

УДК 551.4.042

## ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЕВОГО ПОТОКА ПО ВИДЕОМАТЕРИАЛАМ

Д.П. Соколова<sup>1</sup>, В.А. Куровская<sup>2</sup>, А.А. Осташов<sup>1</sup>,  
Н.А. Казаков<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>ООО «Джи Динамика», г. Санкт-Петербург, Россия, <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, <sup>3</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия; <sup>4</sup>Научно-исследовательский центр "Геодинамика", г. Южно-Сахалинск, Россия

dariia.sokolova@yandex.ru

**Аннотация.** Для проектирования сооружений противоселевой защиты необходимо знать значения таких характеристик селя, как скорость потока и давление селевой массы на преграду. Определение этих характеристик часто вызывает трудности из-за того, что селя – достаточно редкое событие и постоянные наблюдения за ними ведутся на селестоковых станциях, которых во всем мире немного. В настоящее время в интернете появилось большое количество видеосъемок, на которых запечатлен сход селевого потока. Такой материал можно использовать для получения не только качественных, но и количественных характеристик селевого потока. В тех случаях, когда имеется возможность определить на видео

## EVALUATION OF DEBRIS FLOW DYNAMIC CHARACTERISTICS BY VIDEO MATERIALS

Dariia P. Sokolova<sup>1</sup>,  
Viktoriia A. Kurovskaia<sup>2</sup>,  
Andrey A. Ostashov<sup>1</sup>,  
Nikolay A. Kazakov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>G-Dynamic Ltd, Saint-Petersburg, Russia, <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, <sup>3</sup>Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, <sup>4</sup>Research Center for the Study of Geodynamic Processes "Geodynamics", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
dariia.sokolova@yandex.ru

**Abstract.** For mud dams construction it is necessary to clarify characteristics of debris flow such as flow velocity and pressure on the barrier. Determining these characteristics often causes difficulties due to the fact that debris flow is rather rare event and constant monitoring of them is carried out at mud flow observation station stations, which are few worldwide. Currently large number of videos have appeared on the Internet that captures debris

масштаб и конкретное место схода селя, определение его скорости и других характеристик составляет выполнимую задачу. В статье представлена попытка количественной оценки скорости селевого потока по материалам видеосъемки с последующим сравнением полученных результатов со значениями, рассчитанными по различным методикам. В качестве объекта нашего исследования был выбран селевой поток, сошедший в Австрии, г. Фирген 4 августа 2012 года. Съемка производилась с нескольких ракурсов, что позволило выбрать участок канала, на котором оказалось возможным произвести измерение скорости движения серии селевых волн. Расчет скорости селевого потока и давления на препятствие производился по методикам разных исследователей. Измеренные на видеоролике скорости селевых волн на разных участках составили: минимальная – 7,4 м/с, максимальная – 10 м/с. Различия между рассчитанными по разным методикам и измеренными по видео значениями составляют от 0,1 м/с до 4,8 м/с. Кроме этого, были проведены расчеты расхода селевого потока и плотности селевой массы. Нами использовалась модель транспортно-сдвигового селевого процесса, разработанная Ю.Б. Виноградовым. При сравнении полученных значений с результатами австрийских коллег было выявлено, что значения характеристик похожи, но разброс значений по данной модели меньше.

**Ключевые слова:** селевой поток; скорость селевого потока; видеосъемка селевого потока; давление селя; селевая волна; селевой расход.

flow descent. This material can be used to obtain not only qualitative, but also quantitative characteristics of the debris flow. In cases, when it is possible to determine the scale and specific location of debris flow on a video, measuring its velocity and other characteristics is a workable task. This research present an attempt to quantify the debris flow velocity based on the video materials with the subsequent comparison of the results obtained using various methods. The object of our study was the debris flow that came down in Austria, in Firgen on August 4, 2012. The survey was carried out from several angles, which made it possible to select a section of the channel to measure the velocity of debris flow wave train. Calculation of flow velocity and pressure on the barrier was conducted by several methods developed by various researchers. Debris flow velocities measured on the video are minimum – 7,4 m/s, maximum - 10 m/s. Differences between calculated by various methods and measured on the video values range from 0,1 m/s to 4,8 m/s.

**Keywords:** debris-flow; velocity of debris-flow; video material of debris-flow; pressure of debris-flow; debris-flow wave; debris-flow discharge.

## **Введение**

Один из важнейших вопросов, возникающих при изучении и моделировании селевых процессов (как при научных исследованиях, так и при проектно-исследовательских работах) – это вопрос о скорости движения селевого потока.

Данных прямых измерений скоростей селевого потока, полученных непосредственно во время его движения [Vinogradova, Vinogradov, 2017], недостаточно. Прямое измерение характеристик потока связано со многими трудностями, главная из которых заключается в том, что специалисты-селевики не часто могут вживую наблюдать данное явление.

Значения скорости селевого потока, рассчитанные по результатам полевых исследований, проведённых сразу же после схода, не позволяют получить достоверные результаты, поскольку расчётные методики базируются в большинстве своем на математических моделях, изобилующих эмпирическими коэффициентами.

Решение этой проблемы возможно лишь при использовании большого объёма натуральных наблюдений за селевыми потоками, и измерении их скорости во время движения.

## **Постановка проблемы**

Получение натуральных количественных данных о каждом селевом событии является важной и сложной задачей селеведения. Сель – достаточно редкое событие, и определить его динамические характеристики зачастую удается только по косвенным признакам.

Однако в последнее время в интернете появилось большое количество видеосъемок, на которых запечатлен сход селевых потоков. Такой материал можно использовать для получения качественных и количественных характеристик селевого потока: таких, как структурно-реологический тип, характер движения селевого потока, форма селевых волн и скорость селя на разных участках селевого русла.

Если в кадре есть объекты, которые можно использовать в качестве привязки масштаба снимка, мы можем оценивать некоторые количественные характеристики селя, а именно скорость потока, а при возможности определения площади поперечного сечения русла – расход селя.

