

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND
EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 624.131.544: 551.311.2: 627.141.1

DOI: 10.34753/HS.2019.1.4.490

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЕЛЕЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ
THE STUDY OF THE DEBRIS-FLOWS DYNAMICS ON AN EXPERIMENTAL STAND

Н.А. Казаков, Д.А. Боброва,
Е.Н. Казакова, С.В. Рыбальченко

Nikolay A. Kazakov, Darya A. Bobrova,
Ekaterina N. Kazakova,
Svetlana V. Rybal'chenko

*ФГБУН Специальное конструкторское бюро
средств автоматизации морских исследований
ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;*

*НИЦ «Геодинамика»,
г. Южно-Сахалинск, Россия*

*Special Research Bureau for Automation
of Marine Researches of the Far Eastern
Branch of Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
Research Center «Geodinamics», Yu-
zhno-Sakhalinsk, Russia*

cdsmd@yandex.ru

cdsmd@yandex.ru

Аннотация. Разработан и изготовлен стенд для исследования динамических характеристик селей и физического моделирования селей. Стенд представляет собой прямоугольный в поперечном сечении лоток длиной 3,0 м, шириной 0,25 м, глубиной 0,25 м. Уклоны лотка изменяются от 10° до 45°. Выше лотка устанавливается ёмкость, заполняемая водой или приготовленной селевой смесью. Для наблюдения за внутренней структурой селевого потока обе стенки селевого лотка выпол-

Abstract. Designed and manufactured a test stand for the dynamic characteristics of debris-flows and for physical modeling of debris-flows. The stand is a rectangular cross-section tray with a length of 3.0 m, a width of 0.25 m, a depth of 0.25 m. The slopes of the tray vary from 10° to 45°. Rods are installed in the tray to accommodate load cells for measuring pressure, speed and temperature. The process of moving the debris-flow

нены прозрачными. В лотке могут быть установлены металлические штанги для размещения тензодатчиков для измерения давления, скорости и температуры. Процесс движения селя через прозрачную стенку селевого лотка снимается скоростной видеокамерой. В ноябре 2019 г. был проведён эксперимент по измерению скорости селя. Измерялись скорость и скоростной напор водного потока и искусственного грязекаменного селя. Лоток был установлен с уклоном 12° . По лотку был пущен водный поток (для измерения скорости потока и величины скоростного напора, которые затем использовались как эталонные значения). Затем по лотку был пущен поток из подготовленной селевой смеси. Селевая смесь была приготовлена из дресвяно-щебенистого элювиально-делювиального грунта возрастом Q_{IV} с суглинистым заполнителем (лёгкий и средний суглинок, до 30%) плотностью в естественном залегании 2210 кг/м^3 . Плотность суглинка – 1910 кг/м^3 . Дресва и щебень представлены алевролитом средней прочности плотностью 2210 кг/м^3 . Измеренная по методу Стокса динамическая вязкость селевой массы составила $0,0498$ Пуаз. Рассчитанная кинематическая вязкость селевой массы составила $0,0928$ Стокс. Поскольку данных о скорости селей, измеренных непосредственно во время его движения, недостаточно, особую важность приобретают методы расчёта скорости селя по его следам, определённые при полевых исследованиях после схода селя. Одной из таких методик является методика

through the transparent wall of the debris-flow tray is filmed by a high-speed video camera. During the experiment, the velocity and high-velocity pressure of water flow and artificial debris-flow were measured. The tray was installed with a slope of 12° . Water flow was started up on the tray (to measure the flow rate and the value of the velocity head, which were then used as reference values). Then the tray was put into the flow of the prepared debris-flow mixture. The debris-flow mixture was prepared from a dredged-crushed proluvial-deluvial deposits of Holocene age with a loamy aggregate with a density of 2210 kg/m^3 . The density of the prepared debris-flow mixture was 1756 kg/m^3 . Dynamic viscosity of the debris-flow mass measured by the Stokes method was 0.0498 Poise, kinematic viscosity of the debris-flow mass was 0.0928 Stokes. Data on the debris-flow velocity measured directly during its movement of the debris-flow is not enough. Therefore, methods for calculating the speed of a debris-flow slide in its are important. One of these methods is the method of calculating the debris-flow velocity by the magnitude of the speed head (on the traces of the debris-flow on the trunks of trees). That method is based

определения скорости селя по величине скоростного напора: по следам селя (обмазкам) на стволах деревьев и т.д. Эта методика основана на формуле Э. Торричелли. Результаты эксперимента показали: скорость грязекаменного селя, рассчитанная по величине скоростного напора, оказалась ниже измеренной скорости до препятствия и выше измеренной скорости после препятствия. Измеренная скорость прохождения селем всего лотка оказалась близка к рассчитанной.

