

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АНТРОПОГЕННЫХ СЕЛЕЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА
ОТВАЛАХ КАРЬЕРА ЛИСТВЕННИЧНЫЙ (О. САХАЛИН)***Л.Е. Музыченко, В.А. Лобкина, А.А. Музыченко**ФБГУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал, ул. Горького 25,
г. Южно-Сахалинск, 693023; e-mail: allixev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 2 июня 2022 г.

В работе рассмотрена активизация селевой деятельности на отвалах карьера Лиственничный в районе г. Южно-Сахалинск. За период с мая по ноябрь 2020 г. при полевых наблюдениях было зарегистрировано 8 случаев формирования антропогенных грязекаменных селей после выпадения жидких осадков. Впервые на о. Сахалин наблюдение сходов селей проводилось с видеофиксацией. Определение параметров селей велось непосредственно во время их схода. Для 6 селевых потоков во время наблюдений были получены скорости движения, значения которых далее сравнивались с данными расчетов, выполненных по различным методикам. Также были рассчитаны величины давления наблюдаемых селей. Полученные значения находятся в интервале 0.0044–0.0089 МПа. Были сопоставлены различные методики, позволяющие оценить воздействие селей на объект, исходя из величины давления, оказываемого на него. Определена сумма осадков, способная привести к сходу антропогенных селей.

Ключевые слова: антропогенные сели, скорость селя, давление селя, о. Сахалин.**ВВЕДЕНИЕ**

Образование антропогенных селей – явление, распространенное во множестве стран мира [20, 22, 23, 29, 32, 33], включая Российскую Федерацию [4, 13, 17, 18, 26]. Территория о. Сахалин также подвержена проявлению селевых процессов как природного, так и антропогенного происхождения. Основной причиной формирования селей является обводнение грунтов в результате снеготаяния и/или выпадения жидких осадков. Для природных селей на о. Сахалин селеобразующая сумма осадков превышает 50 мм при интенсивности 30–50 мм/сутки. В случае же предшествующего увлажнения грунтов образование селей возможно при интенсивности 10–20 мм/сутки [2]. Формирование антропогенных селей, вызванное выпадением жидких осадков, отмечалось в Холмском (2010 [11], 2012 [31]), Анивском (2015, по данным СФ ДВГИ ДВО РАН), Корсаковском (2019, по данным СФ ДВГИ ДВО РАН), Макаровском (2004, по данным СФ ДВГИ ДВО РАН; 2007 [5], 2009 [3]) районах о. Сахалин и на территории ГО «Южно-Сахалинский» (2009, 2013, по данным СФ ДВГИ ДВО РАН). Вероятно, случаев формирования антропогенных селей больше, но, т.к. территория о. Сахалин не является густонаселенной (плотность населения 6.06 чел/км² по состо-

янию на 2021 г. [16]), фиксируются только наиболее крупные сели, а также потоки, сформировавшиеся на урбанизированной территории и вдоль транспортных магистралей.

Наиболее активный антропогенный селевой бассейн, на котором формирование селей происходит практически ежегодно, расположен на территории месторождения Лиственничное. Данная территория относится к ГО «Южно-Сахалинский». Добыча строительного камня ведется с 1967 г. В последние годы, в связи с бурным ростом строительства, предприятие, разрабатывающее месторождение, увеличило добычу своей продукции, что естественным образом привело к расширению осваиваемой им площади.

Начиная с 2009 г., с одного из отвалов карьера, «Северного», в долину безымянного притока р. Хомутовка сходят антропогенные сели. Наиболее крупные сели, объемы которых, по ранее опубликованным авторами данным, составили 10 тыс. м³ и 15 тыс. м³, фиксировались в 2009 и 2013 гг., соответственно. Анализ спутниковых снимков (Google Earth) показал увеличение зоны селевых отложений с 0.2 до ~4 га, начиная с 2009 г., а протяженность зоны выброса увеличилась с 700 до 1100 м и достигла русла р. Хомутовки (2013 г.), что уже отмечалось в работах авторов.

В течение периода май–ноябрь 2020 г. было зафиксировано существенное увеличение селевой активности в данном бассейне, связанное с выпадением жидких осадков.

Целью работы является описание параметров наблюдаемых селевых потоков, расчет их динамических характеристик с использованием различных методик. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов. Впервые на о. Сахалин наблюдения за селями проводились непосредственно во время их схода. Также в работе приводится селеобразующая сумма осадков, характерная для антропогенных селей, формирующихся на юге о. Сахалин.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Месторождение Лиственничное расположено на западном отроге горы Медика (785 м), в южной части Сусунайского хребта. В геологическом отношении район месторождения сложен кварцитами и метаморфическими сланцами палеозойско-мезозойского возраста, которые образуют крутопадающие пласты субширотного простирания (рис. 1). Общая мощность пластов достигает 850 м. Мощность наиболее крупных пластов кварцитов составляет 100–120 м при протяженности до нескольких километров. Добыча полезных ископаемых на месторождении ведется карьерным способом.

Два крупных отвала пустой породы находятся в северной и южной частях карьера. Общая длина верхней кромки «Северного» отвала по состоянию на 2020 г. составляет около 750 м, «Южного» – около 600 м. Высота откосов отвалов колеблется в пределах от 10 до 80 м, уклоны достигают 35°. Твердый материал «Северного» отвала представлен фракциями от пылеватых до глыбовых, достигающих размеров 1–2 м. Подавляющая часть материала «Южного» отвала представлена мелкой фракцией (от пылеватых частиц до мелкощепнистых, с включением среднего и крупного щебня). На обоих отвалах активно развиты эрозионные процессы, склоны отвалов представляют собой очаги рассредоточенного селеобразования эрозионного типа.