Целью нашего исследования является попытка измерения скорости селевого потока по материалам видеосъемки и сопоставление полученных результатов с расчетными значениями по различным методикам.

### Объект исследования

Географические, геологические и гидрологические условия Восточных Альп определяют возможность образования и высокую повторяемость селевых потоков больших объёмов.

Суточные максимумы осадков могут достигать 200-250 мм [Aulitzky Н., 1989].

Количество рыхлообломочного материала в конусе выноса в результате схода катастрофических селей достигает от сотен тысяч до миллиона м<sup>3</sup> [Aulitzky, 1989]. Следует упомянуть, что поскольку заселённость Альп человеком очень велика, катастрофические сели сразу попадают в разряд национальных бедствий [Виноградов, 1980]. Первое упоминание о селевом потоке в Австрии относится к 600 году, когда сель сошел из ущелья Ланбах в долину Инна у селения Швац [Виноградов, 1980].

4 августа 2012 г. по ручью Фиршницбах сошел грязекаменный сель. В результате пострадал населенный пункт Фирген, были повреждены объекты инфраструктуры и жилые постройки. Сель был заснят на видеокамеры с нескольких ракурсов местными жителями, что позволило нам определить некоторые качественные и количественные характеристики селя.

Ручей Фиршницбах (рисунок 1) является левобережным притоком реки Изель в муниципалитете Фирген. Площадь водосбора составляет 4,1 км<sup>2</sup>, длина ручья Фиршницбах равняется 5,5 км, перепад высот от истока до устья 1955 м. Самая высокая точка водосбора – г. Миттерегшпитце с 3044 м над уровнем моря, устье р. Изель расположено на высоте 1089 м над уровнем моря [Hübl, 2012].

Водосбор бассейна располагается на территории Пеннинских Альп. Особое внимание следует уделить наличию филлитовых сланцев, которые обладают высоким содержанием глинистых частиц, способных связывать воду в грунтах (по нашему мнению, обязательное условие, необходимое для формирования связных селей), а также наличием рыхлообломочного моренного и осыпного материала в верхней части водосбора, который образует потенциальный селевой массив. Коренные породы представлены известково-сланцевыми сланцами, метабазитами и ультраосновными породами [Vinogradova, Vinogradov, 2017], которые насыщают сель крупнообломочным материалом.

Около четверти водосборной площади занято хвойным лесом, 27% площади – луговые пастбищные угодья и альпийские луга, 38% – незадернованные рыхлообломочные отложения. Остальные 10% подвержены застройке [Hübl, 2012].

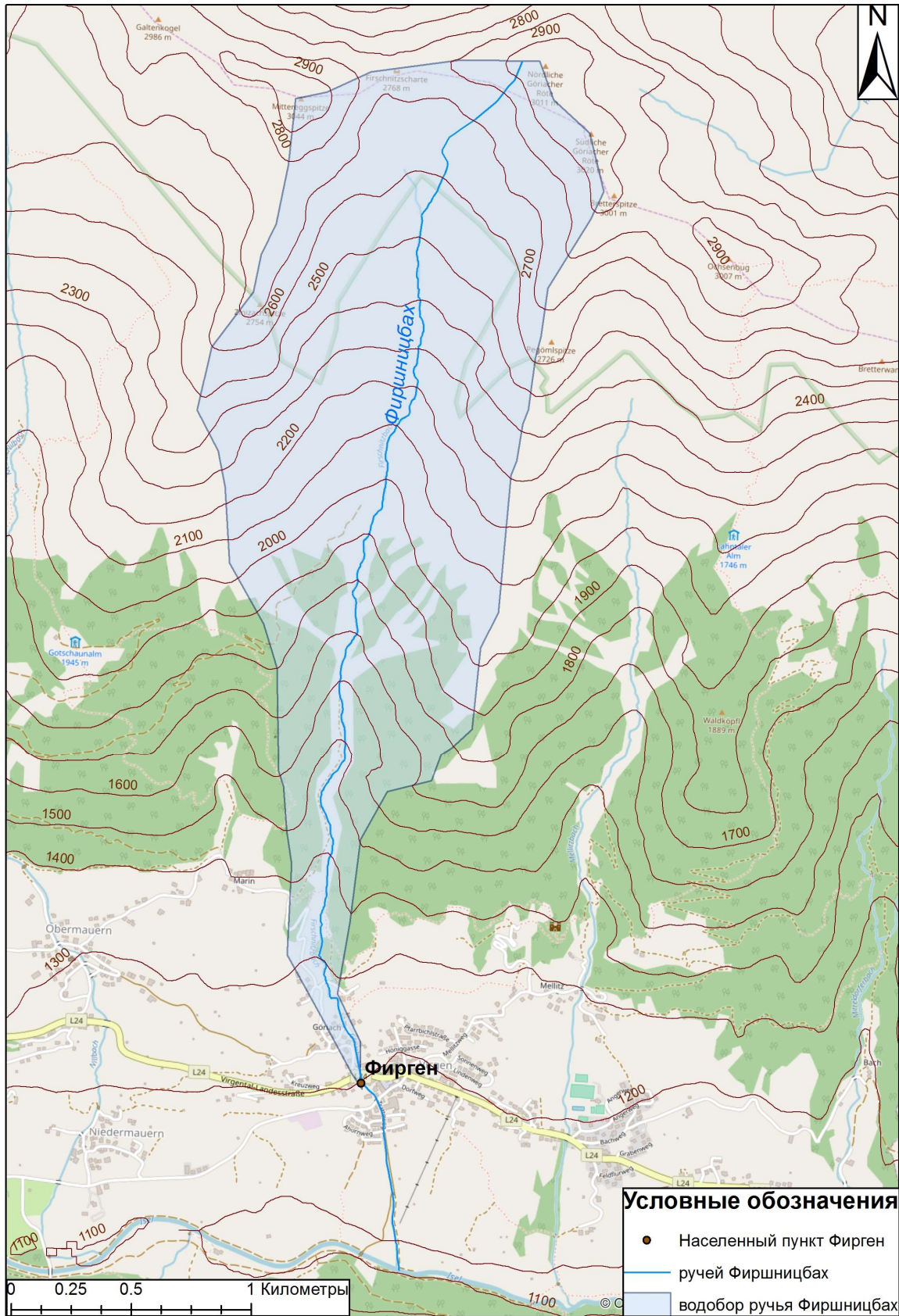
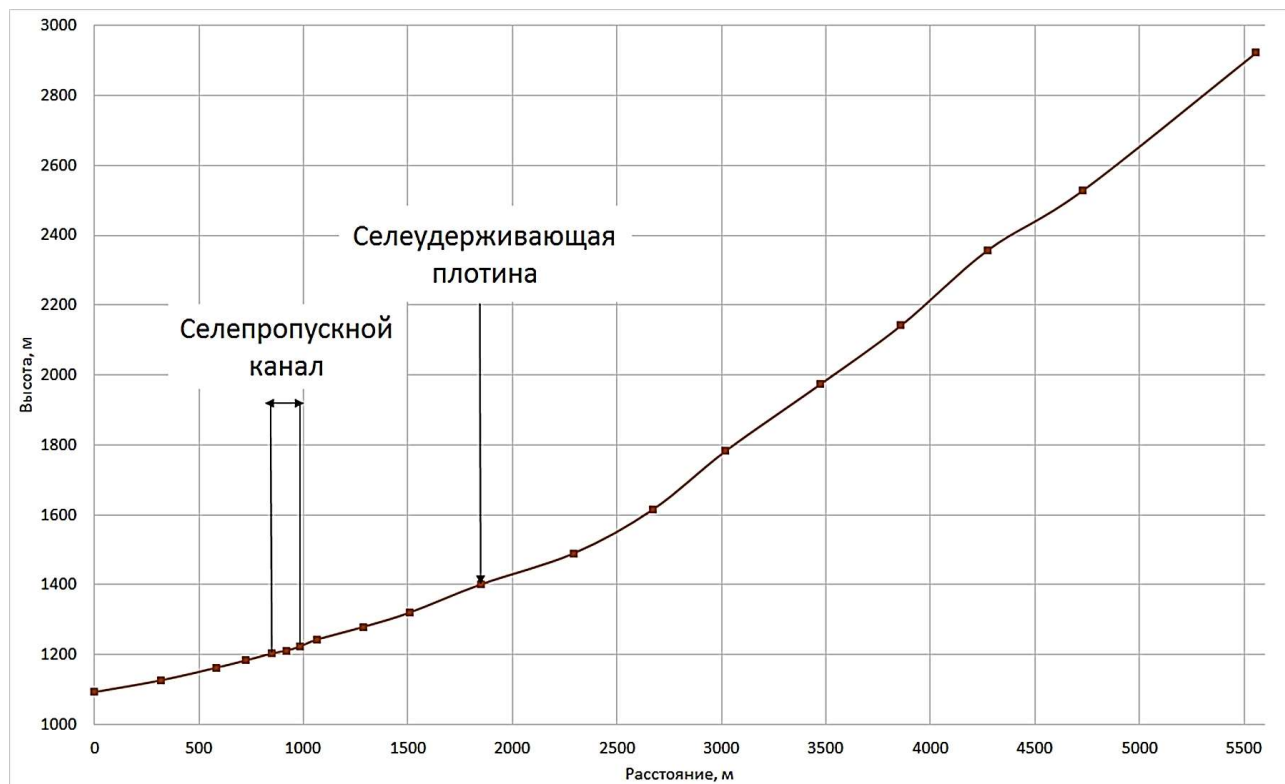


