момента, когда вода из подпруженного однородной искусственной плотинной или естественной моренной перемычкой водоема начинает течь по телу плотины и частично фильтроваться в нее;

- насыщение тела плотины водой ведет к снижению ее устойчивости, ввиду чего образовавшийся поток начинает ее разрушать и выносить частицы грунта, слагающего эту плотину;

- образование прорана происходит в центре гребня плотины, где уже имеется углубление малого размера; здесь происходит концентрация потока воды.

Если $Q_B(t)$, $Q_{IN}(t)$ и $Q_S(t)$ – это переменные во времени расход воды через проран, расход воды притока, поступающего в водоем, и расход воды через водосбросы соответственно, то изменение объема водоема в случае его прорыва $\Delta V(t)$ за время Δt составит:

$$\Delta V = \Delta t (Q_{IN} - Q_B - Q_S),$$

или, переходя к бесконечно малым величинам,

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{IN} \Delta t - Q_B \Delta t - Q_S \Delta t, \quad (1)$$

В качестве допущения примем, что течение воды через проран близко по параметрам к течению воды через водослив с широким порогом. Исходя из этого, для определения расхода воды через проран в каждый момент времени t , $t > t_0$, где t_0 – начальный момент времени, будем использовать уравнение [10]:

$$Q_B(t) = \mu \omega(t) \sqrt{2gH(t)}, \quad (2)$$

где $\omega(t)$ – площадь поперечного сечения потока; μ – коэффициент расхода, завися-

щий от типа водослива и условий его работы, изменяется в широком диапазоне ($\mu = 0,3 \div 0,6$); g – ускорение свободного падения; H – напор воды, равный разности отметок поверхности воды в потоке $z_W(t)$ и дна прорана $z_B(t)$ (рис. 1):

$$H(t) = z_W(t) - z_B(t). \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в уравнение (2), получаем уравнение для определения расхода воды через проран на каждый момент времени:

$$Q_B = M \omega(t) \sqrt{z_W(t) - z_B(t)},$$

где

$$M \equiv \mu \sqrt{2g}. \quad (4)$$

Отметка поверхности воды $z_W(t)$ может быть получена по зависимости объема водоема от его глубины $z_W = F(V)$, которая предполагается известной, например, по результатам батиметрической съемки.

Соотношение для расчета $\omega(t)$ зависит от того, каким образом будет аппроксимирована форма поперечного сечения потока через проран, иными словами, как будет происходить развитие прорана. При моделировании чаще всего его форму аппроксимируют треугольником или трапецией [6].

Если D_T и D_B – ширина прорана в верхней и нижней части, а z_C – отметка гребня плотины, то площадь поперечного сечения потока $\omega(t)$ и прорана $\Omega(t)$ на каждый момент времени, с учетом (4), можно представить как:

$$\omega(t) = \frac{D_T(t) + D_B(t)}{2} (z_W - z_B), \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \Omega}{\Delta t} = \left[2(z_C - F(V(t))) + \sqrt{(D_T(t) - D_B(t))^2 + 4(F(V(t)) - z_B(t))^2} \right] \frac{\Delta l}{\Delta t} + D_B(t) \frac{\Delta l_B}{\Delta t}. \quad (8)$$

Значения скорости приращения линейных размеров прорана равна скорости эрозии $E(t)$. Она определяется сдвиговым напряжением на эродируемой поверхности τ [11], инициируемым водным потоком, причем эрозия имеет место только в том случае, когда превышено некоторое пороговое значение сдвигового напряжения τ_c скорости эрозии.

$$\Delta l(t) = E(t) = K [\tau(t) - \tau_c],$$

где K – коэффициент эрозии, для расчета которого воспользуемся соотношением (9) по [6].

$$K = \frac{10\rho_W}{\rho_S} \exp \left\{ -0.121 \mathbf{x}^{0.406} \left(\frac{\rho_S}{\rho_W} \right)^{3.1} \right\}, \quad (9)$$

где ρ_S – плотность материала, из которого сложена плотина, ρ_W – плотность воды, \mathbf{x} – доля содержания глины в грунте, из которого сложена плотина.

$$\Omega(t) = \omega(t) + D_T(z_C - z_W), \quad (6)$$

тогда,

$$Q_B = M \frac{D_T(t) + D_B(t)}{2} (z_W - z_B)^{3/2},$$

или

$$Q_B = M \frac{D_T(t) + D_B(t)}{2} (F(V(t)) - z_B)^{3/2}. \quad (7)$$

Предположим, что разрушение плотины и развитие прорана (изменение его размеров, а именно ширины и глубины) начинается в центральной части гребня плотины через некоторое малое и произвольно заданное нарушение поверхности. Приращение линейных размеров прорана, вызванные донной эрозией $\Delta l_B(t)$, меньше, чем у его боковых частей $\Delta l(t)$, поскольку скорость в придонном слое ниже среднего значения, используемого при расчете $\Delta l(t)$. Для расчета площади живого сечения потока $\omega(t)$ на произвольный момент времени t , $t > t_0$, его форма аппроксимируется трапецией, как наиболее часто встречающейся при описании форм проранов при прорывах (рис. 1а). В то же время в процессе углубления прорана происходит подмыв боковых стенок и их обрушение, в результате чего поперечное сечение прорана принимает более сложную форму (рис. 1б). Практически это означает, что профиль прорана в пределах смоченного периметра остается трапециевидальным, а сверху – прямоугольным.