Селевой бассейн «Южного» отвала выраженной зоны транзита не имеет. Твердый материал откладывается непосредственно на площади, прилегающей к откосу отвала. Зона аккумуляции «Южного» отвала карьера по состоянию на август 2020 г. имеет площадь 5.6 га. По спутниковым снимкам (Google Earth) виден прирост ее площади на 5.2 га с 2004 г. В пределах этой зоны лес либо уничтожен, либо поврежден. Отложения попадают в ручей, протекающий ниже отвала и являющийся притоком р. Христофоровки. Сход крупного селя по руслу ручья способен привес-

ти к завалу части территории дачного поселка, расположенного вдоль берега ручья, а также к разрушению подъездной автодороги к нему.

Зона транзита крупных селей с «Северного» отвала проходит по узкому V-образному распадку в верхней трети долины безымянного ручья, впадающего в р. Хомутовку, имеет протяженность 250 м и ширину 7–12 м. Уклон русла на данном участке составляет 10–12°, мощность отложений достигает 2–3 м. Эта часть распадка заполнена селевыми отложениями и древесными стволами, наличие которых связано с активной эрозией бортов ручья, в результате которой происходит падение деревьев в русло.

Распределение выносимого селями твердого материала «Северного» отвала выглядит следующим образом:

- отложения селей малого и среднего масштаба остаются в зоне транзита крупных селей в V-образной части распадка. Исходя из размеров русла, можно оценить запас твердого материала в нем – 2.5–3 тыс. м³;

- верхний конус выноса находится сразу после расширения распадка и достигает 90 м в ширину. Площадь конуса составляет около 2.7 га, протяженность около 600 м. Запас твердого материала более 32 тыс. м³.

- нижний конус выноса сформировался в районе впадения безымянного ручья в р. Хомутовку. Его площадь около 0.1 га, протяженность около 90 м, объем – 500–800 м³.

На всей территории, покрытой селевыми отложениями, наблюдается гибель леса. Во время весеннего снеготаяния и при прохождении дождей происходит вынос значительного количества взвеси в р. Хомутовку.

При выпадении значительного количества жидких осадков и образовании крупных для бассейна безымянного ручья селей (от 10 тыс. м³) начинается поступление крупнообломочного материала в р. Хомутовку, в результате чего река приобретает селевое состояние. Таким образом, формирующийся несвязный наносоводный поток перемещает твердый материал достаточно далеко от карьера – на 10.5 км ниже по течению реки, в район южного торца взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта г. Южно-Сахалинск, где и происходит его вторичное отложение. Площадь данного конуса выноса составляет 1.5–2 га, мощность отложений до 1.5 м.

В период 2013–2016 гг. отмечалось полное замывание русла реки отложениями, в результате чего во время паводков подтапливалась территория, прилегающая к ВПП. Также в этой зоне располагается технический мостовой переход, просвет которого зна-

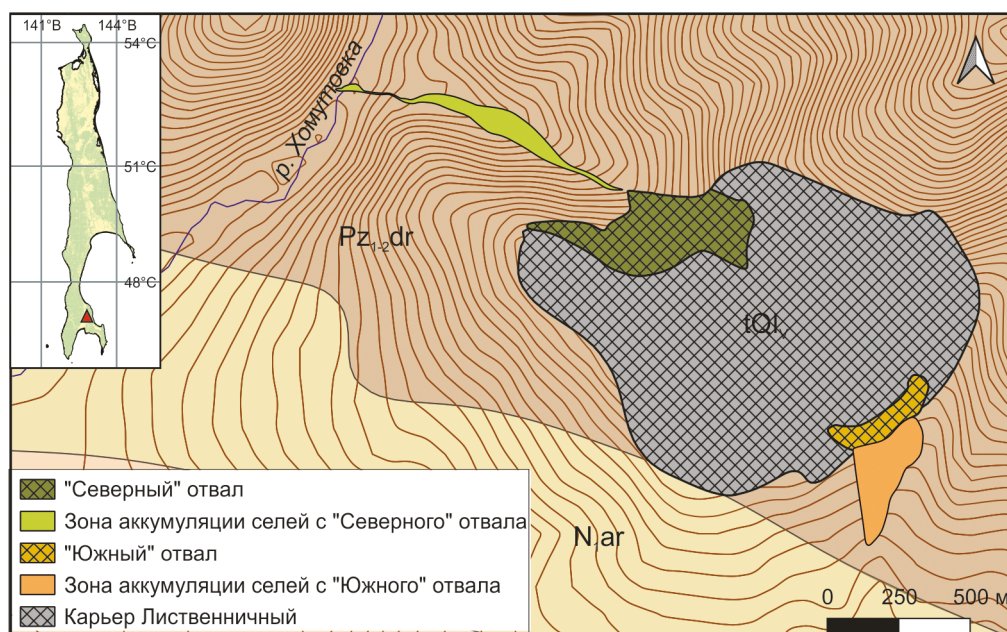


Рис. 1. Район исследования: карьер Лиственничный с отвалами.

$Pz_{1,2dr}$ – дербышевская свита (зеленые сланцы, кварциты, филлиты, прослои кристаллических известняков), N_{1ar} – нижний миоцен, аракайская свита (туфы, туффиты, туфоагломераты, туфогенные алевролиты), tQ_{IV} – современные техногенные отложения.

чительно снизился из-за накопления отложений. Все это привело к необходимости расчистки русла реки техникой.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В селевых бассейнах на территории месторождения Лиственничное проводились полевые работы с целью фиксации случаев схода селевых потоков и измерения параметров селей и данных бассейнов (табл. 1). Во время схода селей с «Северного» отвала карьера велась видеофиксация. Уклоны русел на участках схода селей, ширина и глубина потоков определялись с использованием лазерных дальномеров и рулетки. Для измерения плотности селевой массы проводился забор проб из движущегося селевого потока в емкость известного объема, с дальнейшим взвешиванием пробы на месте наблюдений. Среднее значение плотности селевой массы, которое было использовано для расчетов давления селей, составило 2240 кг/м^3 . Количество осадков определялось по данным ГМС Южно-Сахалинск [27]. Также проводились измерения суммы осадков за событие с использованием измерителя осадков конического непосредственно в бассейне р. Хомутовки.