Рисунок 1. Схема бассейна ручья Фиршницбах

Figure 1. The scheme of basin Firschnitzbach river



**Рисунок 2.** Продольный профиль ручья Фиршницбах

**Figure 2.** The longitudinal profile of the Firschnitzbach stream

В водосборе ручья Фиршницбах имеется ряд противоселевых сооружений (рисунок 2). Селеудерживающая дамба располагается в 1830 м от устья и запроектирована под задержание 25000 м<sup>3</sup> селевого материала. Ниже плотины расположен селепропускной канал, рассчитанный на пропуск селевого потока расходом 60 м<sup>3</sup>/с [Hübl, 2012].

### **Грязекаменный сель, сошедший 04.08.2012 г.**

Прохождению селевого потока предшествовал сильный ливень интенсивностью 2 мм/мин. Продолжительность первого ливня – 30 минут. 4 августа 2012 г. через 15 минут после начала дождя, в 15:25 по местному времени, жители Фиргена наблюдали первую волну селевого потока. Всего за 40 минут было зарегистрировано 12 селевых волн. На момент образования первой селевой волны выпало около 30 мм осадков.

На втором этапе прохождения селевого потока в течение 50 минут возникло 27 селевых волн. На этом этапе сель также стал следствием выпадения ливня такой же интенсивности длительностью 45 минут. К моменту начала второго этапа прохождения селя, ёмкость перед селезадерживающей дамбой была переполнена, и поток шел через гребень

плотины. В общей сложности за период прохождения двух серий волн и др. было вынесено 70000 м<sup>3</sup> материала [Hübl, 2012].

Динамические характеристики данного селевого потока оказались выше проектных значений селезащитных сооружений Фиргена. Ёмкость перед селезадерживающей плотиной уже после первой серии волн заполнилась селевыми отложениями. Селепропускной канал оказался не способен пропустить максимальные расходы селевого потока, поэтому селевая масса выходила из берегов канала и разливалась по тротуарам.

### **Материалы и методы**

Видеоматериал о прохождении данного селевого потока был предоставлен Йозефом Фибигером (консультант по вопросам борьбы с эрозией, селевыми потоками, лавинами и лесного хозяйства; исследовательская группа МСНИЛО 8.03 стихийные бедствия, Зальцбург, Австрия) на 4-ой международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Иркутск – Аршан, 6-10 сентября 2016 г).

Съемка проводилась с разных точек города, где селевой поток двигался по бетонированному ступенчатому селепропускному каналу (рисунок 2).

