

## ОТЛИЧИЕ СКЛОНОВЫХ СЕЛЕЙ ОТ ОПОЛЗНЕЙ-ПОТОКОВ

© 2022 г. С. В. Рыбальченко<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,  
Южно-Сахалинск, Россия

\*E-mail: rybalchenko\_sv@mail.ru

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 09.07.2021 г.

Принята к публикации 11.10.2021 г.

Склоновые сели широко распространены, но, несмотря на это, представляют собой одну из малоизученных форм движения материала, а большинство случаев селеформирования интерпретируются как генетически близкие склоновым селям геодинамические процессы (эрозия, оползни-потоки, осыпи и др.). В связи с ошибочной идентификацией экзогенных процессов значения дальности выброса, площадной пораженности территории, воздействия на препятствия и сооружения инженерной защиты оказываются существенно заниженными, что часто приводит к их повреждению, разрушению и неэффективности. На основе полевых наблюдений на участках массового формирования склоновых селей в Магаданской области, на о-ве Сахалин и Курильских островах установлены причины генетической связи склоновых селей и других водно-гравитационных и флювиальных процессов, определены признаки их парагенезиса, в том числе совместный характер течения, общие очаги зарождения и твердого питания, единые условия и факторы формирования, взаимная трансформация. Склоновые сели и оползни-потоки отличаются агрегатным состоянием, характером перемещения твердой фазы в потоке, типом взаимодействия с подстилающей поверхностью и препятствиями. При рекогносцировочном обследовании территории сложно различить следы селепрохождения от следов движения оползней-потоков в склоновых селевых бассейнах. Для идентификации случаев селепрохождения, наиболее достоверными могут служить анализ геоботанических данных (характер повреждений и дефектов древесины), формы и структуры отложений, характера взаимодействия с подстилающей поверхностью и препятствиями.

*Ключевые слова:* склоновые процессы, оползни, эрозия, парагенезис, селевая масса

**DOI:** 10.31857/S0435428122010114

### ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Склоновые сели встречаются повсеместно, где существуют условия для развития склоновых экзогенных процессов. География их распространения простирается от экваториального пояса вплоть до субарктических широт [1, 2]. Склоновые селевые потоки регистрируются не только в горной местности, но и на равнинах: низких склонах, оврагах [3] и террасах, в том числе на урбанизированных территориях, антропогенно-измененных и техногенных склонах выемок и насыпей (котлованах, отвалах и терриконах). Стоит отметить, что интерпретация склоновых селей как геодинамических процессов, присущих определенным типам рельефа местности или географическим областям, совершенно не верна.

Склоновые селевые бассейны расположены преимущественно на коротких или средних склонах протяженностью от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Как правило, склоновые селевые бассейны представлены мелкими от-

рицательными формами эрозионного и денудационного рельефа (промоинами, денудационными воронками, оврагами, врезами и др.). Формируются данные селевые бассейны под действием современных процессов эрозии и денудации. Для всех склоновых селевых бассейнов характерно отсутствие ярко выраженного тальвега или слабо врезанное русло, не достигшее местного базиса эрозии, а также превышение продольного уклона тальвега над углом внутреннего трения горных пород потенциальных селевых массивов и вмещающих горных пород, что обуславливает преобладание в склоновых селевых бассейнах сдвигового или эрозионно-сдвигового селевого процесса [4].

Несмотря на широкое распространение, склоновые сели представляют собой одну из малоизученных форм движения материала, и большинство случаев селеформирования интерпретируются как генетически близкие склоновым селям геодинамические процессы: оползни-потоки, эрозия, осыпи и др.



Рис. 1. Противооползневая подпорная стена, разрушенная склоновым селем.

Склоновые сели, в отличие от близких им склоновых водно-гравитационных и флювиальных процессов, обладают более разрушительным воздействием: оказывают значительное давление на преграды, способны огибать препятствия, размывать русла и тальвеги, подмывать сооружения (рис. 1). Разрушительное воздействие склоновых селей обусловлено их высокими динамическими характеристиками, способностью селевой массы долгое время сохранять и передавать значительный импульс энергии, ее пластичностью и эродирующей способностью. Данные обстоятельства обуславливают необходимость интерпретации склоновых селей как отдельного геодинамического процесса, особенно при оценке опасности для территории и объектов, а также при разработке мероприятий по инженерной защите. Особенности склоновых селей и их генетическая связь с другими склоновыми экзогенными процессами, а также анализ их различий — одна из актуальных проблем изучения склоновых селевых потоков.

Основой для данной работы послужили многолетние полевые исследования автора, проводившиеся с 2008 г. на о-ве Сахалин, Курильских островах, полуострове Старицкого и побережье Тауйской губы (Магаданская область) [4–7].

В ходе данных исследований были выполнены наблюдения за возникновением и развитием склоновых селевых бассейнов, склоновыми и долинными селями, а также генетически близкими склоновыми экзогенными процессами. Автором был проведен анализ массивов экспериментальных данных, полученных геологической службой США (USGS) на селевом лотке в период с 1992–2017 гг. [8, 9], в Казахской головной архитектурно-строительной академии [10], в гидротехнической лаборатории ГрузНИИГиМ [11], а также результаты собственных экспериментальных данных, полученных на селевом стенде в 2019–2020 гг. в Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск) [12, 13].

Цель данного исследования — выявление отличий склоновых селей от оползней-потоков для идентификации склоновых селей как отдельного геодинамического процесса.

