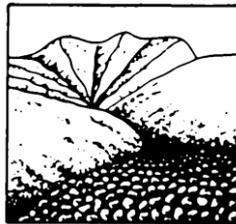


# **DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection**

---

Proceedings  
of the 5<sup>th</sup> International Conference

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018



Editors  
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

---

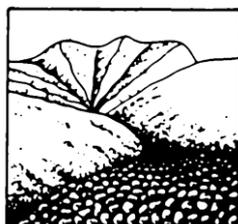
Publishing House “Universal”  
Tbilisi 2018

# **СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита**

---

Труды  
5-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г.



Ответственные редакторы  
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили

---

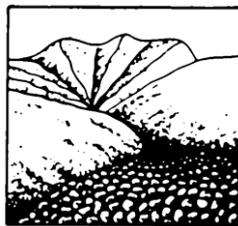
Издательство Универсал  
Тбилиси 2018

# ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

---

მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის  
მასალები

თბილისი, საქართველო, 1-5 ოქტომბერი, 2018



რედაქტორები  
ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი

---

გამომცემლობა "უნივერსალი"  
თბილისი 2018

УДК 551.311.8  
ББК 26.823

**Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита.** Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018, 671 с.

**Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection.** Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018, 671 p.

**ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა.** მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018. გამომცემლობა "უნივერსალი", თბილისი 2018, 671 გვ. პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი.

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили  
Edited by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Верстка: С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева, Е.А. Савернюк  
Page-proofs: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva, E.A. Savernyuk

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).  
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman’s book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-9941-26-283-8

© Селевая ассоциация  
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава  
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association  
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute  
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია  
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა  
მეურნეობის ინსტიტუტი



## Моделирование ливневых паводков на примере канала Широкого

**В.А. Куровская, Т.А. Виноградова**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
viktoriiakurovskaia@gmail.com, vinograd1950@mail.ru*

По данным Росгидромета наводнениям подвержены около 500 тысяч км<sup>2</sup>, наводнениям с катастрофическими последствиями - 150 тысяч км<sup>2</sup>, где расположены порядка 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельхозугодий. Для строительства защитных сооружений необходимо изучение процессов. Целью данного исследования было расчет масштабов ливневых паводков на канале Широком, и сопутствующих им характеристик. Для этого была применена модель неустановившегося движения воды. Используя данные натурных измерений 2013-2014 и оценочных в 2017 был промоделирован ливневой паводок для 2 вариантов задания максимальных расходов. ОАО «Севкавгипроводхозом» была предоставлена информация о расходе, при котором начинается подтопление дороги в районе городе Ессентуки. Кроме этого в данном исследовании был вычислен максимальный расход воды во время проходящего паводка в 2017 году. Также были получены значения скоростей и изменения площади поперечного сечения. В силу того, что коэффициент шероховатости является функционально-зависимым параметром, и для его расчета обратным путем отсутствовали необходимые данные, нами было подобрано сопротивление от 0.015 до 0.03 по длине расчетного участка и до 0.07 максимального значения. Таким образом, были получены характеристики паводков, которые могут быть использованы в целях защиты территории.

*модель неустановившегося движения воды; ливневые паводки; скорость; расход;  
коэффициент шероховатости; затопление*

## Modeling of flash floods on the example of the Shirokii Channel

**V.A. Kurovskaia, T.A. Vinogradova**

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, viktoriiakurovskaia@gmail.com,  
vinograd1950@mail.ru*

According to Roshydromet, about 500 thousand km<sup>2</sup> suffers from floods, floods with disastrous consequences - 150 thousand km<sup>2</sup>, where there are about 300 cities, tens of thousands of settlements, a large number economic objects, more than 7 million hectares of farmland. Construction of protective structures is impossible without study of the processes. The purpose of this research was to calculate the scale of flash floods on the Shirokii Channel and the associated characteristics of the event. The research established a model of unsteady water movement. Using field data of 2013-2014 and estimated data of 2017 flash flood modeled for 2 variants of maximum discharges obtained. OJSC "Sevkaavgiprovdkhov" provided with information on the flow discharge under which flooding of the road begins in the area near city Yessentuki begins. Moreover, this research calculated maximum flow discharge of passing flood in 2017. Besides, the study obtained the values of velocities and cross-sectional area. Due to the fact that code of roughness is functionally dependent parameter, and for its calculation in the reverse necessary data were missing, we selected the resistance empirically from 0.015 to 0.03 along the length of the



calculated section and to 0.07 maximum value. To sum up, this research obtained characteristics of flooding, which can be used for protection of the territory.