Нами были выбраны кадры из видео, на которых представлялось возможным определить место на спутниковом снимке, где прошел селевой поток.

При определении скорости селевого потока с помощью материалов видеосъемки необходимо знать расстояние, которое он пройдет, и продолжительность его движения.

Сначала производилась привязка селепропускного канала города Фирген в программном пакете ArcGIS. Привязка осуществлялась по контрольным точкам канала на спутниковом снимке (мост, парковка, ступень на повороте) (рисунок 3).

Нами были выбраны три участка, на которых на видео отчетливо видно движение фронта селевой волны.

Первый участок, на котором было зафиксировано максимальное число волн: от парковки (2) до моста (3). Второй участок начинается от ступени на повороте канала (1) до моста (3). Третий участок: от поворота (1) до парковки (2) (рисунок 3).

Глубина потока определялась с помощью привязки масштаба снимка по объектам с известными параметрами. Например, использовались такие объекты как человек, машина и другие. В программе ArcGIS были выполнены необходимые измерения длины и ширины канала для дальнейших расчетов (таблица 1).



**Рисунок 3.** Схема участков прохождения селевого потока: 1 – ступень на повороте, 2 – ступень напротив парковки, 3 – мост.

**Figure 3.** The scheme of sections of the passage of the debrisflow: 1 – step on the turn, 2 – step in front of the parking, 3 – bridge.

**Таблица 1.** Основные параметры канала

**Table 1.** The main parameters of the channel

Участок		Ширина канала, м	Глубина канала, м	Длина ступени, м	Уклон, град.	Количество волн
N п/п	Адрес, м от устья р. Фиршницбах					
1	920-850	5,8	3,0	14,3	10,6	10
2	985-850	5,8	3,0	14,3	10,2	3
3	985-920	5,8	3,0	14,3	9,8	3

Определение скорости осуществлялось следующим способом.

В программном пакете Shortcut фиксировалось время прохождения фронта селевой волны на контрольных точках, которым соответствовали ступени в канале. Скорость рассчитывалась как расстояние, деленное на время.

Скорость селевого потока, прошедшего через г. Фирген, была рассчитана нами по различным методикам.

Для расчета использовались формулы И.И. Херхеулидзе, В.В. Голубцова, М.Ф. Срибного, Кханна, Академии ГПС МЧС России.



«Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям»<sup>1</sup> рекомендует использовать для расчета скоростей селевого потока следующие формулы:

$$v_c = 4,83h^{0,5}(\sin\alpha)^{0,25}, \quad (1)$$

где  $h$  – средняя глубина потока, м;

$\alpha$  – средний угол наклона селевого русла на участке.

Формула (1) предложена И.И. Херхеулидзе.

Для расчетов скорости селя, также используется формула М.Ф. Срибного [Срибный, 1960]:

$$v_c = \frac{6,5R^{2/3}I^{1/4}}{\sqrt{\frac{\gamma_c\gamma_T - \gamma_T}{\gamma_T - \gamma_c} + 1}}, \quad (2)$$

где  $R$  – гидравлический радиус потока в метрах,

$I$  – уклон русла,

$\gamma_T$  – плотность наносов, т/м<sup>3</sup>

$\gamma_c$  – средняя плотность селевой массы, т/м<sup>3</sup>.

Так же для определения скорости селевого потока используют формулу Кханна [Голубцов, 1969]:

$$v_c = 8,05h_{cp}^{0,58}i^{0,30}, \quad (3)$$

где  $h_{cp}$  – средняя глубина потока, м;

$i$  – продольный уклон русла на участке.

По «Учебно-методическому пособию», выпущенному Академией ГПС МЧС России<sup>2</sup>, скорость селевого потока можно определить по формуле:

$$v_c = 11,4h_{cp}^{0,5} \left( U \sin\alpha^{\frac{1}{3}} \right), \quad (4)$$

<sup>1</sup> РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям, 1990. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей. Гидрометеониздат, Москва.

<sup>2</sup> Крюков Е. В., Бутенко В. М. 2013. Опасные природные процессы: учеб.-метод. Пособие. М.: Академия ГПС МЧС России

где  $U$  – относительная гидравлическая крупность вовлекаемых в поток каменных материалов (для оперативных расчетов принимается равным 0,7...1,0 м/с); в наших расчётах принято значение 1,0 м/с.

Так же, Голубцов В.В. [Голубцов, 1969] предложил формулы для расчета скорости грязевых и грязекаменных потоков:

$$v_c = 3,75h_{cp}^{0,5}i^{0,17}, \quad (5)$$

Кроме определения скорости движения селевого потока нами был произведен расчет давления селя на препятствие по известным формулам, в которые в основном входит скорость селя и плотность селевой массы. Для расчета селевого давления были взяты следующие формулы:

Формула для расчета давления селевого потока, предложенная ГрузНИИГиМ:

$$P = \frac{K(\gamma_c v_c^2)}{g}, \quad (6)$$

где  $K = 4,5$ ,

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,

$\gamma_c$  – плотность селевой массы, кг/м<sup>3</sup> [Молжигитов, 2016].

Формула, предложенная Б.Н. Ржевским и Н.Ф. Нечаевым [Молжигитов, 2016]:

$$P = 2,15(\gamma_c v_c)^{1,33}, \quad (7)$$

Й. Холцинерем и Г. Хиублем предложены формулы расчета на основе комбинированной модели гидростатического и гидродинамического воздействия [Молжигитов, 2016]:

$$P = 5\gamma_c(v_c)^{0,8}(gh)^{0,6}, \quad (8)$$

где  $h$  – глубина потока, м.

По волновой модели гидравлического удара была предложена А.Л. Гонором и Е.Г. Пик-Пичаком следующая формула расчета:

$$P = a\gamma_c v_c c, \quad (9)$$

где  $c$  – скорость звука в среде, м/с,

$a$  – процентное содержание воздуха в водонасыщенном грунте, меняется в пределах 0-0,04 [Гонор, Пик-Пичак, 1983].