При проведении полевых работ во время схода селевых потоков измерялась их скорость движения, которая является важнейшей характеристикой, обуславливающей динамику и разрушительную силу

потоков, и находит свое применение в решении прикладных задач, связанных с инженерной защитой территорий. Значения скорости селей уточнялись с помощью видеоматериалов. Скорость определялась по времени прохождения измеренного расстояния фронтом селя или отдельным заметным объектом в потоке. Фактические значения скорости антропогенных селей сравнивались с результатами расчетов скорости природных селей по наиболее применяемым при инженерных изысканиях формулам, приведенным в таблице 2: Голубцова В.В. (для связных и несвязных селей), Херхеулидзе И.И., Кханна [12], Тьери [10], а также формулы из учебно-методического пособия МЧС [6].

Разрушительное воздействие селя обуславливается давлением, оказываемым им на преграду. Исходя из данной характеристики, определяются параметры для проектирования сооружений противоселевой защиты. На основе различных моделей движения (гидростатической, гидродинамической, комбинированной и волновой) выведен ряд формул для расчета значения давления селя на преграду (табл. 2). Обзор методик определения давления селя приводится в [8].

В данной работе для расчета использовались формулы, указанные в обзоре: Лихтенхана, Гюбля и Гольцинера, ГрузНИИГиМ, Ржевского Б.Н. и Нечаева Н.Ф., Херхеулидзе И.И., Гонора А.Л. и Пик-Пичака Е.Г., формула, основанная на гидродинамической

Таблица 1. Параметры, использованные при расчетах динамических характеристик селевых потоков.

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение*	Интервал значений
Переменные				
Глубина селя	h	м		0.07–0.30**
Продольный уклон селевого русла на участке	i	–		0.176–0.305**
Средний угол наклона селевого русла	α	град		10–17**
Относительная гидравлическая крупность вовлекаемых в селя каменных материалов	U_0	–		0.20–0.25**
Максимальный размер включений	d_{\max}	м		0.10–0.60**
Средняя скорость селя	ϑ	м/с		0.10–0.50**
Плотность селевой массы	ρ	кг/м ³	2240	2130–2350**
Константы				
Эмпирический коэффициент по Тьери [10]	a	–	4	3.5–4.5
Эмпирический коэффициент по Лихтенхану [28]	k	–	3.6	2.8–4.4
Эмпирический коэффициент из работ [21, 28, 30]	α	–	2.9	0.4–6.5
Ускорение свободного падения	g	м/с ²	9.81	–
Процентное содержание воздуха в водонасыщенном грунте, согласно [8]	a	–	0.02	0.00–0.04
Скорость звука в селевой массе, согласно [25]	c	м/с	200	100–300

Примечание. * – значения, использованные для расчетов; ** – значения, полученные при полевых наблюдениях.

Таблица 2. Формулы для расчета средней скорости движения и давления селевого потока на преграду.

Источник	Формула	Единицы измерения
Скорость		
Голубцов, для наносоводного потока [12]	$\vartheta = 4.5h^{0.67}i^{0.17}$	
Голубцов, для грязевого и грязекаменного потока [12]	$\vartheta = 3.75h^{0.5}i^{0.17}$	
Херхеулидзе, для селевой смеси, не обладающей вязкопластическими свойствами [12]	$\vartheta = 4.83h^{0.5}(\sin \alpha)^{0.25}$	м/с
Кханн [12]	$\vartheta = 8.05h^{0.59}i^{0.30}$	
Тьери, в упрощенном виде [10]	$\vartheta = a\sqrt{d_{\max}}$	
Учебно-методическое пособие МЧС [6]	$\vartheta = 11.4h^{0.5}(U_0 \sin \alpha)^{1/3}$	
Давление		
Лихтенхан [28]	$P = k\rho gh$	Па
Гидродинамическая модель, общий вид [28]	$P = \alpha\rho\vartheta^2$	Па
ГрузНИИГиМ [8]	$P = 4.5 \frac{\rho\vartheta^2}{g}$	кг/м ²
Ржевский и Нечаев [8]	$P = 2.15(\rho\vartheta)^{1.33}$	Па
Херхеулидзе [8]	$P = 3.5(1.35 \frac{\vartheta^2}{g} \rho)^{0.45}$	кг/м ²
Гюбль и Гольцинер [8]	$P = 5\rho\vartheta^{0.8}(gh)^{0.6}$	Па
ОДМ 218.2.052 -2015 [9]	$P = 4.5\rho\vartheta^2 h$	Па
Гонор и Пик -Пичак [8]	$P = \rho c\vartheta$	Па