Таким образом, с учетом (5), (6) и (7), скорость приращения площади прорана можно записать следующим образом:

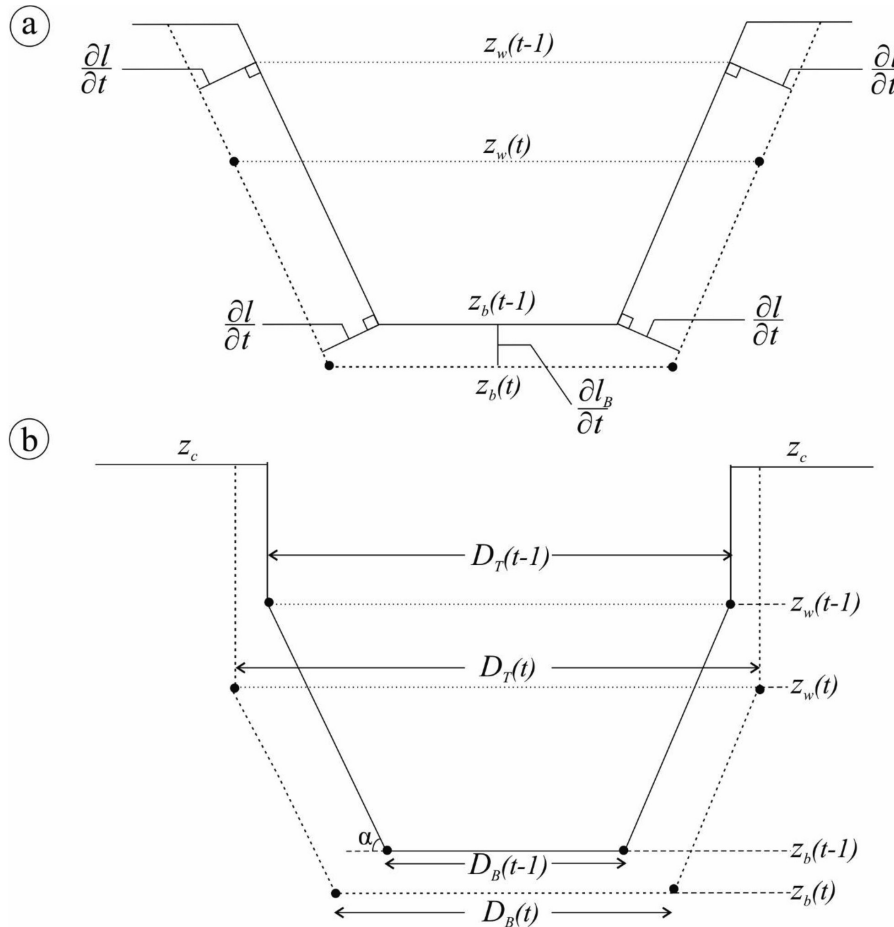


Рис. 1. Схема вычисления площади поперечного сечения потока (а) и площади прорана (b)
 Обозначения: $D_f(t)$ и $D_B(t)$ – ширина прорана в верхней и нижней частях прорана соответственно,
 $\frac{\partial l}{\partial t}$ – скорость денудации, соответствующая средней скорости потока,
 $\frac{\partial l_B}{\partial t}$ – скорость денудации, соответствующая донной скорости потока,
 $z_w(t)$ и $z_b(t)$ – отметка воды и отметка дна прорана

Соотношение для расчета $\tau(t)$ согласно [6]:

$$\tau(t) = \rho_w g R(t) S(t),$$

или

$$\tau(t) = \gamma_w R(t) S(t), \quad (10)$$

с учетом того, что $\gamma_w = \rho_w g$, где γ – удельный вес.

Если $S(t)$ – энергетический уклон, согласно соотношению, предложенному в [6], определим как:

$$S(t) = \bar{v}^2 n^2 [R(t)]^{-4/3}, \quad (11)$$

где \bar{v} – средняя скорость потока воды, которая определяется как $\bar{v} = \sqrt{2g(z_w - z_b)}$; n – коэффициент Стиклера, зависящий от крупности частиц грунта, характеризуется значениями в интервале от 0.01 до 0.05 и определяется соотношением $n = (0.15 / \sqrt{g}) k^{1/6}$, где k – крупность частиц грунта. Энергетический уклон также рассчитывается для донной скорости v_B ,

которая определяется по уравнению Караушева $v_B = \bar{v} \sqrt{1 - \frac{z}{R(t)} \left(0.57 + \frac{3.3}{C} \right)}$, где z – глубина погружения точки, C – коэффициент Шези, $R(t)$ – гидравлический радиус потока,

$$R(t) = \frac{\omega(t)}{D_B(t) + \sqrt{(D_T(t) - D_B(t))^2 + 4(z_W - z_B)^2}},$$

или

$$R(t) = \frac{0.5(D_T(t) + D_B(t))(\mathbb{F}(V(t)) - z_B)}{D_B(t) + \sqrt{(D_T(t) - D_B(t))^2 + 4(\mathbb{F}(V(t)) - z_B)^2}}. \quad (12)$$

Воспользуемся для определения τ_c соотношением, предложенным в [14]:

$$\tau_c = 6.8 \xi^{1.68} \kappa^{-1.73} \zeta^{-0.97}, \quad (13)$$

где ξ – индекс пластичности грунта, % (характеристика, отражающая способность грунта удерживать воду, для супесей изменяется в пределах 1-7%, для суглинков 7-17%, для глин больше 17%), из которого сложена плотина, ζ – пористость грунта.