Формула, предложенная И.И. Херхеулидзе [Молжигитов, 2016]:

$$P = 3,5(1,35(\frac{v_c^2}{g})(\gamma_c^{1,5})^{0,45} \quad (10)$$

## Результаты и обсуждение

Кроме высокой насыщенности рыхлообломочным материалом, селевой поток характеризуется волновым движением [Казаков, 2001].

Механизм образования волн еще полностью не изучен, но в качестве одной из причин некоторые авторы выделяют различие в скоростях перемещения обломков разной крупности. Однако на имеющихся кадрах селевого потока наблюдаются волны, насыщенные, как глыбово-валунным материалом, так и глинистыми частицами. Также в качестве источника образования селевых волн представлялось обрушение порций грунта в селевой поток.

Однако волны образуются в течение всего времени прохождения потока, как это можно наблюдать на видео, а их динамические характеристики и частота не соответствуют волнам, образующимся при обрушении грунта. Селевая волна отличается асимметрией, крутой передней фронт создает «голову селя»<sup>3</sup>. По имеющимся видеоматериалам определить высоту «головы селя» не представлялось возможным.

Согласно В.Ф. Перову<sup>3</sup> интервал между волнами может составлять от нескольких минут до десятков секунд, увеличиваясь в конечной стадии, что и было зарегистрировано на видео. Несмотря на то, что видеоматериалы являются скомпонованными из частичных наблюдений, по нескольким волнам с непрерывной съемкой минимальный временной интервал составлял 13 секунд в начале прохождения селевого потока, ближе к концу он увеличился до 22 секунд.

В данном исследовании были получены значения скоростей движения фронта селевого потока по видеосъемке, анализировалась форма волны, а также характер движения (таблица 2).

<sup>3</sup> Перов В.Ф. Селевые явления. Терминологический словарь. М.: изд. МГУ. 1996. С. 45

Таблица 2. Результаты  
Table 2. Results

N п/п	Участок		№ селевой волны	Глубина потока, м	Время прохождения, с	Скорость, м/с	Расход, м <sup>3</sup> /с	Примечание
	Адрес, м от устья р. Фиршицбах							
1		920-850 м	1	2,7	8,4	8,1	125	наблюдается перелив через борта канала
			2	2,7	9,5	7,2	111	в начале – квазиустановившееся течение, далее появляется ступенчатый характер
			3	3,4	6,8	10,0	196	скорость фронта волны выше основного тела; перелив через борта канала
			4	2,5	8,4	8,1	116	скорость фронта волны выше основного тела; проявляется ступенчатый характер
			5	2,9	7,7	8,8	147	скорость фронта волны выше основного тела, наблюдается растекание материала вдоль русла
			6	3,0	7,3	9,3	160	скорость фронта волны выше основного тела, возможно появление пылевого облака, происходит выход селевого потока за пределы канала
			7	3,2	7,0	9,8	180	скорость фронта волны выше основного тела, растекание материала через борта, наблюдается захлестывание волны на мост
			8	3,4	7,1	9,6	188	на начальный стадии наблюдается как единое тело, отмечается ступенчатый характер, часть

N п/п	Участок		№ селевой волны	Глубина потока, м	Время прохождения, с	Скорость, м/с	Расход, м <sup>3</sup> /с	Примечание
	Адрес, м от устья р. Фиршицбах							
			9	2,5	8,0	8,5	122	материала откладывается на мосту квазиустановившееся течение, канал занесен селевыми отложениями, наблюдается растекание материала за бортами канала
			10	2,0	9,2	7,4	85	форма волны - кинк, канал занесен селевыми отложениями
			4	2,5	16,5	7,9	114	скорость фронта волны выше основного тела, проявляется ступенчатый профиль
2		985-850 м	5	2,9	15,5	8,4	141	скорость фронта волны выше основного тела, наблюдается растекание материала вдоль русла
			7	3,2	12,2	9,5	174	скорость фронта волны выше основного тела, растекание материала через борта канала, наблюдается захлестывание волны на мост
			4	2,5	8,1	7,7	111	скорость фронта волны выше основного тела, проявляется ступенчатый профиль
3		985-920 м	5	2,9	7,8	8,0	134	скорость фронта волны выше основного тела, наблюдается растекание материала вдоль русла
			7	3,2	6,8	9,2	169	скорость фронта волны выше основного тела, растекание материала через борта канала, наблюдается захлестывание волны на мост

Как известно, скорость максимума волны намного превышает значения для подошвы, где наблюдается стационарный расход, что и было зафиксировано на данном видеоматериале. Также зачастую во время прохождения селевого потока по бетонированным ступеням происходило разрушение фронта волны с последующем растеканием материала за борта канала. Кроме того, несколько раз наблюдалось захлестывание гребня волны на мост и соответственно отложение материала.

В связи с тем, что у нас отсутствуют видеоматериалы или же наблюдения за движением селевого потока на пологом бетонированном канале, однозначно утверждать о наборе энергии на ступенях, а также расплескивании материала вследствие конструкции канала не представляется возможным. Однако можно предположить, что бетонированный канал был изначально сконструирован для небольших селевых потоков, тогда данная форма сооружения увеличивала бы коэффициент шероховатости, что в свою очередь уменьшало скорость волны. Но характеристики исследуемого потока оказались выше ожидаемых, что привело к наложению волн и росту скорости 6 из 10 селевых волн. Таким образом, при определенных условиях ступени способны оказывать противоположный от задуманного эффект. Также стоит отметить, что высота заплесков на домах, непосредственно прилегающих к выбранному участку в канале, доходила до 7 метров.