Задачами данной работы являются: определить генетически родственные склоновым селям экзогенные процессы, установить причину их парагенезиса, выявить особенности склоновых селей, особенности оползней-потоков и их принципиальные отличия.

## ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ СКЛОНОВЫХ СЕЛЕЙ И БЛИЗКИХ ИМ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В пределах склоновых селевых бассейнов одновременно развивается целый комплекс экзогенных процессов гравитационного, водно-гравитационного и флювиального характера (осыпи, эрозия, оползни и др.), что обусловлено особенностями геоморфологического строения, формированием поверхностного стока и снегонакоплением, а также специфическим литологическим составом горных пород склоновых селевых бассейнов. Различные генетические типы отложений в очагах зарождения одновременно служат источниками твердого питания различных экзогенных процессов, что обуславливает их парагенетический характер течения.

При активном парагенетическом развитии экзогенных процессов в пределах склонового селевого бассейна на конусе выноса помимо пролювиальных отложений могут переслаиваться различные генетические типы отложений, приуроченные к склоновому парагенетическому ряду [14]. Парагенетический характер течения экзогенных процессов в пределах склоновых селевых бассейнов описан в работах В.Ф. Перова [1].

Склоновые селевые бассейны возникают и развиваются под воздействием экзогенных процессов; они образуют разнообразные отрицательные формы рельефа, преобразуют профиль селевого бассейна, формируют различные генетические типы отложений. Склоновые селевые бассейны представляют собой отдельную геоморфологическую единицу, которую можно рассматривать как локальную геосистему, включающую в себя различные компоненты (рельеф, геологическую среду, климатические условия и гидрологический режим), прямые и обратные связи между ними, и процессы обмена веществом и энергией. Основные процессы тепломассопереноса в пределах склоновых селевых бассейнов осуществляются путем преобразования потенциальной энергии потенциальных селевых и оползневых массивов в кинетическую энергию экзогенных геодинамических процессов. Внутри данной геосистемы перенос вещества и энергии находится в состоянии предельного равновесия, обусловленного относительным равенством потенциальной энергии рельефа и кинетической энергии геодинамических процессов. При равных условиях (литологическом и геоморфологическом строении, составе горных пород, температурно-влажностном, гидрологическом, гидрогеологическом режиме) в пределах одного бассейна возможно возникновение различных экзогенных процессов, характер и тип которых будет зависеть от колебаний условий и факторов, незначительных, но достаточных для

возникновения определенного экзогенного процесса (рис. 2).

Основными факторами возникновения экзогенных процессов в пределах склонового селевого бассейна являются высокая энергия рельефа, наличие легко разрушаемых рыхлообломочных горных пород, вовлекаемых в экзогенные процессы, и интенсивный сток, обусловленный выпадением значительного количества осадков, которые обеспечивает наличие жидкого агента для переноса твердого вещества или снижения физических-механических характеристик грунтов.

Селепрохождение в пределах склонового бассейна обязательно проходит несколько стадий развития:

I – стадия накопления и покоя потенциального селевого массива;

II – стадия потери устойчивости или разрушения потенциального селевого массива;

III – начало движения потенциального селевого массива;

IV – формирование собственно селевого потока и его движение;

V – аккумуляция селевого потока;

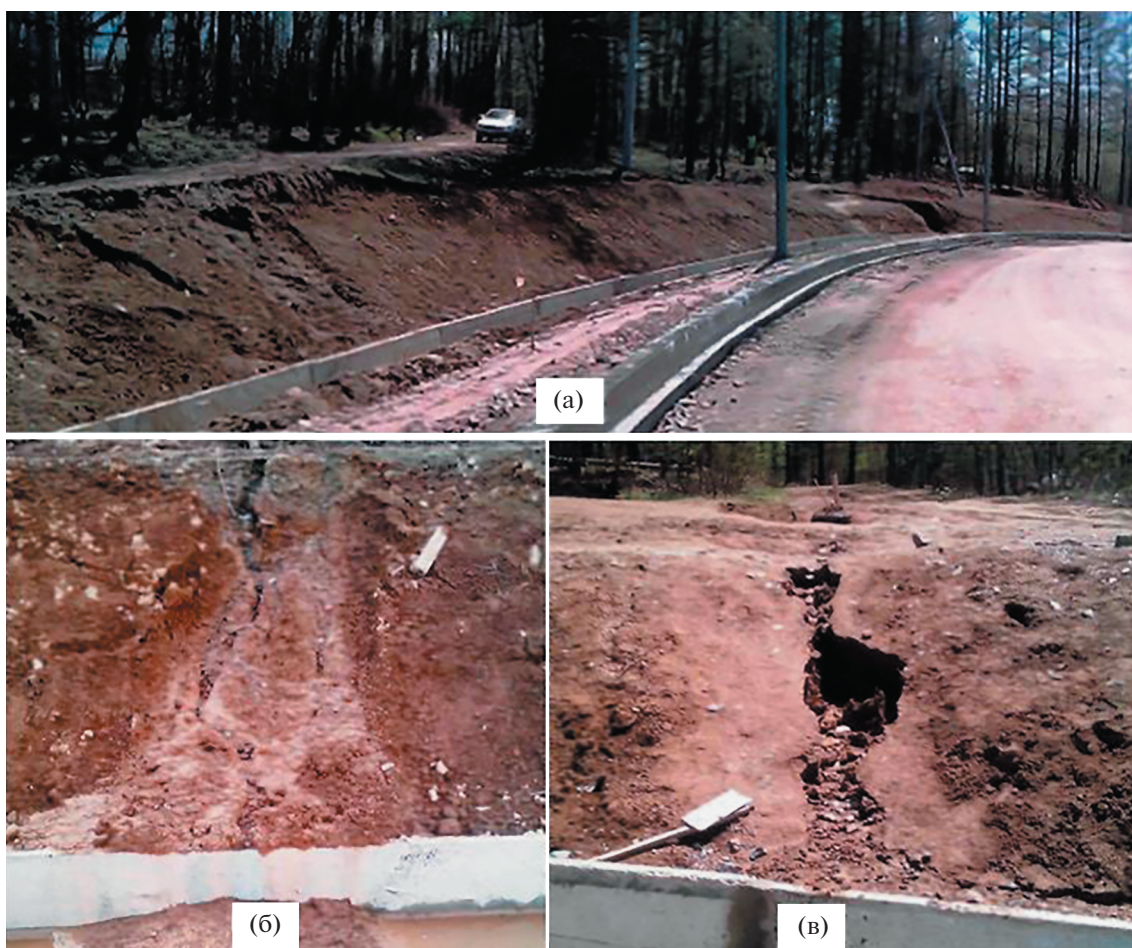
VI – стадия постселевых явлений (отхождение суспензии из селевой массы).