Таким образом:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = K \eta (\mathbb{F}(V(t)) - z_B) \left[\frac{D_B(t) + \sqrt{(D_T(t) - D_B(t))^2 + 4(\mathbb{F}(V(t)) - z_B)^2}}{0.5(D_T(t) + D_B(t))(\mathbb{F}(V(t)) - z_B)} \right]^{1/3} - \phi, \quad (14)$$

где $\eta \equiv 2\rho_w g^2 n^2$ и $\phi \equiv K \tau_c$

$$\begin{aligned} \frac{\partial l_B}{\partial t} = K \eta [\mathbb{F}(V(t)) - z_B(t)] & \left[\frac{D_B(t) + \sqrt{(D_T(t) - D_B(t))^2 + 4(\mathbb{F}(V(t)) - z_B(t))^2}}{0.5(D_T(t) + D_B(t))(\mathbb{F}(V(t)) - z_B(t))} \right]^{1/3} \times \\ & 1 - 0.95 [\mathbb{F}(V(t)) - z_B(t)] \left[\frac{D_B(t) + \sqrt{(D_T(t) - D_B(t))^2 + 4(\mathbb{F}(V(t)) - z_B(t))^2}}{0.5(D_T(t) + D_B(t))(\mathbb{F}(V(t)) - z_B(t))} \right] \times \\ & \left[0.57 + 3.3 n_s \left(\frac{0.5(D_T(t) + D_B(t))(\mathbb{F}(V(t)) - z_B)}{D_B(t) + \sqrt{(D_T(t) - D_B(t))^2 + 4(\mathbb{F}(V(t)) - z_B)^2}} \right)^{-1/6} \right] - \phi. \end{aligned} \quad (15)$$

Скорости изменения элементов конфигурации прорана $\frac{\partial l}{\partial t}$ и $\frac{\partial l_B}{\partial t}$ зависят от постоянных для каждого объекта величин K , η , ϕ и z_c , и определяются соотношениями (14) и (15), его изменяющимися линейными размерами D_T , D_B , z_B , а также уровнем воды z_W . Скорость изменения величин D_T и D_B определяется через $\frac{\partial l}{\partial t}$ и $\frac{\partial l_B}{\partial t}$ как

$$\frac{\partial D_T}{\partial t} = 2 \frac{\partial l}{\partial t}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial D_B}{\partial t} = \frac{\partial l_B}{\partial t}. \quad (17)$$

Скорость падения уровня воды и сам уровень воды z_W определяются по объемной кривой, $z_W = \mathbb{F}(V)$, с учетом вытекшей воды через проран и возможного пополнения озера (16), т.е.

$$z_W(t) = \mathbb{F} \left(\int_{t_0}^t [Q_{IN}(t) - Q_B(t) - Q_S(t)] dt \right). \quad (18)$$

Подставляя полученные соотношения в (5) и численно решая полученное уравнение, найдем конфигурацию профиля прорана в каждый момент времени, а с учетом (1) получим изменяющийся во времени расход через него. Граничными условиями для решения краевой задачи выступают конфигурация прорана и расход на определенный момент времени или на момент завершения стадии (т.е. $t \rightarrow \infty$), на который требуется знать общий объем вытекшей воды. Начальными условиями является объем воды в озере и его уровень, а также геометрические размеры дамбы. Так как модель не рассчитывает формирование первичного нарушения в теле плотины, обоснование и рекомендации к выбору его размеров были выполнены на основе численных экспериментов и приведены ниже.

Результаты исследования и их обсуждение

Численные эксперименты

Для проверки алгоритма модели на адекватность был выполнен ряд численных экспериментов: при неизменной геометрии плотины и водоема вводились разные размеры начального нарушения в дамбе, а также различные характеристики грунта при прочих равных параметрах модели. Характеристики плотины и водохранилища для численных экспериментов соответствовали Кокпектинскому водохранилищу, расположенному в Казахстане (длина плотины 940 м, высота плотины 12 м, объем водохранилища 2.7 млн м³), прорыв которого случился 31 марта 2014 г. [12].

На рис. 2а и 2б представлена серия расчетных гидрографов при разных размерах первичного нарушения в теле дамбы. Выбранный интервал значений ширины составлял от 1 до 10 м, что соответствовало от 0.1 % до 1 % длины дамбы, глубина первичного нарушения задавалась от 0.8 % до 8 % высоты плотины.