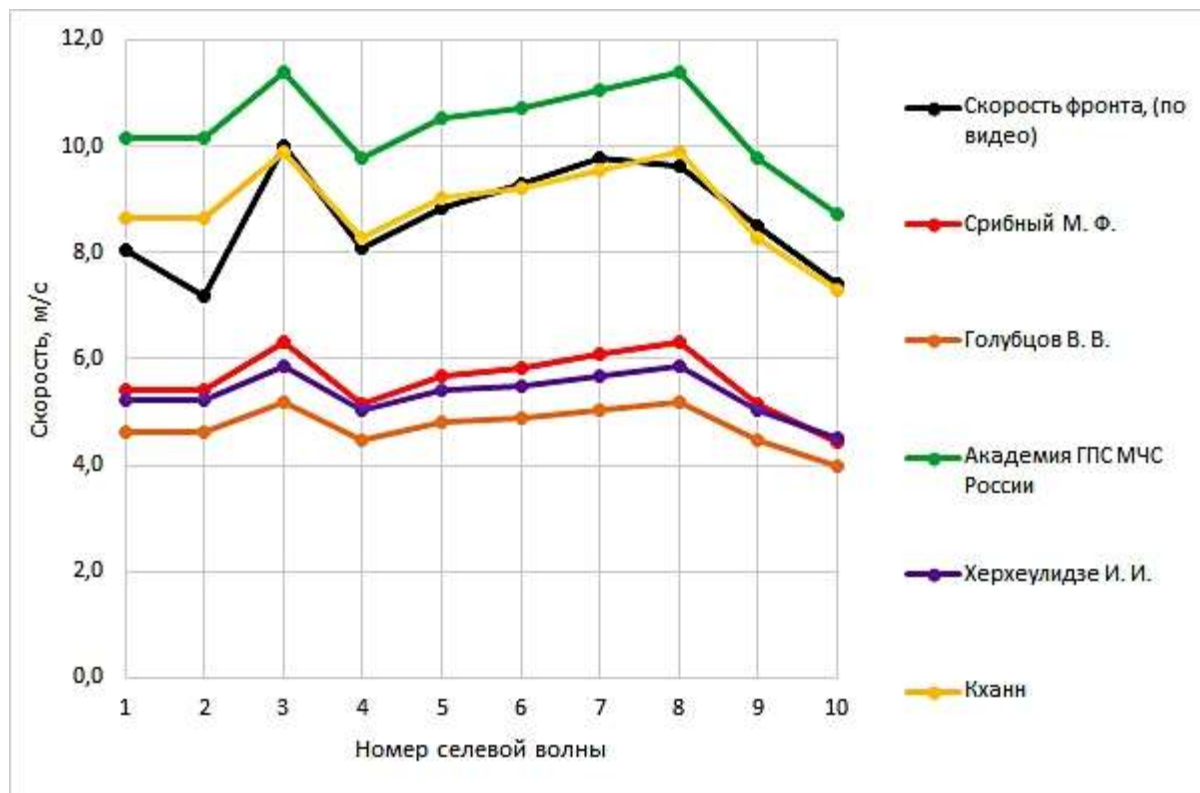
Скорости движения фронта селевых волн менялись от 7,4 м/с до 10 м/с на протяжении видеосъемки. Исходя из полученных результатов, видно, что чем больше глубина потока, тем выше скорость движения. Например, волна №3, глубиной 3,4 метра, двигалась со скоростью 10 м/с, а волна №10, глубиной 2 метра – со скоростью 7,4 м/с. Три волны (№ 4,5,7) удалось обнаружить на трёх участках. Скорости движения этих селевых волн различаются от 0,3 м/с до 0,8 м/с, что говорит о непостоянстве скорости селевого потока.

Сотрудниками Австрийского Института Горных Опасностей была определена скорость потока по видеоматериалам в створе канала (530 м от устья ручья Фиршницбах), разброс значений составил от 4 до 10 м/с [Hübl, 2012].

В таблице 3 и на рисунке 4 приведены результаты расчетов скоростей движения селевого потока по различным методикам, описанным в главе «материалы и методы».

**Таблица 3.** Скорости селевого потога, рассчитанные по различным методикам  
**Table 3.** Velocity of debris flow, calculated according to different methods

№ селевой волны	Данные		Скорость селя, м/с						
	Глубина, м	Уклон, град.	по И.И. Херхеулидзе	Академия ГПС МЧС России	по В.В. Голубцову	по М. Ф. Срибному	по Кханну	Скорость фронта (по видео)	
1	2,7	10,6	5,2	10,2	4,6	5,4	8,7	8,1	
2	2,7	10,6	5,2	10,2	4,6	5,4	8,7	7,2	
3	3,4	10,6	5,9	11,4	5,2	6,3	9,9	10,0	
4	2,5	10,6	5,0	9,8	4,5	5,2	8,3	8,1	
5	2,9	10,6	5,4	10,5	4,8	5,7	9,0	8,8	
6	3,0	10,6	5,5	10,7	4,9	5,8	9,2	9,3	
7	3,2	10,6	5,7	11,1	5,0	6,1	9,6	9,8	
8	3,4	10,6	5,9	11,4	5,2	6,3	9,9	9,6	
9	2,5	10,6	5,0	9,8	4,5	5,2	8,3	8,5	
10	2,0	10,6	4,5	8,7	4,0	4,4	7,3	7,4	
4	2,5	10,2	5,0	9,7	4,4	5,1	8,2	7,9	
5	2,9	10,2	5,4	10,4	4,8	5,6	8,9	8,4	
7	3,2	10,2	5,6	10,9	5,0	6,0	9,5	9,5	
4	2,5	9,8	4,9	9,5	4,4	5,0	8,1	7,7	
5	2,9	9,8	5,3	10,2	4,7	5,6	8,8	8,0	
7	3,2	9,8	5,6	10,8	5,0	6,0	9,3	9,2	



**Рисунок 4.** Скорости движения селевого потока

**Figure 4.** The velocity of the debris flow

Результаты расчета скоростей движения селевого потока по разным методикам показали значительный разброс значений. Все использованные формулы выведены эмпирическим путем и включают в себя в основном такие характеристики, как глубина потока и уклон русла.

Например, Херхеулидзе И.И. и Голубцов В.В. выводили формулы расчета скорости движения селевого потока, основываясь на материалах, полученных при обследовании конусов выноса селевых потоков в Грузии и Казахстане соответственно.