Формированию селевого потока в склоновом селевом бассейне обязательно предшествуют иные водно-гравитационные или флювиальные процессы, возникающие в зоне зарождения селя.

В связи с особенностями геолого-геоморфологического строения склоновых селевых бассейнов в них преимущественно развиты сдвиговый и эрозионно-сдвиговый селевые процессы (по Ю.Б. Виноградову) [15, 16].

При сдвиговом селевом процессе на склоне происходит потеря устойчивости массива рыхлообломочных горных пород (II стадия), его дальнейшее движение под действием силы тяжести (III стадия), разрушение структуры массива, обводнение и последующее формирование селевого потока (IV стадия). Стоит отметить, что в стадию III сдвигового селевого процесса характер движения потенциального селевого массива является водно-гравитационным (оползневым). При увеличении скорости движения оползня разрушается его структура, уменьшается общая вязкость и снижается генетическая связь с поверхностью скольжения, далее оползневое тело вовлекается в селевой поток [17]. Объем и расход селей, вызванных разрушением структуры грунтов и переходом их в текучее состояние, определяются, главным образом, минералогическим и гранулометрическим составом рыхлообломочных пород, степени их увлажнения и консолидации, морфометрическими характеристиками рельефа местности [18].





**Рис. 2.** Участок откоса автодороги с нагорной стороны, поврежденный экзогенными процессами после ливневых осадков – (а), оплытина на откосе, в результате вязкопластичной деформации грунтов (водно-гравитационный процесс) – (б) и промоина на откосе, в результате эрозии (флювиальный процесс) – (в).

При эрозионно-сдвиговом селевом процессе в результате достижения водным потоком размывающих скоростей происходят вымывание отдельных частиц грунта (II стадия), размыв потенциального селевого массива рыхлообломочных горных пород и сдвиг локальных массивов (III стадия), дальнейшее преобразование водного потока в селевой (IV стадия). Перемещение материала в стадию III носит флювиальный характер. В зависимости от условий и механизма зарождения при эрозионно-сдвиговом селевом процессе на второй стадии селеформирования может первоначально отмечаться активная линейная эрозия.

Несмотря на различные типы селевых процессов, протекающих в пределах склоновых селевых бассейнов, а также предшествующие им на ранних стадиях селеформирования экзогенные процессы, формирующиеся склоновые сели обладают всеми характерными чертами движения селевых потоков: высокой транспортирующей способностью, от-

носительно низкой динамической вязкостью, волновым характером движения и т.д.

Помимо сдвигового и эрозионно-сдвигового механизма зарождения селевых потоков отмечены многочисленные случаи формирования селей в результате трансформации оползней-потоков в зоне транзита [19–21]. Подобные случаи были зафиксированы автором в периоды массового формирования селей на западном побережье Сахалина в 2009, 2016 и 2018 г. Во всех отмеченных случаях возникновению селевых потоков предшествовали длительные увлажнения и интенсивные осадки, в результате которых происходило переувлажнение четвертичных отложений на склонах, часто залесенных и задернованных. Начало движения грунтовых масс происходило в результате образования вязкопластических оползней. При движении вниз по склону переувлажненные грунтовые массы формировали оползни-потоки, которые при дальнейшем движении, разрушении и насыщении водой в зоне транзита