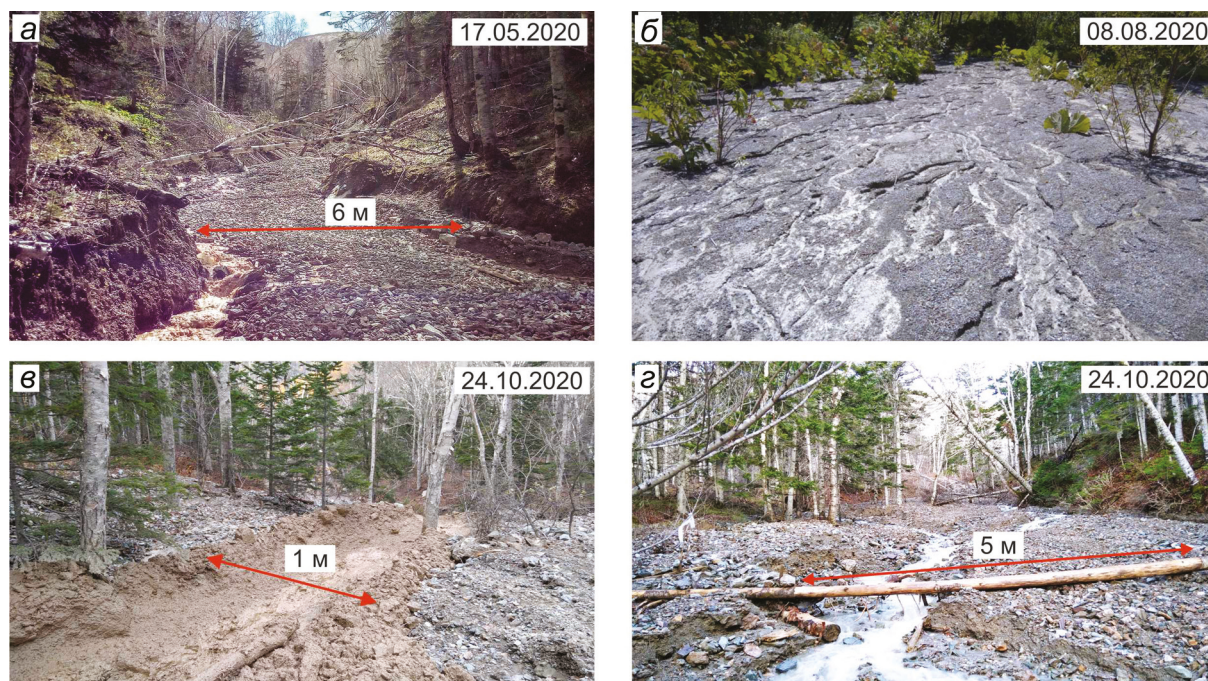


Рис. 2. Проявление селевой деятельности ниже отвалов карьера Лиственничный в 2020 г.

а – ширина селя в зоне транзита 17.05; *б* – растительность, замытая селевыми отложениями 08.08; *в* – ширина селя в боковом врезе, 24.10; *г* – следы прохождения селя на древесном стволе в селевом русле, 24.10.

модели (общий вид). Также, расчет был проведен по формуле из ОДМ 218.2.052-2015 [9].

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В течение 2020 г. отмечалась активизация селевой деятельности на отвалах карьера Лиственничный в период с мая по ноябрь, пик активности селей пришелся на октябрь–ноябрь. Первый случай схода селей с «Северного» отвала, произошедший 17 мая, фиксировался с помощью видеосъемки (далее селя будет указываться как I). Формирование селей было вызвано переувлажнением материала отвала в результате весеннего снеготаяния и выпадения жидких осадков (рис. 2, *а*). Непосредственно перед сходом селей выпало 10 мм осадков [27]. Объем селей был небольшим, и их материал откладывался в зоне транзита. Длина пробега селей составила около 200 м, ширина – 2–5 м, скорость – 0.2–0.7 м/с, мощность отложений – до 0.3 м.

Далее, сход селей с обоих отвалов карьера фиксировался 7 августа во время прохождения тайфуна «Хагупит», когда за событие выпало около 64 мм осадков, по данным измерений, проведенных авторами в бассейне. При этом в предшествующие сутки выпало 14 мм. На «Северном» отвале во время обследования селевого бассейна наблюдался сход селевых потоков через лесной массив на правом борту долины

безымянного ручья. Материал селей представлял собой мелкодисперсную массу. Ширина потоков не превышала 1–2 м, высота селевых валов достигала 0.3 м, глубина выпаживания – 0.2–0.5 м. Были отмечены следы схода селей с откоса отвала и в зоне транзита. Обследование «Южного» отвала позволило зафиксировать сход множества селевых потоков вдоль всей протяженности отвала. Отложениями одного из селей с западной стороны отвала была завалена площадь в 0.1 га, до этого покрытая растительностью (рис. 2, *б*). Мощность отложений достигла 0.5 м. Примерно такую же площадь заняли отложения селя под другой частью отвала, находящейся восточнее.

В течение периода октябрь–ноябрь 2020 г. было зафиксировано максимальное число случаев схода селей с «Северного» отвала. При обследовании селевого бассейна 12 октября были отмечены следы недавнего схода селя после дождей, прошедших 3 и 5 октября. Этому предшествовал период увлажнения грунтов с середины сентября, когда в сумме выпало не меньше 61 мм [27].

Выпадение 47 мм осадков 12 октября на предварительно увлажненные грунты привело к очередному сходу селей, что сопровождалось появлением многочисленных эрозионных врезов в зоне транзита и в верхней зоне аккумуляции. Ручей выработал новое русло на теле конуса выноса. 13 ноября наблюдался

сход нескольких последних волн селя с центральной части «Северного» отвала карьера.

Пробег потока составил около 100 м, ширина – 1–3 м, толщина отложений – до 0.3 м, скорость движения потока – 0.2–1 м/с (далее селя будет указываться как II). Были отмечены следы селевого паводка, прошедшего по верхнему конусу выноса в течение ночи с 12 на 13 октября.

23 октября выпало 46 мм осадков [27]. Обследование 24 октября показало эрозию русла ручья в пределах нижнего конуса выноса. Также эрозия русла, глубиной до 1 м, наблюдалась на поверхности верхнего конуса выноса, при этом смещение русла ручья в поперечном направлении на отдельных участках доходило до 70 м. С центральной части «Северного» отвала сошли сели небольшого объема, их пробег составил первые десятки метров.