Как показали расчеты, изменение ширины первичного нарушения при фиксированной глубине не влияет на время прохож-

дения волны, форму гидрографа и время начала прорыва. Что касается максимального расхода, то чем больше ширина первичного нарушения при прочих равных условиях, тем меньше максимальный расход. Это достаточно логично, так как в этом случае происходит более быстрое увеличение расходов воды, что в свою очередь ведет к более стремительному истечению воды из водоема. Более интенсивное истечение приводит к уменьшению напоров и, соответственно, уменьшению скорости течения, вследствие чего значение максимального расхода становится меньше. При этом увеличение ширины в два раза от начальной (с 1 до 2 м) приводит к снижению максимального расхода на 2 %, а увеличение ширины в 10 раз от начальной (с 1 до 10 м) приводит к уменьшению максимального расхода всего лишь на 13.5 % (рис. 2а).

Увеличение глубины первичного нарушения тела дамбы при прочих равных условиях практически не оказывает влияния на значения максимального расхода (изменение глубины в 10 раз (с 0.1 до 1 м) изменяет расход примерно на 1.5 %), форму гидрографа и время прохождения волны паводка. В то же время значительно увеличивается время от начала перелива до достижения максимального расхода и спуска всего водоема: изменение глубины первоначального нарушения с 0.1 до 1 м увеличило время до 0.5 ч. Чем меньше первичная глубина, тем дольше будет происходить процесс размыва и позднее наступит максимальный расход воды, что также не противоречит природе протекания процесса.

Исходя из вышеизложенного, рекомендованные размеры первичного нарушения плотины предлагается задавать следующие: ширина не более 1 % от длины, а глубина не более 5 % от высоты дамбы. Именно в этих интервалах, как показали численные эксперименты, значения расходов меняются в пределах точности их измерений (5 %).

Проведенные численные эксперименты также показали, что в наибольшей степени модель «чувствительна» к таким входным параметрам, как удельный вес материала, слагающего плотину, и процент содержания в нем глины, поскольку от них зависит величина коэффициента эрозии. На рис. 3а приведены полученные авторами графики зависимости коэффициента эрозии от удельного веса материала и процентного содержания глины для грунтов, которые наиболее часто используются при строительстве плотин и встречаются в составе моренных дамб, согласно [13].

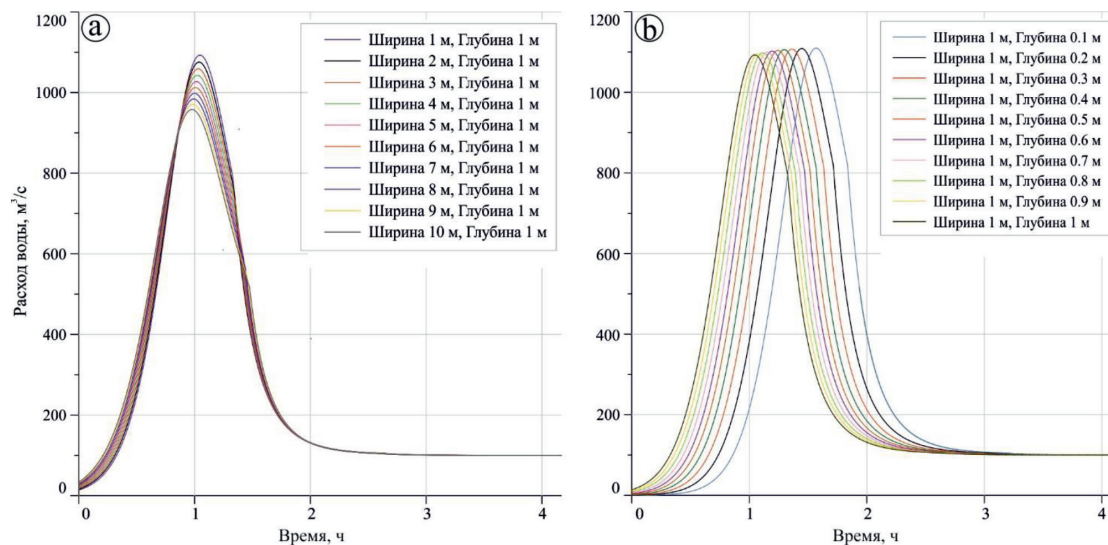


Рис. 2. Гидрографы при разной начальной ширине прорана (а) и глубине прорана (б)

Влияние вышеперечисленных параметров на величину максимального расхода воды проиллюстрировано на рис. 3б. Как видно из графиков, изменение содержания глины всего на 2% для разных по гранулометрическому составу грунтов ведет к изменению величины максимального расхода до 20%. Данная зависимость обусловлена влиянием этих факторов на скорость эрозии и, следовательно, на скорость разрушения плотины.

Что касается параметра n_s – коэффициента шероховатости, то в интервале значений, характерных для земляных русел (0.02–0.03), которые наилучшим образом подходят для случаев прорывов, его изменение приводит к изменению величин расходов до 5% (рис. 3с).