**Таблица 1.** Склоновые сели и генетически близкие экзогенные процессы

Показатели	Генетически близкие экзогенные процессы		
	склоновый сел (грязевой и грязекаменный)	оползень-поток	наносоводный поток
Тип процесса	Водно-гравитационный	Водно-гравитационный	Флювиальный
Соотношение твердой и жидкой составляющих	Твердый материал от 40 до 70%, вода 30–60% [1]	Твердый материал от 60–90%, вода 10–40% [17]	Твердый материал от 10–40%, вода 60–90% [1]
Транспортирующая среда	Селевая суспензия [1, 24]	Конгломерат из грязекаменной массы [29, 30]	Вода [1, 27, 29]
Объемный вес, кг/м <sup>3</sup>	1600–2400 [18, 26]	1800–2400 [18, 26]	1050–1200 [29]
Характер движения	Волновой характер с активным перемешиванием селевой смеси [1, 18, 24, 26, 27]	Движение подобно вязкопластическому телу [17]	Турбулентное движение [1, 24, 27]
Скорость, м/с	От 2 до 8–10 м/с [1, 24, 27]	От нескольких м/мин до 1–2 м/с [17]	До 10–15 м/с [1]
Воздействие на рельеф склона	Активная глубинная и боковая эрозия, с преобладанием глубинной (эродирование русла) [29]	Сглаживает и нивелирует рельеф [29]	Активная глубинная и боковая эрозия, с преобладанием боковой (русловые деформации) [29]
Степень переработки материала	Высокая; сортировки по крупности не происходит [24]	Минимальная; структура смеси полностью сохраняется, сортировки по крупности не происходит [29]	Максимальная; характерна сортировка смеси по крупности обломков [24]
Форма отложений	Гряды, террасы, поля, конус выноса, сплошной шлейф [1]	Форма в плане, вытянутая по оси оползня [29]	Плоские полосы аккумуляции [29]
Воздействие на препятствие	Ударно-разрушительное воздействие; пульсационные нагрузки [24]	Воздействие путем давления [23, 29]	Ударно-разрушительное воздействие; пульсационные нагрузки [24]

трансформировались в связанные грязевые и грязекаменные сели.

Механизм и причины взаимной трансформации склоновых экзогенных процессов малоизучены и представляют большой научный интерес. Существует значительное количество характеристик и физических величин (характер движения, генетическая связь с поверхностью, структура, плотность, скорость, вязкость и др.), позволяющих идентифицировать предшествующий склоновый экзогенный процесс (эрозию или оползень-поток) на начальной стадии селеформирования в пределах склонового селевого бассейна и активную стадию, собственно селепрохождение, селевой поток.

Оползни-потоки движутся со скоростями не более 1–2 м/с; при скоростях свыше 4 м/с происходит качественный скачкообразный переход к селевому характеру движения. Стоит отметить, что точки бифуркации данного перехода до сих пор точно не определены, однако отдельные исследователи, например, Н.А. Казаков [22] называет причиной их возникновения свойство селевых потоков к самоорганизации.

Наиболее генетически близкими геодинамическими процессами к склоновым селям являются оползни вязкопластического течения, а именно оползни-потоки [1, 19, 21, 23].

### ОТЛИЧИЕ СКЛОНОВЫХ СЕЛЕЙ ОТ ОПОЛЗНЕЙ-ПОТОКОВ

Несмотря на близкую генетическую связь склоновых селей с другими экзогенными процессами и обязательно предшествующую формированию селевого потока стадию развития, на которой движение материала в селевом бассейне происходит в виде иных водно-гравитационных или флювиальных процессов, селевые потоки обладают значительными отличиями, обусловленными особенностями физических свойств селевой массы (табл. 1).

Зачастую при рекогносцировочном обследовании территории чрезвычайно сложно отличить следы прохождения оползня-потока от следов селепрохождения. Автором при выполнении полевых работ в рамках проекта разработки схемы планировочных ограничений к генеральным пла-

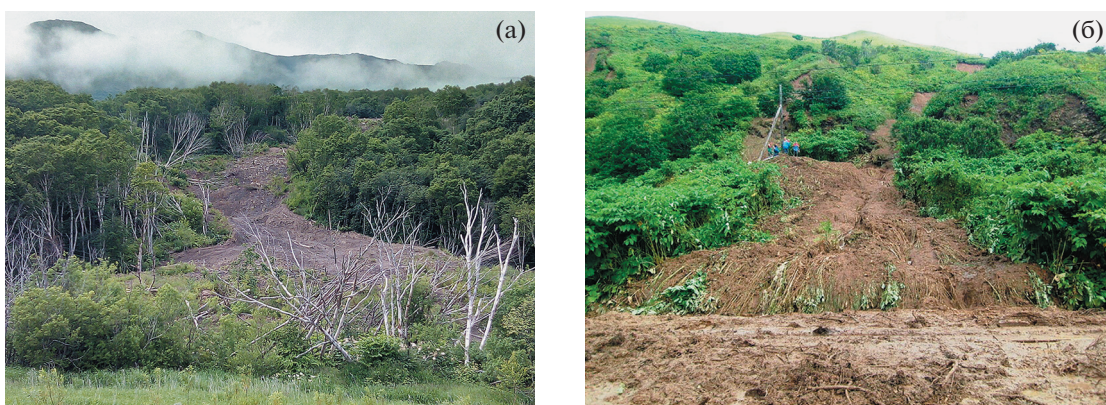


Рис. 3. Оползень-поток на селеопасном участке – (а) и склоновый сел, трансформировавшийся из оползня-потока (в зоне зарождения и верхней зоне транзита отсутствуют следы селя) – (б).

нам населенных пунктов (селевая опасность) Сахалинской области [5] отмечено, что в зоне зарождения склоновый сел (при развитии сдвигового селевого процесса) и оползень-поток образовывали абсолютно идентичные оползневые цирки. Глубина захвата пород составляла от 0.5 до 2.0 м – на толщину деятельного слоя сезонного цикла заморозания-оттаивания грунта. В верхней части зоны транзита следы селевого потока также могут отсутствовать, поскольку на начальном этапе селепрохождения движение твердого материала на границе зоны зарождения и зоны транзита происходит в виде оползня-потока.