Ключевые слова: потенциальный селевой массив; связный сель; селевой процесс; скорость селя; селевой лоток; селевые отложения; гидродинамический напор.

on the formula of E. Torricelli. The results of the experiment showed that the measured debris-flow velocity, calculated from the magnitude of the velocity head, was lower than the measured velocity before the obstacle and higher than the measured velocity after the obstacle. The measured velocity of the debris-flow passage of the entire tray was close to the calculated one.

Keywords: coherent debris-flow; debris-flow; debris-flow process; debris-flow velocity; debris-flow tray; debris-flow deposits; a hydrodynamic pressure.

Введение

Один из важнейших вопросов, возникающих при исследовании и моделировании селевых процессов (как при научных исследованиях, так и при проектно-исследовательских работах) – это вопрос о скорости селя, поскольку большинство динамических характеристик селя так или иначе зависят от его скорости. Данных прямых измерений скорости селя, полученных непосредственно во время его движения, недостаточно. Прямое измерение этой характеристики селя связано со многими трудностями, главная из которых заключается в том, что специалисты-селевики не часто могут наблюдать сель во время его движения.

Скорости селей, рассчитанные по результатам полевых исследований, проведённых сразу же после схода селя, не позволяют получить достоверных значений, поскольку расчётные методики базируются в большинстве своём на математических моделях, изобилующих эмпирическими коэффициентами.

По этим причинам результаты расчёта скорости селя на разных участках селевого русла, выполненные по разным методикам, показывают сильный разброс значений, что связано с несовершенством физических и математических моделей селя [Казаков и др., 2015].

Наиболее близкие к реальным расчетные значения скоростей селя были получены по измеренной величине скоростного напора, однако и в этом случае остаётся нерешённым вопрос о физической сущности входящих в методику расчёта эмпирических коэффициентов.

Не решён вопрос о зависимости скорости селя от плотности и вязкости селевой массы.

Также нерешённым остаётся вопрос о закономерностях формирования селевых отложений и, соответственно, о зависимости их структуры и стратификации от скорости селя, плотности и вязкости селевой массы.

Ответы на эти вопросы можно получить лишь при использовании большого объёма натуральных наблюдений за селями и измерениях их скорости во время движения.

Эксперименты на натуральных полигонах (таких как эксперименты на Чемолганском врезе [Виноградов, 1976; Виноградов, 1980; Степанов, Степанова, 1991; Vinogradova, Vinogradov, 2017]) позволяют получить исключительно ценный материал о динамике реальных селей, однако весьма трудоёмки и дороги.

Несмотря на то, что исследование динамических характеристик селей на стендах (в лабораторных селевых лотках) имеет ряд ограничений (связанных с малой длиной лотков, малыми объёмами селей, искусственной шероховатостью днища и т.д.), такие исследования всё же позволяют получить экспериментальные данные, пригодные для физического моделирования селей.

За рубежом такие исследования проводятся уже давно [Wei et al., 2012], однако в России лабораторные стенды для исследования динамики селей не применяются.

Схема экспериментальной установки

В 2019 г. в ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск) был разработан и изготовлен стенд для экспериментальных исследований динамики селей.

Стенд представляет собой прямоугольный в поперечном сечении лоток (рисунок 1, 2) длиной 3,0 м, шириной 0,25 м, глубиной 0,25 м. Уклоны лотка изменяются от 10° до 45° . Выше лотка устанавливается ёмкость, заполняемая водой или приготовленной селевой смесью. Начальный расход воды регистрируется. Попуск воды приводит к формированию в лотке селя.