Физические эксперименты

Так как получить наблюдаемый гидрограф прорывного паводка возможно только в условиях эксперимента, верификация алгоритма модели была выполнена по данным, полученным в ходе серии физических экспериментов, проведенных на экспериментальной установке и в натурных условиях (рис. 4). Экспериментальный водоем представлял собой емкость, выполненную из монолитного поликарбоната размером 1×1×1.5 м, состоящую из двух отсеков.

Первый отсек размером 1×1×0.6 м заполнялся водой. Во втором отсеке сооружалась дамба. Между отсеками была установлена перегородка с прямоугольным

отверстием (0.05×0.15 м) для перетекания воды. Во время заполнения первой емкости до начала эксперимента отверстие закрывалось затвором. Для фиксации уровня воды на стенке второй емкости была установлена мерная шкала. Натурные эксперименты были проведены в июле 2018 г. на Кавказе (рис. 4б) [14].

Расходы воды через проран по результатам экспериментов определялись по формуле:

$$Q = \frac{W_1 - W_2}{T}, \quad (19)$$

где Q – расход воды через проран, л/с; W_1 и W_2 – объемы при разных уровнях воды (дискретность 1 см), T – время, за которое уровень воды упал на 1 см. Для оценки сходимости рассчитанных по модели и полученных в результате эксперимента гидрографов был использован коэффициент Нэша-Сатклиффа (NS) [15], рекомендованного Американской ассоциацией гражданских инженеров для оценки состоятельности моделей стока, а также используемого Всемирной метеорологической организацией для сравнительного анализа моделей. Диапазон значений критерия находится в пределах от $-\infty$ до 1, в общем случае моделирование признается удовлетворительным при $NS > 0.5$. В качестве примера приведем результаты экспериментов с наилучшим, удовлетворительным и наихудшим значениями NS (размеры дамб и характеристики грунтов представлены в таблице).