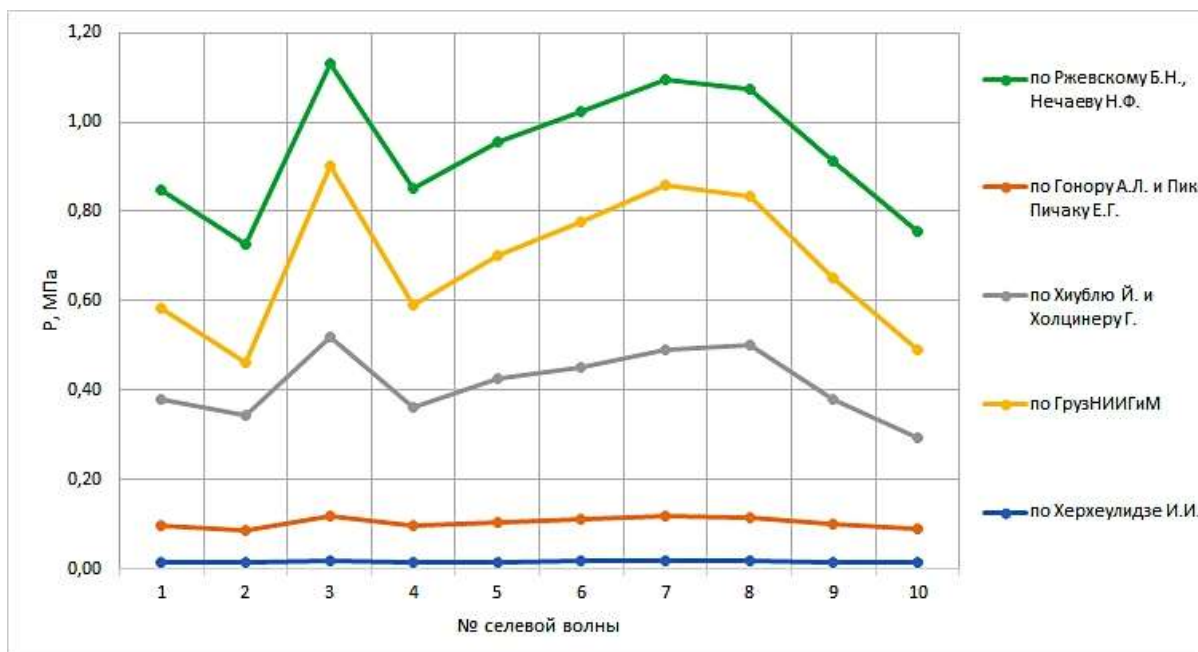
Самые высокие значения скорости селевого потока дает формула, предложенная Академией ГПС МЧС России (8,7 м/с – 11,4 м/с). Если использовать данную формулу для определения параметров защитных сооружений, то с экономической точки зрения это будет нецелесообразно.

Формулы Голубцова В.В., Херхеулидзе И.И., Срибного М.Ф. дают заниженные значения скорости селевого потока, в отличие от определенных по видео, разброс значений составляет 2,5 м/с – 4,8 м/с. Использование формул, которые занижают реальные скорости движения селевых потоков, при строительстве защитных сооружений может привести к разрушению селезащитных инженерных сооружений и затоплению территорий.



На графике хорошо видно, что значения скоростей по формуле Кханна близки к значениям, определенным при помощи видеосъёмки. Однако в связи с тем, что в свободном доступе нет информации о теоретическом описании данной методики и о принципах, на которых построена формула Кханна, проверить предположения о степени надежности значений результатов не представляется возможным.

При расчете давления селевого потока на препятствие сравнивались рассчитанные нами значения скорости селя по различным методикам. При расчёте по формуле Гонора А.Л. и Пик-Пичака Е.Г., скорость звука принималась равной 300 м/с, процентное содержание воздуха в водонасыщенном грунте – 0,02, как среднее [Молжигитов, 2016]. Приведены некоторые результаты расчета давления селя на преграду в мегапаскалях (МПа), рассчитанных по скорости, определенной по видеосъемке (рисунок 5).



**Рисунок 5.** Давление селевого потока на преграду

**Figure 5.** The impact load of mudflow on the obstacle

Расчет давления селя на препятствие по различным методикам также дает большой разброс значений – от 0,014 МПа до 1,13 МПа.

Значения, полученные по формуле Ржевского Б.Н. и Нечаева Н.Ф. колеблются от 0,72 МПа до 1,13 МПа, в то время как значения, полученные по формуле Херхеулидзе И.И., колеблются от 0,014 до 0,019 МПа. Несмотря на то, что формулы Ржевского Б.Н. и Нечаева Н.Ф., Херхеулидзе И.И. и формула ГрузНИИГиМ относятся к классу гидродинамических моделей, результаты расчета по данным формулам сильно отличаются.

Формула Гонора А.Л. и Пик-Пичака Е.Г. [Гонор, Пик-Пичак, 1983] относится к классу волновой модели воздействия селевого потока и дает низкие результаты давления по сравнению с другими методиками.

Средние в полученном диапазоне результатов значения нагрузки селя на преграду дала формула Хюбля Й. и Холцинера Г., принадлежащая к классу комбинированной модели гидростатического и гидродинамического воздействия.

Эмпирические коэффициенты использованных формул были выведены лабораторным путем. Кроме этого, в них в основном используются такие характеристики, как плотность селевой массы и скорость потока. По нашему мнению, данные методики не отражают реального давления селевого потока на препятствие. Таким образом, возникает проблема, какую формулу лучше использовать для проектирования селезащитного сооружения.

### **Заключение**

Материалы видеосъёмки грязекаменного селя, сошедшего 4.08.2012 г. по ручью Фиршницбах, позволили:

- измерить скорость потока, которая на разных участках селепропускного канала составляла от 7,2 м/с до 10,0 м/с;
- выделить 10 чётко выраженных селевых волн;
- определить характер движения волн;
- у большинства селевых волн скорость фронта оказывалась выше значений данной характеристики для основного тела волны, наблюдалось растекание селевой массы вдоль бортов бетонированного селепропускного канала;
- у 6 из 10 волн был зафиксирован рост скорости при движении вниз по ступеням канала, однако для получения однозначных выводов о приращении скорости потока вследствие ступенчатой конструкции канала при определенных характеристиках данного явления необходимы дальнейшие исследования.