Для наблюдения за внутренней структурой селевого потока обе стенки селевого лотка выполнены прозрачными.

Для наблюдения за процессом формирования селевых отложений ниже селевого лотка устанавливается селеприёмник.

В лотке могут быть установлены металлические штанги для размещения датчиков для измерения давления, скорости и температуры.

Процесс движения селя через прозрачную стенку селевого лотка снимается скоростной видеокамерой.



Рисунок 1. Стенд для экспериментальных исследований динамики селей:

1 – селевой лоток с прозрачной стенкой; 2 – ёмкость для воды и селевой смеси;

3 – селеприёмник; 4 – штанга для установки измерительных датчиков

Figure 1. Stand for experimental studies of the debris-flows dynamics:

1 – debris-flow tray with a transparent wall; 2 – a container for water and debris-flow mixture;

3 – a container for debris-flow deposits; 4 – rod for installation of measuring sensors



Рисунок 2. Стенд для экспериментальных исследований динамики селей

Figure 2. Stand for experimental studies of the debris-flows dynamics

Методика эксперимента

Цель экспериментальных исследований селевых процессов:

1. Определение зависимости динамических характеристик селя от физико-механических свойств селеформирующих грунтов (плотности, влажности, пористости, вязкости, гранулометрического состава, минерального и петрографического состава).
2. Измерение скорости селя на разных участках селевого лотка и по глубине потока; измерение давления на разных участках русла и на разных глубинах потока; измерение температуры на разных глубинах потока и на разных участках селевого лотка; измерение величины скоростного напора; определение количества, высоты и периода селевых волн и их зависимости от физико-механических характеристик селевой смеси; измерение селевых расходов.

3. Определение зависимости характеристик селевых отложений (стратификации, сортированности, строения толщи селевых отложений) от физико-механических свойств селевой смеси и динамических характеристик селя.

В ноябре 2019 г. нами был проведён эксперимент по измерению скорости селя на экспериментальном стенде (селевом лотке, рисунок 3, 4).

В эксперименте измерялись скорость и скоростной напор водного потока и искусственного грязекаменного селя.

Лоток был установлен с уклоном 12° .

При проведении эксперимента первоначально по лотку был пущен водный поток (для измерения скорости потока и величины скоростного напора, которые затем использовались как эталонные значения). Затем по лотку был пущен поток из подготовленной селевой смеси.

Селевая смесь была приготовлена из дресвяно-щебенистого элювиально-делювиального грунта возрастом Q_{IV} с суглинистым заполнителем (лёгкий и средний суглинок до 30%) плотностью в естественном залегании 2210 кг/м^3 . Плотность суглинка – 1910 кг/м^3 . Дресва и щебень представлены алевролитом средней прочности плотностью в естественном залегании 2210 кг/м^3 . Гранулометрический состав исходных грунтов показан в таблице 1. Плотность подготовленной селевой смеси составила 1756 кг/м^3 .

В лотке была установлена штанга, по которой измерялась высота скоростного напора.



Рисунок 3. Движение водного потока по селевому лотку

Figure 3. Movement of water flow along the target tray



Рисунок 4. Движение водного (1) и селевого (2) потока по селевому лотку

Figure 4. Movement of water flow (1) and debris-flow (2) along the target tray

Таблица 1. Гранулометрический состав грунтов для подготовки селевой смеси

Table 1. Granulometric composition of soils for the preparation of debris-flow mixture

Наименование горной породы Name of rock	Геологический возраст и генезис Geological age and Genesis	Гранулометрический состав в %; размер частиц, мм Granulometric composition %; particle size, mm									
		Щебень Crushed	Дресва Gravel		Песок Sand				Содержание пылеватых частиц Content of dusty particles		
			>10	10-5	5-2	2-05	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005
Дресвяно-щебенистый грунт с суглинистым заполнителем до 45%, средней плотности, влажный Dry-crushed soil with loamy aggregate up to 45%, medium density, wet	<i>pdQ_{IV}</i>	65,0	7,7	4,8	5,5	17,0	0,19	0,25	0,69	0,25	0,38

Результаты и их обсуждение

Поскольку данных о скорости селей, измеренных непосредственно во время его движения недостаточно, особую важность приобретают методы расчёта скорости селя по его следам, определённые при полевых исследованиях после схода селя.