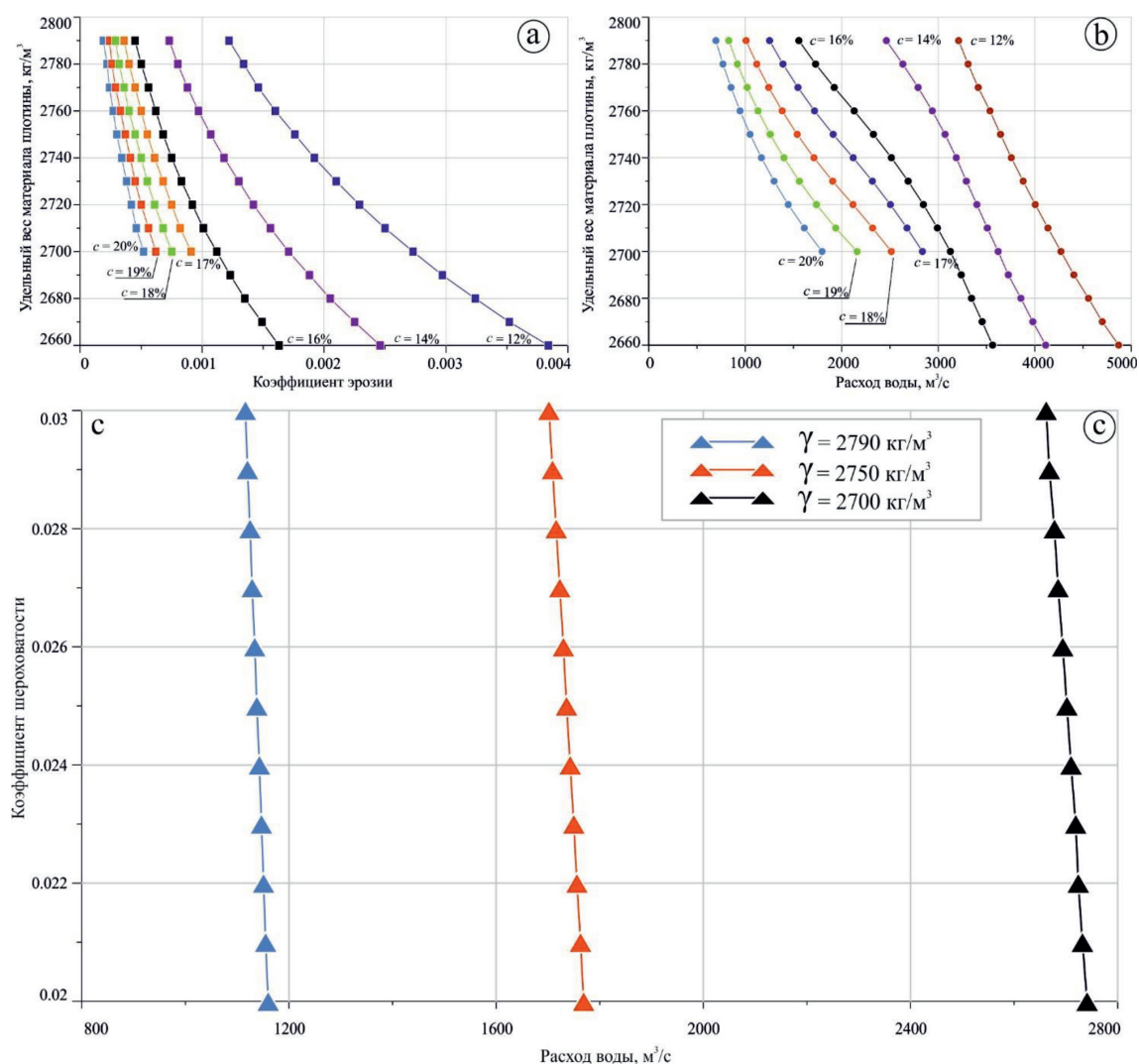


Рис. 3. Зависимость коэффициента эрозии от удельного веса материала плотины и процентного содержания глины в нем (а), зависимость расхода воды от удельного веса материала дамбы и процентного содержания глины в нем (б), зависимость расхода воды от величины коэффициента шероховатости (с)

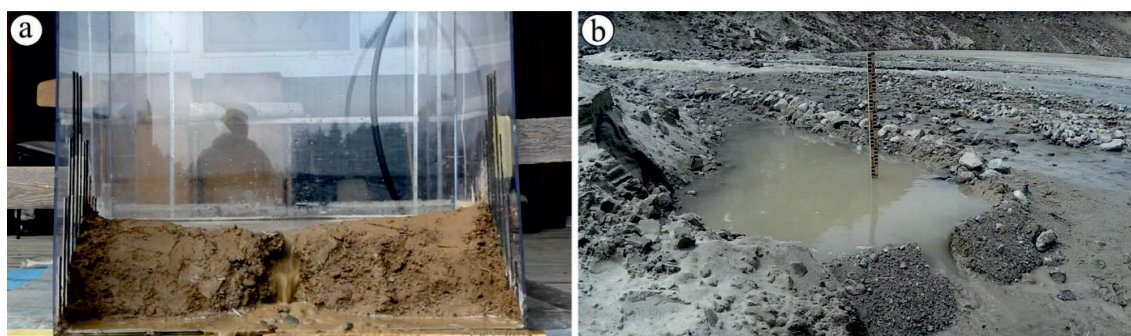


Рис. 4. Фотографии процесса разрушения модельных дамб: эксперимент № 1 (а) и эксперимент № 2 (б)

Характеристики экспериментальных плотин и водоемов

№ п/п	1 эксперимент	2 эксперимент (натурный)	3 эксперимент
Грунт	Супесь	Моренный грунт	Супесь
Уд. вес грунта/% глины	2730 / 16%	2630 / 5%	2590 / 6.9%
Высота, м	0.2	0.17	0.35
Толщина по подошве, м	0.46	0.4	0.71
Длина по гребню, м	1	1.2	1
Ширина гребня, м	0.1	0.05	0.05
Длина откосов, м	0.29 и 0.33	0.3 и 0.3	0.55 и 0.55
Глубина начального прорана, м	0.005	0.005	0.01
Объем водоема, м ³	0.183	0.203	0.312

Отметим, что, так как целью моделирования была проверка расчетного алгоритма, физические модели (плотины) имели произвольно заданные размеры и не являлись уменьшенными копиями известных плотин.

Полученные в результате эксперимента наблюдаемые и смоделированные гидрографы прорывов искусственных водоемов (рис. 5) характеризуются асимметричной формой (за исключением эксперимента № 2 (рис. 5b)): быстрым увеличением расходов воды и более плавным снижением их значений после достижения максимума. При моделировании не учитывается спонтанное обрушение грунта с бортов прорана, которое ведет к появлению локальных увеличений расходов воды на наблюдаемых гидрографах (рис. 5 а, b).

Анализ смоделированных и полученных в результате физических экспериментов гидрографов показал: наступление пиков прорывных паводков практически совпадает по времени; расхождение в наступлении максимальных расходов воды составляет от 5 (эксперимент № 1, рис. 5а) до 7 секунд (эксперименты № 2 и № 3, рис. 5b и 5с), что является отклонением не более чем на 5.5% от наблюдаемых. Наибольшее отклонение значений смоделированных максимальных расходов от полученных в результате экспериментов составило 6% (эксперимент № 1, 5а). При проведении эксперимента № 2 (рис. 5b) произошло спонтанное обрушение грунта на 19-й секунде, что привело к несовпадению пиков гидрографов. Именно для этого случая критерий NS принимает наименьшее значение – 0.42. В случае эксперимента № 1 NS составил 0.61, что говорит об удовлетворительной сходимости, а для эксперимента № 3 – 0.8, что свидетельствует о хорошей сходимости гидрографов

и, следовательно, о высоком качестве моделирования. В последнем случае образование прорана протекало исключительно за счет размыва тела дамбы, без спонтанных обрушений стенок, формирования фильтрационного канала (piping) и других нарушений.