В случае формирования селевого потока путем трансформации из движущегося оползня-потока характерные следы селепрохождения (заплески, эродированное русло, геоботанические признаки и др.) могут отмечаться только в нижней зоне транзита, непосредственно перед зоной аккумуляции. В данном случае зона транзита имеет плавные извилистые очертания, которые совпадают с рельефом местности; нередко растительный и почвенный покров здесь значительно не поврежден, что характерно для движения оползней-потоков, которые не обладают высокими скоростями и эродирующей способностью.

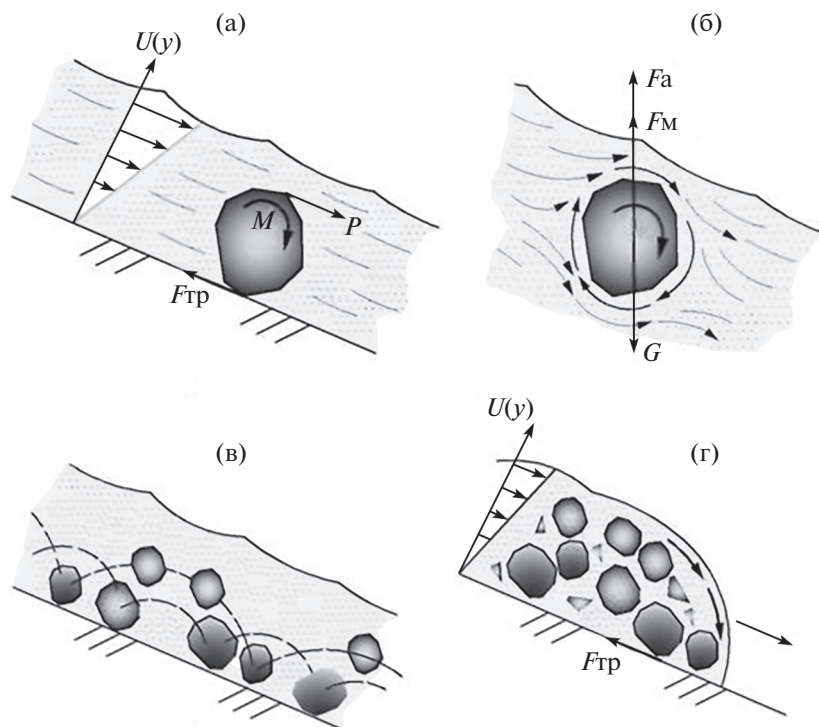
Тем не менее, по наблюдению автора, в зоне аккумуляции отложения склоновых селей имеют характерные признаки пролювиальных селевых отложений: максимально разрушенную структуру материала, распластанный конус выноса, отхождение селевой суспензии, что отличает их от отложений оползней-потоков, которые имеют вытянутую языковидную форму, содержат отдельные конгломераты и долгое время способны удерживать в больших объемах поровую воду, которая отделяется исключительно при радиационном высушивании поверхностных слоев оползневых тел (рис. 3).

При рекогносцировочном обследовании достоверно отличить следы селепрохождения или оползня-потока можно по геоботаническим признакам. Признаками активного селеформирования являются следы заплесков, высота которых в 1.5–2 раза превышает среднюю глубину потока, оббитость коры, повреждения стволов и ветвей, значительная свилеватость (косослойность) и скрученность стволов деревьев, изгибы корневых шеек. Оползень-поток при движении подминает растительность, таким образом, деревья оказываются поваленными или погребенными, часто происходит смещение деревьев вместе с корнем и прикорневым дерновым слоем, притом, что сами деревья зачастую оказываются практически неповрежденными.

Несмотря на схожие следы селепрохождения и движения оползня-потока, данные экзогенные процессы обладают существенными различиями, обусловленные физическими свойствами и агрегатным состоянием вещества движущегося массива.

Движущей средой в селевом потоке служит вода, а точнее, селевая суспензия, даже при значительном содержании твердого материала в потоке (до 70%) [1, 24]. Присутствие жидкого агента переноса минеральных частиц обуславливает ряд особенностей динамики селевого потока: наличие динамической вязкости (уменьшающейся с увеличением скорости потока), волновой характер движения, плавучесть отдельных конгломератов, многократную переупаковку твердых частиц и др.

По своему агрегатному состоянию селевая масса является полиминеральной полидисперсной суспензией, поскольку одновременно может содержать минеральные частицы различной плотности и крупности. Физика подобных консистентных сред значительно отличается от физики жидкостей, реологических и твердых тел, в



**Рис. 4.** Частица рыхлообломочного материала в потоке, движущаяся по дну – (а), частица рыхлообломочного материала в потоке, движущаяся во взвешенном состоянии – (б), траектории движения в потоке частиц рыхлообломочного материала различной крупности и плотности – (в) и схема движения оползня течения – (г).

том числе сыпучих, в связи с тем, что внутри подобных сред, находящихся в движении, происходят многочисленные взаимодействия между твердой фазой и жидким агентом переноса. Именно агрегатное состояние селевой массы обуславливает отличие селевых потоков от оползней-потоков.

В оползневом реологическом теле транспортирующая среда – это конгломерат грязекаменной массы с содержанием воды 10–20%.

Селевая масса обладает псевдопластичностью – свойством, при котором вязкость уменьшается при увеличении напряжения сдвига (скорости движения), что обуславливает значительную скорость и подвижность селевых потоков.