Анализ имеющихся формул для расчета скорости селевого потока и давления селевой массы на препятствие показал, что самые большие значения скоростей получаются при расчёте по методике, предложенной Академией ГПС МЧС России, при этом разница со скоростями по видео составляла от 0,2 до 3,0 м/с. Расчёт по формулам Голубцова В.В., Херхеулидзе И.И. и Срибного М.Ф. даёт значения скорости селевого потока ниже измеренных

по материалам видеосъёмки. При этом необходимо отметить, что значения скорости, рассчитанные по указанным выше формулам, дают близкие между собой результаты.

Наиболее близкие к значениям скорости по видеосъёмке были получены при расчёте по формуле Кханна. Но данная формула включает в себя числовые коэффициенты и две характеристики потока, что и в формулах, упомянутых выше.

Таким образом, полученные результаты по скоростям с одной стороны могут, как уменьшать значения скорости селевого потока (формулы Голубцова В.В., Херхеулидзе И.И., Срибного М.Ф.), так и завышать их (формула Академии ГПС МЧС России). В случае занижения результатов возникает риск разрушения объектов и сооружений, а в случае преувеличения – возникают неоправданные экономические затраты на организацию противоселевой защиты.

Поскольку в методиках расчета давления селя на препятствие используются эмпирические коэффициенты (как и в методиках расчета скорости селя), получение надежных результатов не представляется возможным. Разница в значениях давления селя, полученных при расчёте по различным методикам, колеблется от 0,014 МПа до 1,13 МПа. Наибольшие значения давления были рассчитаны по Ржевскому Б.Н. и Нечаеву Н.Ф. и находятся в промежутке от 0,72 МПа до 1,13 МПа. Результаты, полученные по Гонору А.Л. и Пик-Пичаку Е.Г. и Херхеулидзе И.И. близки между собой.

Измерение реальных значений скорости селевых потоков по материалам видеосъёмки, размещённых в Интернете, позволяет получить массовый и статистически значимый материал о значениях скорости, волновой динамике и характере движения селевого потока, необходимых для создания физических и математических моделей селя, основанных на реальных значениях его характеристик. Такие модели, в свою очередь, позволят разрабатывать методики расчёта динамических характеристик потока для применения при проектно-изыскательских работах.

## Литература

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 144 с.

## References

Aulitzky H. The debris flows of Austria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology (Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur)*, 1989, vol. 40, iss. 1, pp. 5-13.  
DOI: [10.1007/BF02590338](https://doi.org/10.1007/BF02590338)

Голубцов В.В. О гидравлическом сопротивлении и формуле для расчета средней скорости течения горных рек // Труды КазНИГМИ. 1969. Вып. 33. С. 30-41.

Гонор А.Л., Пик-Пичак Е.Г. Численное моделирование удара снежной лавины по твердой стенке // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1983. № 6. С. 86–91.

Казakov Н.А. Волновая динамика селей // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Гео-криология. 2001. № 2. С. 158-164.

Молжигитов С.К. Оценка ударной нагрузки селевого потока на поперечную жесткую преграду // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 3 (часть 1). С. 16-20.

Срибный М.Ф. Формула средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движению // Исследования и комплексное использование водных ресурсов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 204-220.

Aulitzky H. The debris flows of Austria // Bulletin of the International

Golubtsov V.V. O gidravlicheskom soprotivlenii i formule dlya rascheta srednei skorosti techeniya gornykh rek [About the hydraulic resistance and a formula for calculation of average speed of a current of the mountain rivers]. *Trudy Kazakhskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Transactions of the Kazakh Regional Hydrometeorological Research Institute]*, 1969, no. 33, pp. 30-41. (in Russian).

Gonor A.L., Pik-Pichak E.G. Chislennoe modelirovanie udara snezhnoi laviny po tverdoi stenke [Numerical modeling of snow avalanche impact on a solid wall]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza [News of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of fluid and gas]*, 1983, no. 6, pp. 86–91. (in Russian).

Hübl J. Event documentation, Volume 3: Annual review of events. *IAN Report 150*. Vienna, February 2013, 88 p. (in German).

Kazakov N.A. Volnovaya dinamika selei [Wave dynamics of debris flows]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology]*, 2001, no 2, pp. 158-164. (in Russian).

Molzhigitov S.K. Otsenka udarnoi nagruzki selevogo potoka na poperechnuyu zhestkuyu pregradu [Estimation of the impact load of the mudflow on the transverse rigid barrier] *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [International journal of applied and fundamental research]*, 2016, no. 3 (part 1), pp. 16-20. (in Russian; abstract in English).

Sribnyi M.F. Formula srednei skorosti techeniya rek i ikh gidravlicheskaya klassifikatsiya po soprotivleniyu

- Association of Engineering Geology (Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur). 1989. Volume 40. Issue 1. P. 5–13. DOI: [10.1007/BF02590338](https://doi.org/10.1007/BF02590338)
- Hübl J. Ereignisdokumentation, Band 3: Jahresrückblick der Ereignisse. IAN Report 150. Wien, Februar 2013, 88 p.
- Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 88. Suppl. 1. PP. 189-198. DOI: [10.1007/s11069-017-2853-z](https://doi.org/10.1007/s11069-017-2853-z)
- dvizheniyu [Formula of the average flow velocity of rivers and their hydraulic classification by resistance to the movement] *Issledovaniya i kompleksnoe ispol'zovanie vodnykh resursov [Researches and complex use of water resources]*. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Science, 1960, pp. 204-220. (in Russian).
- Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 144 p. (in Russian).
- Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y., 2017. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin. *Natural Hazards*, Vol. 88, No. 1, pp. 189-198. DOI: [10.1007/s11069-017-2853-z](https://doi.org/10.1007/s11069-017-2853-z)