Сход наиболее крупного селя происходил во время обследования бассейна (далее селя будет указываться как III-а). Поток формировался в верхней части «Северного» отвала, проходил по боковому селевому врезу на левом борту долины (рис. 2, в), впадал в основное русло ручья, вызвав эрозию русла в месте впадения с расширением вреза до 2.0 м и углублением на 1.5 м. Протяженность вреза от верхней кромки отвала до соединения с основным руслом составила около 180 м. Движение потока происходило волнами, увеличение расхода чередовалось с его уменьшением. В конце наблюдений связная грязекаменная фаза потока (с включением глыб до 0.5–0.6 м в поперечнике) сменилась жидкой, после чего сход селя прекратился. Скорость потока на участке бокового вреза колебалась в пределах 0.3–0.8 м/с, после впадения селя в основное русло (далее селя будет указываться как III-б), скорость снижалась до 0.1–0.2 м/с. Пробег селя составил около 230 м, ширина – от 1 до 7 м, глубина выпахивания в русле бокового вреза – до 0.4 м, по краям вреза образовались селевые валы высотой до 0.2 м. Общий объем отложений составил не менее 100 м³. Были зафиксированы следы селевого паводка, прошедшего в ночное время и достигшего русла р. Хомутовки. В конце зоны транзита с лежащих поперек русла древесных стволов селем была содрана кора (рис. 2, г). Длина участка ствола одного из деревьев, лишенного коры, дает представление о ширине потока (5 м).

Следующий сход селя с центральной части «Северного» отвала наблюдался 29 октября. За этот день выпало небольшое количество осадков – 10 мм [27], но грунты отвала были настолько увлажнены, что этого количества оказалось достаточно для формирования грязекаменных потоков. Образование селей

небольших размеров происходило сразу в нескольких эрозионных врезам центрального участка отвала (далее один из этих селей будет указываться как IV-а), а также в боковом врезе левого борта (после впадения в основное русло селя будет указываться как IV-б). Пробег селей составил около 200 м, скорость изменялась в пределах 0.2–1 м/с, ширина – от 1 до 6 м.

Далее, сход селей был зафиксирован 1 ноября, после выпадения 26 мм осадков [27]. Отмечено изменение русла ручья в зоне транзита и на верхнем конусе выноса.

Последний в сезоне случай схода селей отмечался после прохождения дождей 13 ноября, когда выпало 10 мм осадков (измерено на верхнем конусе выноса). Потоки формировались на правом борту долины и сходили по тем же врезам, что и сели, наблюдаемые 7 августа. Размер врез увеличился приблизительно в два раза. Ширина отложений потоков составила от 1 до 20 м, глубина выпахивания – до 0.7 м, высота селевых валов – до 0.5 м.

Наблюдаемые в течение сезона сели и их измененные характеристики соответствуют селям природного происхождения, которые наблюдал Виноградов Б.Ю. в селевом бассейне р. Кокчека (Зайлийский Алатау, Казахстан). При ширине потоков 0.5–1 м и глубине 0.2–0.3 м скорость селей составляла 0.5–1 м/с [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ

За период наблюдения инструментально зарегистрировано шесть селевых потоков во время их движения. На месте наблюдения, а также по видеозаписи, определена средняя скорость селей. Для тех же селей получены расчетные значения (табл. 3). Расчеты выполнены на створы, в которых проведены фактические наблюдения. На рисунке 3 показан разброс расчетных значений скорости, полученных по разным формулам. Диапазон расчетных значений находится в пределах от 0.6 до 3.1 м/с. Фактические значения скоростей селей оказались значительно ниже расчетных, на рисунке 3 они отображены выбросами, т.к. не вошли в диапазон значений, полученных с помощью формул.

Авторы видят причину заметного превышения расчетных величин скорости селей над фактическими в ряде факторов. Во-первых, расчетные формулы выводились на основе наблюдений или изучения следов схода крупных селевых потоков, масштаб которых в разы больше, чем у селей, описанных в данной работе. Во-вторых, при малом масштабе наблюдаемые антропогенные сели имеют высокую плотность (до 2350 кг/м³), что также сказывается на уменьшении скорости их движения.

Таблица 3. Расчетные и фактические значения скоростей селевых потоков с отвалов карьера Лиственничный.

Селевой поток	Скорость движения селевого потока по формулам, м/с						Скорость, зафиксированная при наблюдениях, м/с
	Голубцова для связанных селей	Голубцова для несвязных селей	Херхеулидзе	Кханна	МЧС	Тъери	
I	0.78	0.60	0.90	1.13	1.10	1.26	0.4
II	1.32	1.21	1.51	2.09	1.86	1.79	0.3
III-a	1.68	1.64	1.95	2.81	2.42	3.10	0.25
III-б	1.25	1.14	1.39	1.88	1.79	2.19	0.1
IV-a	1.32	1.21	1.51	2.09	1.86	1.79	0.3
IV-б	1.53	1.49	1.71	2.38	2.04	2.19	0.5

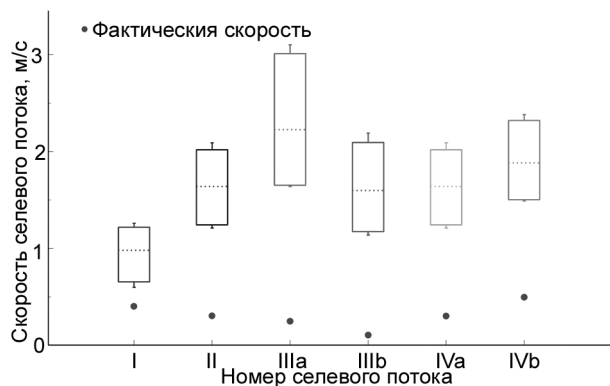


Рис. 3. Фактические и расчетные значения скоростей движения селевых потоков.

В таблице 4 показаны статистически значимые различия между парами формул для всех шести селей. Различия значений считались несущественными при $p < 0.1$. Результаты показали, что расчеты,

выполненные по обеим формулам Голубцова, имеют аналогичные значения, что можно сказать и о формулах Кханна, Тъери и МЧС. Значения, полученные по формуле Херхеулидзе, не перекликаются со значениями, полученными по другим формулам. Ни одно из расчетных значений не совпало с фактическими данными. Наиболее приближенные к фактическим значениям, т.е. наименьшие из расчетных скоростей селей, получены по формулам Голубцова.