Еще одна отличительная черта селевого потока – его волновой характер движения и наличие в переднем фронте крупной селевой волны (головы селея) [1, 24–27]. Характер движения твердой фракции в селевом потоке определяется суперпозицией сил, воздействующих на твердые частицы, длина и траектория их движения зависят от размера, формы и плотности частиц.

На неподвижную частицу рыхлообломочного материала, расположенного на склоне, набегающий поток оказывает давление. Точка приложения данной силы, а также ее направление определяется распределением скорости потока по глубине  $U(y)$ . Сила  $P$ , в сочетании с силой трения

$F_{тр}$ , образуют момент сил  $M$ , вызывающий вращательное движение частицы в направлении потока (рис. 4, а).

Вращение частицы в потоке создает вихревое движение, что приводит к появлению эффекта Магнуса. С одной стороны вращающейся частицы направление вихря совпадает с направлением обтекающего потока и, соответственно, скорость движения среды с этой стороны увеличивается. С другой стороны частицы направление вихря противоположно направлению движения потока, и скорость движения среды уменьшается. Ввиду этой разности скоростей возникает разность давлений, порождающая поперечную подъемную силу  $F_m$ , которая в сочетании с силой Архимеда  $F_a$  заставляет частицу всплывать в движущемся потоке (рис. 4, б).

Как только частица оказывается во взвешенном состоянии, сила  $F_{тр}$  перестает воздействовать на частицу, движущуюся в потоке, сила вращательного момента  $M$  снижается, а вместе с ней и подъемная сила от эффекта Магнуса  $F_m$ . Частица под действием силы тяжести снова опускается на дно потока. Таким образом, частицы внутри селевого потока двигаются скачкообразно. Длина и траектория их движения зависят от размера, формы, плотности частиц и реологического типа селевого потока (рис. 4, в).



В отличие от селевых потоков, оползни течения не имеют волнового характера движения, поверхность оползневого тела бугристая, а высота их переднего фронта не отличается от общей «глубины потока» (мощности оползневого тела).

Ламинарное течение, присущее оползням-потокам, происходит с небольшими скоростями: порядка нескольких миллиметров или сантиметров в секунду, час, сутки; для склоновых селей характерны скорости порядка нескольких метров или десятков метров в секунду [24, 27].

Структура оползневого тела в процессе движения, как правило, не разрушается, и содержит множество крупных конгломератов даже при обвально-оползневом движении. Движение оползневого тела происходит по генетически связанной поверхности скольжения. В придонных частях оползней-потоков, за счет силы трения о поверхность скольжения, скорости движения значительно снижаются, что приводит к взаимному параллельному смещению отдельных слоев и конгломератов (рис. 4, г). Движение селевых потоков имеет весьма бурный характер и приводит к образованию предельно разрушенной структуры материала внутри потока. При турбулентных режимах движения внутри селевого потока твердые частицы активно перемешиваются. Генетическая связь с поверхностью скольжения при движении селевого потока практически отсутствует.

По-разному взаимодействуют селевые потоки и оползневые тела с подстилающей поверхностью скольжения: селевой поток, обладая значительной эродирующей способностью, увеличивает глубину расчленения рельефа; оползни течения зачастую сглаживают и нивелируют рельеф.

Стоит отметить и различный характер воздействия на препятствие: оползни-потоки действуют на преграды путем давления, селевые потоки — путем удара [28].

Селевой поток, обладая высокими скоростями и волновым характером движения, оказывает значительные динамические и пульсационные нагрузки на препятствия. Стремительный рост давления при взаимодействии переднего фронта селевого потока с препятствием приводит к высоким скоростям деформации и развитию неупругих деформаций, что может вызвать разрушения даже при незначительной величине давления. Пульсационные нагрузки при прохождении селевого потока через препятствие, обусловленные волновым характером движения селя и взаимодействием с отдельными конгломератами в селевом потоке, также способствуют значительному росту скоростей деформации [29].

В отличие от селей оползни-потоки оказывают на препятствие статическое давление. Таким образом, при эквивалентном оползневом и гидро-

динамическом давлении на одно и то же препятствие в равных условиях, селевой поток будет обладать более разрушительным воздействием.

Оползень-поток, в связи с невысокими скоростями движения, позволяет применять оперативные меры реагирования для защиты территории и объектов при активизации оползневых процессов. В качестве оперативных мер могут быть использованы возведенные на пути следования оползня-потока направляющие и удерживающие дамбы гравитационного действия из доступных материалов: местных и привозных грунтов природного или техногенного происхождения, строительного лома, тяжеловесных железобетонных и металлических конструкций, подвижного состава и т.д. Устройство по пути следования оползня-потока канав и приемных котлованов-уловителей, которые значительно увеличивают трение оползневых масс в придонных слоях и снижают глубину потока, также способствует замедлению и остановке движения оползня.

Так, в 2018 г. в селе Горнозаводск (Сахалинская область, РФ) оползень-поток объемом 500 тыс. м<sup>3</sup>, сформировавшийся на породном отвале угледобывающего предприятия, преодолев несколько сот метров по долине ручья, повредил жилой дом и хозяйственные постройки на территории расположенного вблизи фермерского хозяйства. Оползень создал угрозу завала нерестовой реки Лопатинка, через которую также осуществляется водозабор для хозяйственно-питьевого водоснабжения села Горнозаводск; под угрозой экологической и гуманитарной катастрофы оказалось более 4000 человек. Движение оползня было остановлено в зоне аккумуляции путем устройства серий траншей-уловителей [30].