*model of unsteady water movement; flash floods; velocity; discharge; code of roughness; flooding*

### Введение

В связи с тем, что последние несколько лет наблюдаются серьезные наводнения и прорывы искусственных водозащитных дамб в Ставропольском крае, а для проектирования защитных сооружений необходимы исследования для получения информации о масштабах и характеристиках явлений, целью данного исследования являлся расчет неустановившегося движения воды. При этом выполнялись следующие задачи-моделирование паводков с изменением гидравлико-морфометрических характеристик, начальных и граничных условий, и анализ полученных результатов на участке канала Широкого, где последние года происходили подтопления территории.

### Объект исследования

В настоящее время Большой Ставропольский Канал (БСК) представляет собой магистральный канал на Северном Кавказе, является основным элементом крупнейшей в России Ставропольской обводнительно-оросительной системы, расположенной в бассейнах рек Кубань, Терек и Кума. Канал берет начало от Головного водозабора Усть-Джегутинского водохранилища на Кубани, проходит между предгорьями Кавказского хребта и Маньчской впадиной, заканчиваясь в районе Чограйского водохранилища на р. Калаус и Кумо-Маньчского канала. Проектная длина БСК составляет 480 км, максимальная пропускная способность – 180 м<sup>3</sup>/с. Проектная площадь орошения составляет 200.5 тыс. га на 2017 год [Министерство сельского хозяйства...].



Рис. 1. Большой Ставропольский канал.

Основным объектом данной работы является распределитель «Широкий» - крупный канал в Ставропольском крае, расположенный в бассейне реки Кубань. Данный канал появился еще в первую очередь строительства в 1957-1967 годах. Он обводняет восточный участок Армавирского коридора, орошает его поля, пополняет водой реку Суркуль, низовья Сухого и Мокрого Карамыков и доносит кубанскую воду до реки Кумы у Зеленокумска. Более 40 лет он исправно используется в качестве питьевой воды, для орошения, рыбоводства, обводнения и рекреации. Канал сконструирован таким образом, что во время ливней происходит подтопление дороги в районе г. Эссентуки при расходе в канале равном 20 м<sup>3</sup>/с.



Климат территории близок к умеренно-холодному климату. По классификации климата Кеппен-Geiger относится к Dfb. Среднегодовая температура в городе Ставрополь - 8.5 °С. Среднегодовая норма осадков - 549 мм.

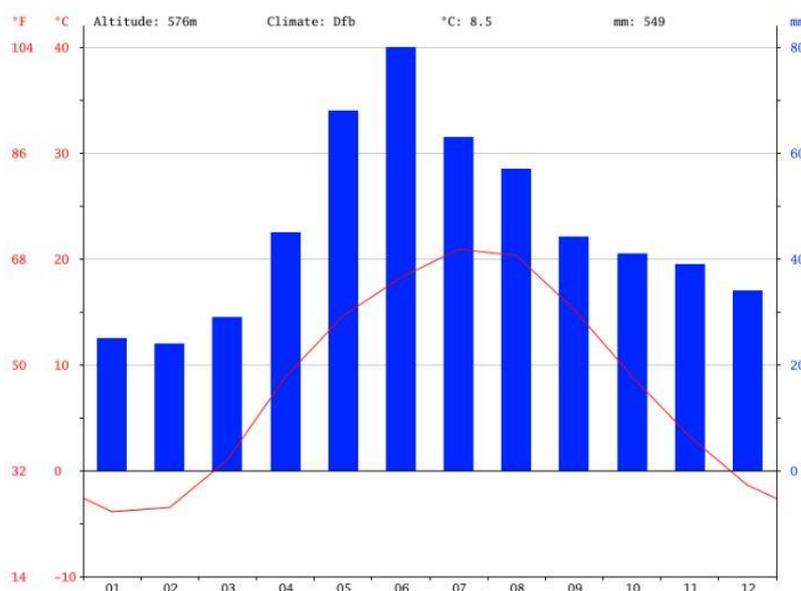


Рис. 2. Климатический график Ставрополя.