Для оценки разрушительной силы селевых потоков был произведен расчет давления наблюдаемых селей на преграду. При расчете давления использовались наблюдаемые значения скоростей селей, т.к. рассчитанные по всем методикам скорости имели сильное завышение. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.

Из анализа сравнительной диаграммы можно сделать заключение, что максимальные значения давления селей на преграду дают расчеты по формулам Ржевского и Нечаева, а также Лихтенхана – более 0.012 МПа. Полученные значения отражаются на рисунке 4 выбросами. За исключением селей I, III-a и III-б, где по одной из формул значение оказалось менее 0.01 МПа. Расчеты по ГрузНИИГиМ, Херхеулидзе, ОДМ 218.2.052-2015 и формуле, основанной на гидродинамической модели (общий вид), показали минимальные и близкие между собой значения для всех выбранных для расчетов селей. С помощью формул Гюбля и Гольцинера, а также Гонора и Пик-Пичака были получены средние значения.

Полученные рассчитанные значения давления селей на преграду можно сравнить с параметрами селя из материала горных выработок, сошедшего в Китае в августе 2013 г. в районе Tieshanzhang, когда скорость потока составила 2.85 м/с, плотность селевой массы – 1610 кг/м³ и давление на преграду – 0.0164 МПа [22]. Давление на преграду селя, сошедшего в Китае, сопоставимо со значениями давлений

Таблица 4. Статистически значимые различия в значениях скоростей селей между парами формул.

	Голубцова для связанных селей	Голубцова для несвязных селей	Херхеулидзе	Кханна	МЧС	Тъери	Факт
Голубцова для связанных селей							
Голубцова для несвязных селей	II, III-a, III-б, IV-a, IV-б						
Херхеулидзе	x	x					
Кханна	x	x	x				
МЧС	x	x	x	I, III-б			
Тъери	x	x	x	III-a, IV-б	II, IV-a, IV-б		
Факт	x	x	x	x	x	x	

Примечание. x – обнаружены статистические различия ($p > 0.1$).

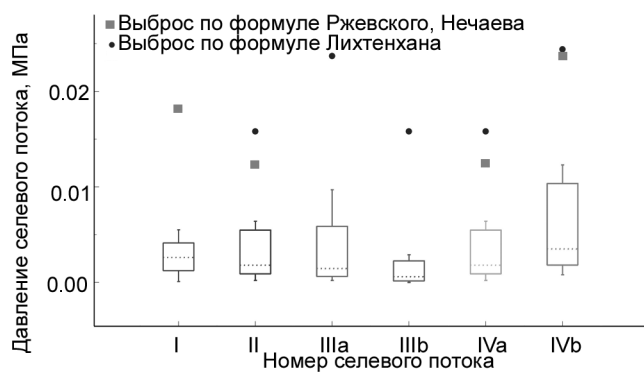


Рис. 4. Сравнительная диаграмма значений давления селей на преграду, рассчитанных по различным методикам, для потоков с «Северного» отвала карьера Лиственничный.

селей с «Северного» отвала, полученными по формулам Ржевского и Нечаева, а также Лихтенхана.

ОБСУЖДЕНИЕ

В России нет классификации селей, основанной на их разрушительном воздействии (пиковом давлении). Три категории опасности селей, представленные в [14], выделены для каждого из четырех показателей (площадная пораженность территории, объем выноса, скорость и повторяемость селей), по которым возможно оценивать селевую опасность. Также существует классификация селей по их мощности [15], в которой приводятся типы повреждений, но не дается их количественная оценка по какому-либо критерию.

Зарубежные авторы исследовали вопрос зависимости разрушительной силы селей от величины давления потока на объект. В работе [24] сделана оценка ударного воздействия селей на сооружения с выделением категорий наиболее вероятного ущерба. Для определения степени повреждения строения селем был введен безразмерный показатель интенсивности воздействия (I_{DF}), равный произведению высоты селевого потока (h) на квадрат скорости движения селя (g^2).

В СССР и России проводились стендовые и натурные эксперименты по определению ударного воздействия снежных лавин. Целью экспериментов было определение значений давления лавин на преграду и сопоставление этих значений с возможными разрушениями [7, 19]. Классификация лавин, основанная на параметре «пиковое давление», представлена в одной из недавних работ авторов, где разрушительное воздействие оценено по классам сооружений.

Авторы данной работы считают, что методика оценки ударной нагрузки снежных лавин на объекты, в зависимости от оказываемого давления, может применяться для оценивания вероятного ущерба строениям при воздействии на них селевых потоков. Такое заключение основано на том, что давление определяется силой воздействия на единицу площади, из чего следует, что для объекта нет существенного различия, действует ли на него снежная лавина или селевой поток при равной приложенной силе.

Авторами было проведено сопоставление классов наиболее вероятного ущерба от снежных лавин и

Таблица 5. Ущерб от схода снежных лавин и селей с соответствующими значениями давления (P) и показателя интенсивности воздействия (I_{DF}).

Повреждения/разрушения от лавин (по Лосеву [7])	P , МПа	Повреждения/разрушения от селей (по Джекобу и др. [24])	I_{DF}	Расчетные параметры наблюдаемых селей: P , МПа / I_{DF}
Вылетают стекла и оконные рамы	0.0019	частичное подтопление	0–1	0.0044–0.0089
Лавина выламывает двери, валит изгороди, ломает ветки деревьев	0.0049	селевыми отложениями, требуется косметический ремонт		0.002–0.075
Лавина разрушает деревянные сооружения, ломает стволы молодых деревьев	0.029	частичное повреждение строений, требуется ремонт	1–10	–
Лавина повреждает легкие каменные сооружения, вырывает с корнем старые деревья	0.098	значительное повреждение строений, требуется реконструкция	10–100	–
Лавина разрушает каменные сооружения, валит старый лес на значительной площади	0.245			
Лавина разрушает железобетонные сооружения	0.98	полное разрушение и/или перемещение строений	100–1000 и более	–

селей (табл. 5) с привязкой значений пикового давления к показателю интенсивности воздействия (I_{DF}).