В отличие от оползней-потоков, сели характеризуются своей внезапностью и высокими скоростями движения, что обуславливает при создании инженерной защиты применение исключительно стационарных сооружений: гибких селеудерживающих барьеров, бетонных селерегулирующих сооружений (плотин и барражей), селенаправляющих дамб и селепропусков.

## ВЫВОДЫ

Тесная взаимосвязь склоновых селей с другими склоновыми экзогенными процессами гравитационного, водно-гравитационного и флювиального характера обусловлена:

парагенетическим характером течения экзогенных процессов в пределах склонового селевого бассейна;

единиными очагами твердого питания, представленными различными типами генетических отложений;

общими условиями и факторами формирования экзогенных процессов;

формированием иных водно-гравитационных или флювиальных процессов до начала возникновения склонового селя, что обусловлено особенностью стадийности селепрохождения, а также возможной трансформацией селя из оползня-потока.

Оползни-потоки наиболее генетически близкие из геодинамических процессов к склоновым селям. Несмотря на близкую генетическую связь, селевые потоки обладают значительными качественными отличиями, обусловленными агрегатным состоянием селевой массы и ее физическими свойствами. Селевая суспензия — движущая среда в селевом потоке, и даже при значительном содержании твердого материала в потоке (до 70%), в оползневом реологическом теле транспортирующей средой является конгломерат грязекаменной массы с содержанием воды 10–20%.

Зачастую при инженерных изысканиях данные экзогенные процессы трудноотличимы. В результате неверной идентификации геодинамических процессов значения дальности выброса, площадной пораженности территории, воздействия на препятствия и сооружения инженерной защиты оказываются существенно заниженными, что часто приводит к их повреждению, разрушению и неэффективности.

При полевых исследованиях наиболее характерными признаками, позволяющими достоверно отличить склоновые сели от оползней-потоков, являются геоботанические признаки, характер взаимодействия с подстилающей поверхностью и препятствиями, форма и структура отложений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перов В.Ф.* Селеведение. Учебное пособие. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2012. 271 с.
2. Селеопасные районы Советского Союза / Под ред. С.М. Флейшмана, В.Ф. Перова, М.: Изд-во МГУ, 1976. 308 с.
3. География овражной эрозии / под ред. Е.Ф. Зориной. М.: Изд-во МГУ, 2006. 324 с.
4. *Рыбальченко С.В., Верховов К.В.* Склоновые селевые бассейны и их морфодинамические особенности // Геориск. 2017. № 4. С. 44–49.
5. *Рыбальченко С.В.* Селевая опасность территорий населенных пунктов Сахалинской области и необходимость применения схем планировочных ограничений к генпланам населенных пунктов // Геориск. 2013. № 3. С. 33–42.
6. *Рыбальченко С.В., Верховов К.В.* Формы склоновых селевых бассейнов на морских террасах о. Сахалин и их зависимости от литологического состава горных пород // Геоэкология. 2018. № 4. С. 53–61.
7. *Рыбальченко С.В., Верховов К.В.* Эволюция селевых бассейнов на склонах морских террас побережья Магаданской области и о. Сахалин // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 131–136.
8. *Iverson R.M.* The physics of debris flows // Reviews of Geophysics. 1997. Vol. 35. P. 245–296.
9. *Rengersa F.K., Rapstine T.D., Allstadt K.E., Olsen M., Bunn M., Iverson R.M., Kean J.W., Leshchinsky B., Logan M., Sharifi-Mood M., Obryk M., and Smith J.B.* Real-time monitoring of debris-flow velocity and mass deformation from field experiments with high sample rate lidar and video // Proceedings of the Seventh International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. Golden, CO June 10–13. 2019. Vol. 7. P. 192–198.
10. *Молжигитов С.К.* Экспериментальное исследование воздействия селевого потока на поперечную жесткую преграду // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 6 (часть 2). С. 195–200.
11. *Гагошидзе М.С.* Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. 386 с.
12. *Казаков Н.А., Боброва Д.А., Казакова Е.Н., Рыбальченко С.В.* Исследование динамики селей на экспериментальном стенде // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 4. С. 491–503.
13. *Казаков Н.А., Боброва Д.А., Казакова Е.Н.* Исследование скорости искусственного грязевого селя на лабораторном стенде // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. Т. 2. Вып. 4. С. 405–417.
14. *Шапцер Е.В.* Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований // Тр. ГИН АН СССР. 1966. Вып. 161. 239 с.
15. *Виноградов Ю.Б.* Сдвиговый селевой процесс и возникновение очагов // Селевые потоки. М.: Гидрометеоиздат, 1977. Сб. 2. С. 27–39.
16. *Виноградов Ю.Б.* Эрозионно-сдвиговый селевой процесс // Селевые потоки. М.: Гидрометеоиздат, 1976. Сб. 1. С. 114–122.
17. *Маслов Н.Н.* Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1977. 320 с.
18. *Степанов Б.С., Яфязова Р.К.* Селевые явления Юго-Восточного Казахстана // Селевые процессы и селетехнические сооружения. 2014. Т. 3. 434 с.
19. *Iverson R.M., Reid M.E., and LaHusen R.G.* Debris-flow mobilization from landslides // Annual Review of Earth and Planetary Sciences 1997. 25: 85–138.
20. *Wei W.* Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows. Springer, 2016. 323 p.
21. *Jakob M. and Hungr O.* Debris-Flow Hazards and Related Phenomena. Springer Praxis Books, Subseries: Geophysical Sciences. 2005. 739 p.
22. *Казаков Н.А.* Эволюция селевой геосистемы как процесс самоорганизации упорядоченных структур // Геориск. 2015. № 2. С. 28–30.
23. *Полунин Г.В.* Динамика и прогноз экзогенных процессов. М.: Наука, 1989. 232 с.
24. *Флейшман С.М.* Сели. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 312 с.
25. *Степанов Б.С.* Основные характеристики селевых потоков и селевой масс. Методы измерений. М.: Гидрометеоиздат, 1982. 136 с.