## Материалы и методы

Исследование катастрофических опасных явлений необходимо для их прогноза и строительства защитных сооружений. При этом необходимым является определение масштабов явления, а также динамических характеристик. В настоящее время в мировой практике используются полевые наблюдения, а именно создаются стационары и станции, дистанционные методы, такие как сейсмодатчики и геофоны [Comiti et al., 2014], экспериментальное и математическое моделирование. У каждого из перечисленных выше методов есть своя область применения, а также степень точности.

Для расчета паводков на канале Широком была использована математическая непрерывная модель, описывающая движение потока вещества как сплошной среды и применяются преимущественно для моделирования паводков, половодий, селей. Модель неустановившегося движения воды основывается на строгих методах расчета, то есть на решении одномерной системы уравнений Сен-Венана при этом счет ведется по неявной разностной схеме. В основе модели лежат дифференциальные уравнения неустановившегося движения воды в открытых руслах при наличии бокового притока в следующем виде:

$$I = i_o - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\alpha}{g} V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V|V|}{C^2 R} + \frac{qV}{gw} \quad \text{уравнение динамического равновесия} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{уравнение неразрывности} \quad (2)$$

При решении уравнения Сен-Венана использовалась численная схема, разработанная в Институте гидродинамики СО АН СССР (ИГ) [Виноградова, Никифоровская, 2015]. Уравнения неустановившегося движения берутся в форме



законов. Процесс решения происходит в несколько этапов. На первом вершины и отрезки рассматриваются в порядке возрастания номеров с  $i=1$  и  $j=1$ , что является по сути прямой прогонкой. На этапе обратной прогонки вершины и отрезки рассматриваются наоборот в порядке убывания. В ходе решения обобщенных уравнений Сен-Венана предполагается, что распределения расходов, уровней воды по длине каждого отрезка для момента времени  $t = t^k$  известны. Использование такой численной схемы делает возможным расчет одного русла без разветвлений или же простейших схем русел, таких как слияние двух русел или раздвоение одного. Также в программе реализован учет бокового притока или оттока сосредоточенного, и равномерно распределенного. В качестве расчетных параметров используются натурные данные. Исходная информация представляет собой длину расчетных участков, значения расчетных интервалов времени и шагов по длине, обобщенные морфометрические характеристики русла (аккумулирующие ёмкости, положения линии дна, принятое в расчете), характеристики гидравлических сопротивлений, схематизированные начальные и граничные условия и боковой приток или отток. Следует отметить, что состав и точность исходных данных зависят от специфики объекта, характера неустановившегося движения, принятого метода расчета, а также от поставленной задачи и необходимой точности ее решения. В ходе моделирования для каждого расчетного створа выдается следующая информация:

1. Гидрографы стока
2. Отметки уровней воды по расчетным створам
3. Средняя скорость течения, м/с
4. Площадь поперечного сечения, м
5. Ширина, м
6. Модуль расхода
7. Число Рейнольдса
8. Число Фруда

### Результаты и обсуждение

Расчет проводился для уточнения гидролого-морфометрических характеристик паводка на участке канала Широкого на основе предоставленных данных о прошедшем паводке в 2017 году ОАО «Севкавгипроводхозом». Для этого была построена схема имеющегося участка, разделенного на 3 участка с учетом морфометрических особенностей (рис. 3)