В результате, была получена примерная шкала оценки ущербов от селей для природных объектов, таких как растительность, а также строений различного класса, в зависимости от ожидаемого значения давления селя или показателя I_{DF} . В случае наличия информации о повреждениях от селя, параметры которого неизвестны, возможно их примерное определение, основанное на использовании данных из таблицы 5.

Для оценки возможного ущерба природным и антропогенным объектам от селевых потоков, сход которых наблюдался с «Северного» отвала карьера, были рассчитаны значения давления и показатели интенсивности воздействия I_{DF} (табл. 5). Средние расчетные значения давления на преграду для наблюдаемых селей составили интервал 0.0044–0.0089 МПа, что в целом соответствует первым двум категориям разрушений от схода снежных лавин с давлением до 0.0049 МПа (выбивает стекла и оконные рамы, выламывает двери, валит изгороди, ломает ветви). Значения I_{DF} , находящиеся в пределах 0.002–0.075, приходятся на первую категорию разрушений от схода селей (частичное подтопление селевыми отложениями).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение периода май–ноябрь 2020 г. наблюдалось 8 случаев схода антропогенных селей с отвалов карьера Лиственничный. Впервые на о. Сахалин была проведена видеофиксация схода селей с измерением параметров потоков во время наблюдения. Был произведен отбор проб селевой массы непосредственно из сходящих потоков для определения плотности. Для расчетов скоростей движения селей и давления на преграду, с использованием различных методик/формул, были выбраны 6 селевых потоков из числа наблюдаемых.

Расчет скоростей движения наблюдаемых селей по различным формулам дал значения в пределах от 0.6 до 3.1 м/с. Фактические значения скоростей оказались ниже рассчитанных (0.1–0.5 м/с). Наиболее близкие значения к реально измеренным величинам скоростей селей были получены с использованием формулы Голубцова для несвязных селевых потоков.

При проведении полевых работ выполнена оценка максимального селевого расхода и скорости селя, которые могут достигать 50 м³/с и 3 м/с, соответственно, при условии включения в селевой поток твердого материала из зоны транзита крупных селей.

Для зафиксированных селей с «Северного» отвала карьера Лиственничный были получены пока-

затели интенсивности воздействия I_{DF} . Все величины I_{DF} соответствуют первой категории вероятных разрушений (частичное подтопление селевыми отложениями). Полученные для наблюдаемых селей средние расчетные значения давления на преграду находятся в пределах 0.0044–0.0089 МПа, что соотносится с категориями разрушений от схода снежных лавин с давлением до 0.0049 МПа (выбивает стекла и оконные рамы, выламывает двери, валит изгороди, ломает ветви).

Получена примерная шкала оценки ущербов от селей для строений различного класса и природных объектов (растительность) в зависимости от ожидаемого значения давления селя или показателя интенсивности воздействия I_{DF} .

Проведенные измерения количества осадков, в результате выпадения которых сформировались антропогенные сели с отвалов карьера (от 10–26 мм/сут., при предшествующем увлажнении – до 46–64 мм/сут.), дают основание для заключения, что для образования таких селевых потоков достаточно того же количества осадков, что и для природных селей на о. Сахалин.

На текущий момент ущерб от схода антропогенных селей с отвалов карьера Лиственничный наносился, в основном, природным объектам, наиболее крупными из которых являются реки высшей рыбохозяйственной категории Хомутовка и Христофоровка. Однако в потенциальной зоне воздействия селей находятся дачные поселки, жилищная инфраструктура районов – Хомутово, Лиственничное, Христофоровка, а также хозяйственная – аэропорта г. Южно-Сахалинск. При сохранении текущей интенсивности работы карьера или ее возрастании следует ожидать увеличения селевой активности в бассейне р. Хомутовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 144 с.
2. Генсировский Ю.В., Казаков Н.А., Рыбальченко С.В. Гидрометеорологические условия периодов массового селеобразования на о. Сахалин // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Тр. Междунар. конф., Пятигорск, 22–29 сент. 2008 г. / Севкавгипроводхоз, Межрегион. Общ-во с орг. «Селевая ассоциация». Пятигорск, 2008. С. 95–98.
3. Генсировский Ю.В., Казаков Н.А. Воздействие экзогенных геодинамических и русловых процессов на сооружения инженерной защиты нефтегазопроводов проекта «Сахалин-2» летом 2009 года // Геориск. М.: ПНИИИС, 2009. № 4. С. 38–45.
4. Глотов В.Е., Глотова Л.П., Бульбан А.П., Митрофанов И.Д. Хвостохранилище Карамкенского горно-металлургического комбината: инженерно-геологические проблемы и причины аварийного разрушения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 31–39.

5. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В. Экзогенные геодинамические и русловые процессы в низкогорье о. Сахалин как факторы риска для нефтегазопроводов «Сахалин-2» // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. М.: Наука, 2008. № 6. С. 483–496.
6. Крюков Е.В., Бутенко В.М. Опасные природные процессы: Учеб.-метод. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. 119 с.
7. Лосев К.С. По следам лавин. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 136 с.
8. Молжигитов С.К. Оценка ударной нагрузки селевого потока на поперечную жесткую преграду // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 3 (Ч. 1). С. 16–20.
9. ОДМ 218.2.052-2015. Отраслевой дорожный методический документ. Проектирование и строительство противоселевых сооружений для защиты автомобильных дорог. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456050231> (дата обращения: 1.06.2022).
10. Оползни и сели. В 2 т. Центр международных проектов ГКНТ. М., 1984. Т. 1. 352 с.
11. Рыбальченко С.В. Динамика развития склоновых селевых бассейнов на морских террасах о. Сахалин: Дис. ... канд. географ. наук: 25.00.25. СПб., 2017. 127 с.
12. Соколова Д.П., Виноградова Т.А., Осташов А.А. Оценка скорости движения селевого потока по различным методикам // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита / Тр. 5-й Междунар. конф.. Тбилиси, Грузия, 1–5 октября 2018 г. / Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. Тбилиси: Универсал, 2018. 671 с.
13. Сократов С.А., Селиверстов Ю.Г., Шныпарков А.Л., Колтерманн К.П. Антропогенное влияние на лавинную и селевую активность // Лед и снег. 2013. № 2 (122). С. 121–128.
14. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202> (дата обращения: 1.06.2022).
15. СП 342.1325800.2017. Защита железнодорожного пути и сооружений от неблагоприятных природных явлений. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/557662325> (дата обращения: 1.06.2022).
16. Федеральная служба государственной статистики. 2021. [Электронный ресурс].
17. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/MZmdFJyI/chisl_MO_Site_01-01-2021.xlsx (дата обращения: 1.06.2022).
18. Хаджиев М.М. Оценка селевой опасности района г. Тырнауза: Автореф. дис. ... канд. географ. наук. 25.00.23. Нальчик, 2005. 17 с.
19. Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Причины и последствия техногенной активизации селей в 2006–2019 гг. на водосборе притока руч. Сулимовский (район пос. Красная Поляна, Западный Кавказ) // ГеоРиск. 2020. Т. XIV, № 2. С. 66–76.
20. Шурова И.Е., Якимов Ю.Л. Исследование удара снега о неподвижное препятствие // М.: МГИ, 1970. Вып. 16. С. 52–57.
21. Agurto-Detzel H., Bianchi M., Assumpção M., Schimmel M., Collaço B., Ciardelli C., Barbosa J. R., Calhau J. The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence // Geophys. Res. Lett. 2016. 43. P. 4929–4936. DOI:10.1002/2016gl069257
22. Bugnion L., McCardell B.W., Bartelt P., Wendeler C. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles // Landslides. 2012. 9(2). P. 179–187. DOI:10.1007/s10346-011-0294-4
23. Fan S., Ma Y., Qin N. Basic characteristics and starting mode of debris flow in Tieshanzhang Mining Area under typhoon // Geology, Ecology, and Landscapes. 2017. V. 1, N 4. P. 241–248. DOI:10.1080/24749508.2017.1389490
24. Hudson-Edwards K.A., Byrne P., Bird G., Brewer P.A., Burke I.T., Jamieson H., Macklin M., Williams R. Origin and fate of Vanadium in the Hazeltine Creek Catchment following the 2014 Mount Polley mine tailings spill, British Columbia, Canada // Environmental Sci. & Technology. 2019. 53. P. 4088–4098. DOI:10.1021/acs.est.8b06391
25. Jakob M., Stein D., Ulmi M. Vulnerability of buildings to debris flow impact // Natural Hazards. 2012. 60(2). P. 241–261. DOI:10.1007/s11069-011-0007-2
26. Oelze M.L., O'Brien W.D., Darmody R.G. Measurement of attenuation and speed of sound in soils // Soil Sci. Soc. of Am. J. 2002. 66(3). 788 p. DOI:10.2136/sssaj2002.7880
27. Robinson P. Partizansk Coal Ash Dam Break and Spill – Observations. 2004. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sric.org/mining/docs/Partizansk%20Coal%20Ash%20Dam%20Break%20and%20Spill.pdf> (дата обращения: 1.06.2022).
28. Rp5.ru. 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Южно-Сахалинске (дата обращения: 1.06.2022).
29. Scheidl C., Chiari M., Kaitna R., Müllegger M., Krawtschuk A., Zimmermann T., Proske D. Analysing Debris-Flow Impact models, based on a small scale modelling Approach // Surveys in Geophysics. 2013. 34(1). P. 121–140. DOI:10.1007/s10712-012-9199-6
30. Su W.X., Miller H.D.S. Waste pile stability and debris flow formation // The 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 5–7 June, Reno, Nevada. 1995. [Электронный ресурс]. URL: <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA95/All-ARMA95/ARMA-95-0831/130731> (дата обращения: 1.06.2022).
31. Tiberghien D., Laigle D., Naaim M., Thibert E., Ousset F. Experimental investigations of interaction between mudflow and an obstacle // C. Chen, J. Major (eds). International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, prediction, and assessment: Proceedings, Millpress, Rotterdam. 2007. P. 281–292.
32. Ujnosahalinsk. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://ujnosahalinsk.bezformata.com/listnews/opolzen-proshelsyapo-ulitcam-holmska/6031648/> (дата обращения: 1.06.2022).
33. Yang Y.Y., Xu Y.S., Shen S.L., Yuan Y., Yin Z.Y. Mining-induced geo-hazards with environmental protection measures in Yunnan, China: an overview // Bull. of Engineering Geol. and Environment. 2015. 74 (1). P. 141–150. DOI:10.1007/s10064-014-0608-6

Рекомендована к печати А.Н. Диденко
после доработки 25.08.2022 г.
принята к печати 27.09.2022 г.

L.E. Muzychenko, V.A. Lobkina, A.A. Muzychenko

Calculation of parameters controlling the occurrence of anthropogenic mudflows on the dumps of the Listvennichnyi quarry (Sakhalin)

The paper considers the intensification of mudflow activity on the dumps of the Listvennichnyi quarry near the city of Yuzhno-Sakhalinsk. Eight cases of anthropogenic mudflows initiated by rainfalls were recorded during field observations conducted from May to November in 2020. First for Sakhalin, mudflows were recorded by video equipment. Parameters of mudflows were measured during their descent. Velocity values were obtained for six mudflows and compared with the values calculated by different methods. Mudflow pressure values were also calculated for all six flows. The derived values are in the range between 0.0044 and 0.0089 MPa. Different methods for the assessment of mudflow effects on objects depending on the pressure value were compared. The amount of precipitation sufficient for triggering anthropogenic mudflows is provided in the paper.

Key words: anthropogenic mudflow, mudflow velocity, mudflow pressure, Sakhalin.