Заключение

Представленная в работе модель расчета гидрографа прорывного паводка относится согласно Paul J. Visser [9] к физически обоснованным моделям прорыва плотин, которые используют принципы гидравлики, эрозии и механики почвы для разработки пошаговых во времени решений описания процессов увеличения прорана и гидрографа прорыва. Опыт ее верификации показал, что результаты моделирования, согласно коэффициенту NS, в целом получены удовлетворительные, демонстрирующие работоспособность алгоритма. Как и во всех моделях данной группы, остается не решенным вопрос о формировании начального нарушения в теле плотины. Тем не менее по результатам численных экспериментов авторами предложен количественный критерий выбора размеров начального нарушения в теле плотины. Численные эксперименты подтвердили чувствительность модели к изменению коэффициента эрозии, который зависит от гранулометрического состава грунтов, слагающих плотины. В частности, изменение содержания глины всего на 2% для разных по гранулометрическому составу грунтов ведет к изменению величины максимального расхода до 20%. В этой связи дальнейшие шаги по совершенствованию алгоритма должны заключаться в учете неоднородностей в структуре искусственных грунтовых плотин и естественных моренных перемычек.

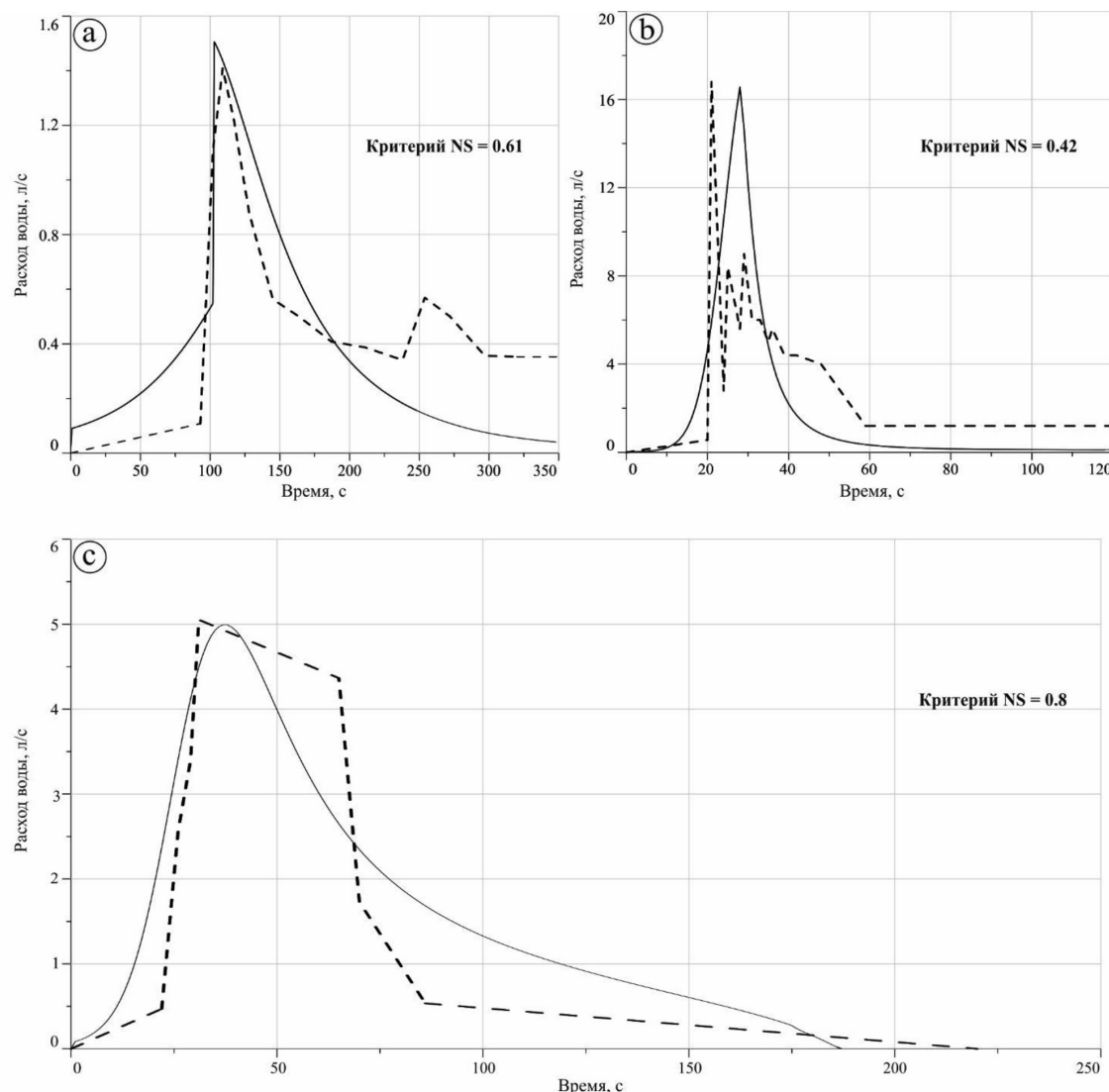


Рис. 5. Наблюдаемые (пунктирная линия) и смоделированные (сплошная линия) гидрографы прорывного паводка для эксперимента № 1 (а), эксперимента № 2 (б) и эксперимента № 3 (с)

Модель имеет простой в реализации алгоритм и, несмотря на определенные ограничения, может быть использована для оценочных расчетов характеристик прорывных паводков, формирующихся при переливе через грунтовые дамбы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00343 А «Выявление особенностей протекания процесса прорывов озер оазисов Антарктиды на основе данных полевых исследований и математического моделирования».