Одной из таких методик является методика определения скорости селя по величине скоростного напора: по следам селя (обмазкам) на стволах деревьев и т.д.¹:

$$U = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\alpha}}, \quad (1)$$

где Δh – разность между отметками следов уровня (обмазки) в лобовой и тыловой части дерева (скоростной напор), м;

α – коэффициент, зависящий от свойств селевой массы (в среднем равняется 0,55).

Считается, что данная методика позволяет с приемлемой точностью восстанавливать значения скорости селя при полевых исследованиях.

Эта методика основана на формуле Э. Торричелли², связывающей скорость истечения идеальной жидкости из малого отверстия в открытом сосуде с высотой жидкости над отверстием:

$$U = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Однако проблематичным остаётся определение коэффициента α ³, зависящего от свойств селевой массы. Ответа на вопрос, от каких именно свойств селевой массы зависит значение коэффициент α , РД 52.30.238-90 не даёт.

Очевидно, что скорость селя должна быть связана с его вязкостью, однако полевых и экспериментальных данных недостаточно.

Теоретического обоснования выбора значения коэффициента α в том или ином случае, к сожалению, в литературе нет.

В ходе эксперимента, проведенного авторами в ноябре 2019 года, была в том числе измерена динамическая вязкость селевой массы по методу Стокса⁴. Данная характеристика получилась равной 0,0498 Пуаз.

Рассчитанная кинематическая вязкость селевой массы⁵ составила 0,0928 Стокс (таблица 2):

¹ Руководящий документ РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Выпуск 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеиздат, 1990. 200 с.

² Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.

³ Руководящий документ РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Выпуск 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеиздат, 1990. 200 с.

⁴ Определение вязкости жидкости методом Стокса: методические указания / сост.: С.С. Никулин, А.С. Чех. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. 12 с.

⁵ Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.

$$v = \mu/\rho, \quad (3)$$

где v – кинематическая вязкость;
 μ – динамическая вязкость;
 ρ – плотность.

Скорость водного потока рассчитывалась по формуле (2).

Результаты эксперимента (таблица 2) оказались неоднозначны. Отмечается разброс полученных значений.

Измеренная скорость водного потока и его скорость, рассчитанная по величине скоростного напора, не совпадают: рассчитанная скорость превысила измеренную скорость до препятствия (штанги) и близка к измеренной скорости после препятствия. Скорость потока, измеренная от начала до конца лотка, в двух случаях оказалась ниже рассчитанной, в одном – близка к ней.

Скорость селя, рассчитанная по величине скоростного напора, оказалась ниже измеренной скорости грязекаменного селя до препятствия (штанги) и выше измеренной скорости после препятствия. Измеренная скорость прохождения селем всего лотка оказалась близка к расчетной.

Однако делать по результатам одного эксперимента далеко идущие выводы о динамике связных селевых смесей и допустимости или не допустимости рассчитывать скорости прошедших селей по величине скоростного напора преждевременно: необходимо проведение массовых экспериментов при разных уклонах селевого лотка и разных физико-механических характеристиках селевых смесей.

Выводы

1. Стенд для экспериментальных исследований динамики селей при всей простоте его конструкции позволяет проводить эксперименты по физическому моделированию селей.
2. Эксперименты на селевых стендах являются важным дополнением к натурным наблюдениям и позволяют выполнять физическое моделирование селей: в частности, исследовать условия возникновения селевых волн.

Таблица 2. Условия и результаты эксперимента по измерению скорости грязекаменного селя
 Table 2. Conditions and results of the experiment on measuring the debris-flow velocity.