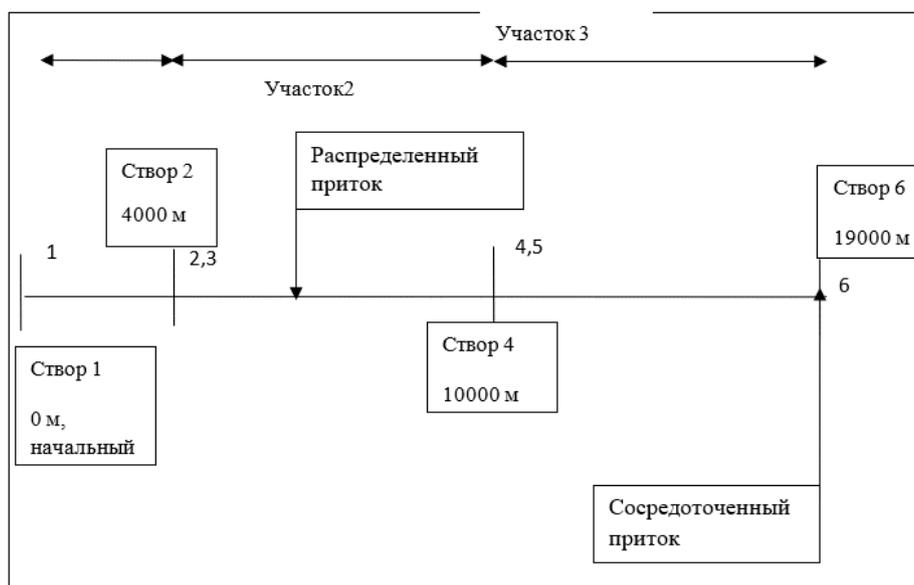


Рис. 3. Схематизация модели неустановившегося движения воды для участка канала Широкого.

При этом моделирование производилось для 2 вариантов начальных и граничных условий, которые подразумевает различную величину максимального расхода воды, определенного по натурным данным 2013-2014 годов. Так в первом варианте максимальный заданный расход составлял  $12.1 \text{ м}^3/\text{с}$ , в то время как во втором -  $16.9 \text{ м}^3/\text{с}$ , при этом расходы сосредоточенного притока были увеличены по оценочным данным 2017 года.

Непосредственный интерес представляли полученные по модели неустановившегося движения гидрографы стока. Прошедший в 2017 году паводок показал, что подтопление дороги в районе города Эссентуки начинается при расходе в  $20 \text{ м}^3/\text{с}$ , участок дороги проходит в непосредственной близости от 5 створа. Для первого варианта данное значение было превышено на 30-37%, с максимальным значением в  $31.9 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 4).

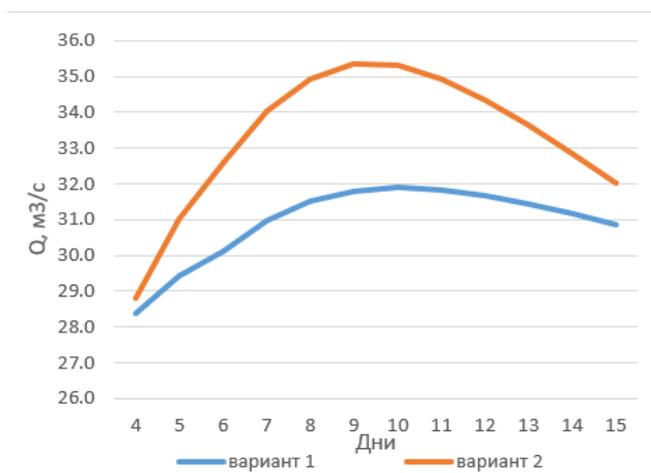


Рис. 4. Изменения расходов воды на 5 створе для двух вариантов.

В то время как для второго варианта максимальное полученное значение расхода на створе составило  $35.3 \text{ м}^3/\text{с}$ , приращение максимального расхода составило 43%. Модель расчета неустановившегося движения воды позволяет узнать в какое время паводочная волна достигнет своего максимума и его величину на определенном участке реки. Значение полученных скоростей по двум вариантам отличаются на 32% (рис.5).