Список литературы / References

1. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В.,

Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80).

Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleinikov A.A., Bekkiev M.Iu., Viskhadzhieva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Kidiaeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Retz E.P., Saverniuk E.A., Smirnov A.M. The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017 // Kriosfera Zemli. 2018. Vol. 22. no. 2. P. 70–80 (in Russian). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80) (in Russian).

2. Виноградова Т.А., Макушин М.А., Виноградов И.А., Парфенов Е.А., Кадацкая М.М., Сазонова С.И. Расчет морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов при прорывах грунтовых плотин // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 2. С. 280–295. DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.006.

Vinogradova T.A., Makushin M.A., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kadatskaya M.M., Sazonova S.I. Calculation of the morphometric characteristics of the closure channel and the extreme discharge during breakthroughs of ground dams //

Gidrosfera. Opasnyye protsessy i yavleniya. 2019. Vol. 1. is. 2. P. 280–295. DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.006 (in Russian).

3. Кидяева В.М., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.Н., Докукин М.Д., Висхаджиева К.С., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О., Раимбеков Ю.Х., Курбонмамадов Д.А., 2018. Моделирование прорывов горных озер и селевых потоков в Горно-Бадахшанской автономной области, Таджикистан // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов Международной научно-практической конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова (г. Санкт-Петербург, 28-30 марта 2018 г.). С. 897–902.

Kidyayeva V.M., Chernomoretz S.S., Savernyuk E.A., Krylenko I.N., Dokukin M.D., Viskhadzhieva K.S., Bobov R.F., Pirmamadov U.R., Marodaseinov F.O., Raimbekov Y.H., Kurbonmamadov D.A., 2018. Modelling of mountain lakes outbursts and debris flows in the Gorno-Badakhshan autonomous region, Tajikistan // Tret'i Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yu.B. Vinogradova (g. Sankt-Peterburg, 28-30 marta 2018 g.), 2018. P. 887–892 (in Russian).

4. Богославчик П.М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 4. С. 292–296. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296.

Boghaslauchyk P.M. Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow // Nauka i tekhnika. 2018. Vol. 17. № 4. P. 292–296. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296 (in Russian).

5. Chang D.S., Zhang L.M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 10. P. 933–946. DOI: 10.5194/nhess-10-933-2010.

6. Zhong Q., Chen S., Deng Z. A simplified physically-based breach model for a high concrete-faced rockfill dam: a case study. Water Science and Engineering. 2018. Vol. 11. Is. 1. P. 46–52. DOI: 10.1016/j.wse.2018.03.005.

7. Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С. Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоемов // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 25–32. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(25-32).

Popov S.V., Pryakhina G.V., Boronina A.S. Estimation of water discharge during development of glacial and subglacial outburst floods // Kriosfera Zemli. 2019. Vol. 23. no. 3. P. 20–26. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2019-3(20-26) (in Russian).

8. Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dalk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity. J. Glaciol. 2021. P. 1–16. DOI: 10.1017/jog.2021.58.

9. Zhu Y., Visser P., Vrijling, J. Review on embankment dam breach modeling. New Developments in Dam Engineering. 2004. P. 1189–1196.

10. Караушев А.В. Речная гидравлика. Курс общей и специальной гидравлики для гидрологов. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 417 с.

Karaushev A.V. River hydraulics. General and Special Hydraulics Course for Hydrologists. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 417 p. (in Russian).

11. Attal M., Cowie P.A., Whittaker A.C., Hobley D., Tucker G.E., Roberts G.P. Testing fluvial erosion models using the transient response of bedrock rivers to tectonic forcing in the Apennines. J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. F02005. DOI: 10.1029/2010JF001875.

12. Отчёт о выполнении работ по теме: «Оценка причин возникновения чрезвычайной ситуации, произошедшей на Кокпектинском водохранилище в ночь с 30 на 31 марта 2014 года с расчётом максимального расхода паводковых вод. Республика Казахстан» выполнено ООО НПО «Гидротехпроект», Караганда, 2014.

Progress report on the topic: «Assessment of the causes of the emergency that occurred at the Kokpekty reservoir on the night of March 30 to March 31, 2014 with the calculation of the maximum flow of flood waters. Republic of Kazakhstan» was carried out by Scientific and Production Organization Gidrotekhproekt LLC, Karaganda, 2014. (in Russian).

13. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 41 с.

14. Пряхина Г.В., Боронина А.С., Попов С.В., Распутин В.А., Войнаровский А.Е. Физическое моделирование разрушения грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема // Изв. РГО. 2019. Т. 151. № 2. С. 51–63. DOI: 10.31857/S0869-6071151251-63.

Pryakhina G.V., Boronina A.S., Popov S.V., Rasputina V.A., Voinarovskii A.E. Physical modelling of the destruction of reservoir ground dam in consequence of the overflow of water body // Izv. RGO. 2019. Vol. 151. № 2. P. 51–63. DOI: 10.31857/S0869-6071151251-63 (in Russian).

15. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. J. hydrology. 1970. № 10 (3). P. 282–290.