Суб-станция Sub-stance	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Температура, °С Temperature, °C	Вязкость Viscosity		Уклон лотка, град. Angle of inclination grad.	Глубина потока, м Depth of flow, m	Время движения, с Time of movement, s		Расстояние, м Distance, m		Скорость, м/с Velocity, m/s			Скоростной напор, м Speed head, m			Скорость по величине скоростного напора, м/с Velocity in terms of speed head, m/s
			Динамическая, Н*с/м ² (Пуаз) Dynamic, N*s/m ² (Poise)	Кинематическая, см ² /с (Стокс) Kinematic, cm ² /s (Stokes)			до штанги up to rod	полное full	до штанги up to rod	полное full	до штанги up to rod	от штанги до конца лотка from the rod to the end of the tray	средняя average	уровень в лобовой части штанги Level in the front of the bar	уровень в тыловой части штанги Level in the rear part of the rod	Разница уровней Difference of levels	
Вода Water	968	14,6	0,0117	0,0124	12	0,05	1,1	2,00	1,20	2,70	1,09	1,67	1,35	0,15	0,01	0,14	1,65
	968	14,7	0,0117	0,0124	12	0,05	0,9	1,9	1,20	2,70	1,33	1,50	1,42	0,15	0,01	0,14	1,65
	968	14,8	0,0117	0,0124	12	0,05	0,9	1,8	1,20	2,70	1,33	1,67	1,50	0,12	0,01	0,11	1,46
Сель Debris-flow	1756	9,8	0,2346	0,1336	12	0,02	1,7	5,2	1,20	2,70	0,71	0,43	0,52	0,02	0,01	0,01	0,53

Благодарности

Авторы выражают благодарность Г.П. Марченко, под руководством которого и при непосредственном участии был изготовлен стенд для экспериментальных исследований динамики селей.

Литература

Виноградов Ю.Б. Искусственное воспроизведение селевых потоков на экспериментальном полигоне в бассейне р. Чемолган // Селевые потоки: сборник. М.: Гидрометеиздат, 1976. С. 3-7.

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

Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Боброва Д.А., Окопный В.И., Казакова Е.Н., Рыбальченко С.В. Условия формирования связанных селей при слабых осадках и распределение динамических характеристик в селевом потоке // Геориск. 2015. № 4. С. 12-16.

Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей: эксперимент, теория, методы расчета. М.: Гидрометеиздат, 1991. 379 с.

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Yu. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin. Natural Hazards. 2017.

References

Kazakov N.A., Gensiorovskij Y.V., Bobrova D.A., Kazakova E.N., Okopnyj V.I., Rybal'chenko S.V. Usloviya formirovaniya svyaznykh selei pri slabykh osadkakh i raspredelenie dinamicheskikh kharakteristik v selevom potoke [Conditions of formation of cohesive debris flows in low precipitation and the distribution of the dynamic characteristics in debris-flow channel]. *Georisk [Georisk]*, 2015, no. 4, pp. 12-16, 56. (In Russian; abstract in English).

Stepanov B.S., Stepanova T.S. *Mekhanika selei: eksperiment, teoriya, metody rascheta [Mudflow mechanics: experiment, theory, calculation methods]*. Moscow, Publ. Hidrometeoizdat, 1991. 379 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B. Iskusstvennoe vosproizvedenie selevykh potokov na eksperimental'nom poligone v basseine r. Chemolgan [Artificial reproduction of mudflows at an experimental training ground in the Chemolgan River Basin] In: *Selevye potoki: sbornik [Mudflows: collection]*. Moscow, Publ. Hidrometeoizdat, 1976, pp. 3-7. (In Russian).

Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Hidrometeoizdat Publ., 1980. 144 p. (in Russian).

Vol. 88. Iss. 1. Supplement. P. 189-198.
DOI: [10.1007/s11069-017-2853-z](https://doi.org/10.1007/s11069-017-2853-z)

Wei F., Yang H., Hu K., Hong Y., Li X.
Two methods for measuring internal velocity of debris flows in laboratory // WIT Transactions on Engineering Sciences. 2012. Vol 73. P. 61-71. DOI: [10.2495/DEB120061](https://doi.org/10.2495/DEB120061)

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Yu. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin. *Natural Hazards*, 2017, vol. 88, iss. 1. Supplement, pp. 189-198. DOI: [10.1007/s11069-017-2853-z](https://doi.org/10.1007/s11069-017-2853-z)

Wei F., Yang H., Hu K., Hong Y., Li X. Two methods for measuring internal velocity of debris flows in laboratory. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2012, vol 73, pp. 61-71. DOI: [10.2495/DEB120061](https://doi.org/10.2495/DEB120061)