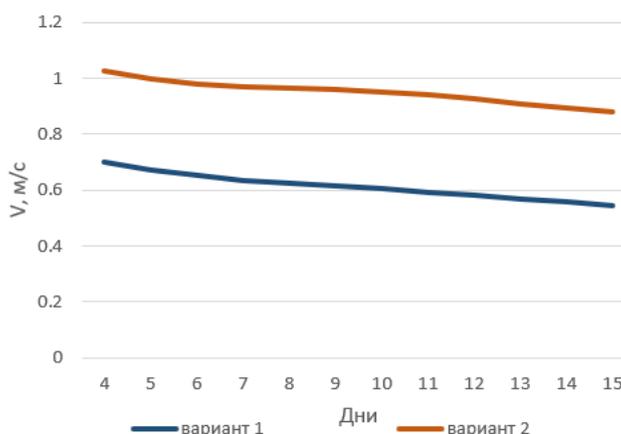


Рис. 5. Изменения скоростей на 5 створе для двух вариантов.

Учетом количественной характеристикой гидравлического сопротивления, как правило, является коэффициент Шези, обычно считаемым для каналов по формуле Маннинга. В виду того, что гидравлические сопротивления для размываемых русел обуславливаются не только выступами шероховатостей дна и приближенных откосов, а



также и параметрами донных гряд, наиболее приближенное их описание требует статистического подхода. Значение коэффициента шероховатости можно находить на основе натуральных данных: строение границ русла, характер берегов, наличие растительности, извилистость русла. Но влияние всех этих факторов ведет к тому, что заданные значения  $n$  становятся неопределенным. В связи с тем, что в модели неустановившегося движения отсутствует блок калибровки, а расчет обратным путем не представлялся возможно в виду отсутствия данных, было рассмотрено влияние коэффициента сопротивления на расчетные характеристики. Коэффициент шероховатости изменяется в пределах от 0.015 до 0.07. В нашем случае изначально коэффициент шероховатости задавался с увеличением от 0.025 до 0.03 по длине расчетного участка для обоих вариантов. Далее для 2 варианта производился расчет при изменении данного коэффициента. Необходимо отметить, что минимальным значением коэффициента шероховатости при котором модель могла производить расчеты оказалось промежуток от 0.015 до 0.03, максимальное же значение составило 0.07. Расчет проводился с устойчивым значением коэффициента шероховатости для всего участка. Ниже представлены значения скоростей на 5 и на 6 створе, то есть в непосредственной близости от пролегающей трассы и после нее.

Таблица 1. Результаты расчетов при изменении коэффициента шероховатости.

|                    | Расход на 5 створе, м <sup>3</sup> /с | Расход на 6 створе, м <sup>3</sup> /с |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| При $n=0.015-0.03$ | 37.1                                  | 35.0                                  |
| При $n=0.3-0.25$   | 35.3                                  | 25.8                                  |
| При $n=0.04$       | 33.1                                  | 20.6                                  |
| При $n=0.045$      | 32.5                                  | 18.6                                  |
| При $n=0.05$       | 32.1                                  | 16.9                                  |
| При $n=0.055$      | 32.0                                  | 16.9                                  |
| При $n=0.06$       | 31.1                                  | 14.2                                  |
| При $n=0.065$      | 30.6                                  | 13.2                                  |
| При $n=0.07$       | 30.3                                  | 12.4                                  |

Таким образом, наибольшие значения расхода наблюдаются при наименьшем значении коэффициента шероховатости. Необходимо отметить, что во всех расчетах время наступления максимума совпадало и приходилось на 12 день паводка из 15. Кроме этого были получены изменения скорости воды на 5 створе в течение всего паводка. Как можно заметить по рисунку 5 максимальная скорость на 5 створе также наблюдаются при наименьших коэффициентах шероховатости и достигает 1.03 м/с (рис. 6).

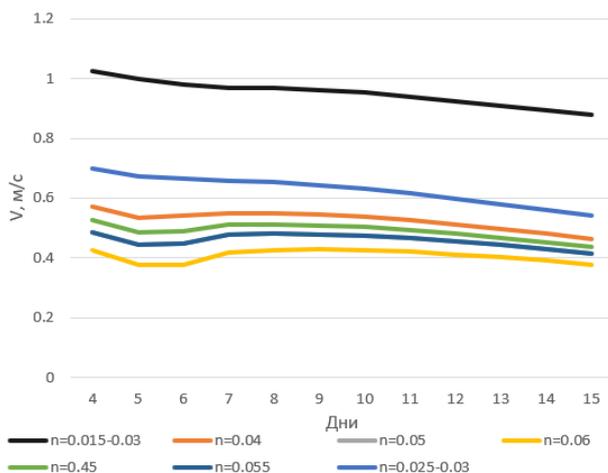


Рис. 6. Изменения скоростей на 5 створе при различном коэффициенте шероховатости.

В свою очередь были рассчитаны значения площади поперечного сечения, соответствующего каждому рассчитанному расходу. Соответственно наибольшая площадь затопления наблюдалась при коэффициенте шероховатости равном 0.07 и составила  $86 \text{ м}^2$  при начальном значении в  $11 \text{ м}^2$  (рис.7).

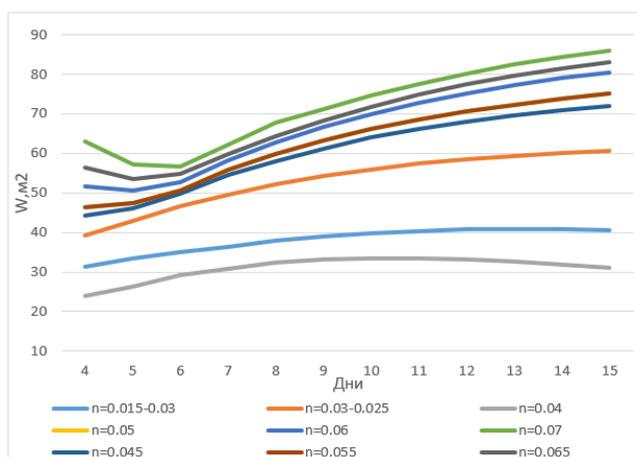


Рис. 7. Изменения площади поперечного сечения на 5 створе при различном коэффициенте шероховатости.

### Заключение

Расчет проводился по натурным данным 2013-2014 года и по оценочным данным, полученным в ходе паводка в 2017 году, по инициативе ОАО «Севкавгипроводхоз». Моделирование производилось для 2 вариантов расчета ливневых паводков с различными начальными и граничными условиями при изменении максимального расхода воды от  $12.1 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $16.9 \text{ м}^3/\text{с}$ , а также скорректированными расходами для сосредоточенного притока. В первичных расчетах коэффициент шероховатости изменялся от 0.025 до 0.03 по длине расчетного участка. Во время расчетов были получены значения расходов, при которых начинается подтопление территории. Максимальное значение расхода составило  $37.1 \text{ м}^3/\text{с}$ , в то время как пороговое значение равняется  $20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Кроме этого, в связи с тем, что коэффициент шероховатости является функционально-зависимым параметром, и отсутствовала возможность расчета обратным путем, было выполнено моделирование с подбором данного коэффициента. Минимальное значение было заключено в промежуток от 0.015 до 0.03 по длине



расчетного участка, наибольшее значение составило 0.07. Максимальная площадь затопления составила 86 м<sup>2</sup> при начальной в 11 м<sup>2</sup>. Данная информация может быть использована при проектировании защитных сооружений на территории.

### Список литературы

- Виноградова Т.А., Никифоровская В.С (2015). О математическом моделировании формирования процессов тепломассопереноса в речных и озерно-речных системах Тр. IV Всесоюз. науч. конф. Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Москва, 15-18 сент. 2015, 102-106.
- Comiti F., Marchi L., Macconi P., Arattano M., Bertoldi G., Borga M., Brardinoni F., Cavalli M., D'Agostino V., Penna D., Theule J. (2014). A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadria basin. *Nat Hazards*, 73: 1175–1198.
- Министерство сельского хозяйства РФ, департамент мелиорации. URL: [http://mcx-dm.ru/gts/3927?report=passport&current\\_id=%2093428](http://mcx-dm.ru/gts/3927?report=passport&current_id=%2093428).