26. *Виноградов Ю.Б.* Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 144 с.
27. *Шеко А.И.* Закономерности формирования и прогноз селей. М: Недра, 1980. 296 с.
28. Формирование оползней, селей, лавин. Инженерная защита территорий / под ред. Г.С. Золотарева, С.С. Григоряна, С.М. Мягкова. М.: Изд-во МГУ, 1987. 180 с.
29. *Рыбальченко С.В.* Динамика развития склоновых селевых бассейнов на морских террасах о. Сахалин. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Санкт-Петербург. 2018. 28 с.
30. *Верховов К.В., Рыбальченко С.В.* Формирование оползней-потоков на угледобывающих предприятиях // Природа. 2019. № 2. С. 70–76.

## The difference between slope debris-flows and landslides-streams

S. V. Rybalchenko<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers, Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>#</sup>E-mail: rybalchenko\_sv@mail.ru

Slope debris flows are widespread, despite this, they represent one of the poorly studied forms of material movement, and most cases of mudslides are interpreted as geodynamic processes that are genetically close to slope debris flows (erosion, landslides-flows, scree, etc.). Due to the erroneous identification of exogenous processes, the values of the ejection range, the area affected by the territory, the impact on obstacles and engineering protection structures are significantly underestimated, which often leads to their damage, destruction and inefficiency efficiency. Based on field observations at the sites of mass formation of slope debris flows in the territory of the Magadan region, Sakhalin Island and the Kuril Islands, the causes of the genetic connection of slope debris flows and other water-gravity and fluvial processes were established, the signs of their paragenesis were determined, including the joint nature of the flow, common foci of origin and solid nutrition, common conditions and factors of formation, mutual transformation. Slope debris flows and landslides-flows are considered as the closest geodynamic processes, their differences are revealed: different aggregate state, the nature of the movement of the solid phase in the flow, interaction with the underlying surface and obstacles. The paper describes the difficulties of identification during the reconnaissance survey of the territory of traces of debris flows and the movement of landslides-flows in the slope debris flow basins. The analysis of geobotanical features (the nature of wood damage and defects), interaction with the underlying surface and obstacles, and analysis of the shape and structure of sediments are proposed as the most reliable signs of identification of mudflow cases.

*Keywords:* slope debris flow, landslide-flow, erosion, paragenesis, debris flow mass

### REFERENCES

1. Perov V.F. *Selevedenie* (Debris-flows studies). *Uchebnoe posobie*. Moscow: Geograficheskii fakul'tet MGU (Publ.), 2012. 271 p. (in Russ.)
2. *Seleopasnye raiony Sovetskogo Soyuz*a (Debris-flows hazardous areas of the Soviet Union). S.M. Fleishmana and V.F. Perova (Eds.). Moscow.: MGU (Publ.), 1976. 308 p. (in Russ.)
3. *Geografiya ovrazhnoi erozii* (Geography of Gully Erosion). E.F. Zorina (Ed.). Moscow: MGU (Publ.), 2006. 324 p. (in Russ.)
4. Rybal'chenko S.V. and Verkhovov K.V. *Sklonovye selevye basseiny i ikh morfodinamicheskie osobennosti* (Slope debris flow basins and their morphodynamic features). *Georisk*. 2017. No. 4. P. 44–49. (in Russ.)
5. Rybal'chenko S.V. *Selevaya opasnost' territorii naselennykh punktov Sakhalinskoi oblasti i neobkhodimost' primeneniya skhem planirovochnykh ogranichenii k genplanam naselennykh punktov* (Debris flow hazard of the territories of settlements of the Sakhalin region and the need to apply schemes of planning restrictions to the master plans of settlements). *Georisk*. 2013. No. 3. P. 33–42. (in Russ.)
6. Rybal'chenko S.V. and Verkhovov K.V. *Formy sklonovykh selevykh basseinov na morskikh terrasakh o. Sakhalin i ikh zavisimosti ot litologicheskogo sostava gornykh porod* (Forms of slope debris flow basins on the sea terraces of the island Sakhalin and their dependence on the lithological composition of rocks). *Geoekologiya*. 2018. No. 4. P. 53–61. (in Russ.)
7. Rybal'chenko S.V. and Verkhovov K.V. *Evolutsiya selevykh basseinov na sklonakh morskikh terras poberezh'ya Magadanskoi oblasti i o. Sakhalin* (Evolution of debris flow basins on the slopes of sea terraces on the coast of the Magadan region and is. Sakhalin). *Geografiya i prirodnye resursy*. 2019. No. 3. P. 131–136. (in Russ.)
8. Iverson R.M. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*. 1997. Vol. 35. P. 245–296.
9. Rengersa F.K., Rapstine T.D., Allstadt K.E., Olsen M., Bunn M., Iverson R.M., Kean J.W., Leshchinsky B., Logan M., Sharifi-Mood M., Obryk M., and Smith J.B. Real-time monitoring of debris-flow velocity and mass deformation from field experiments with high sample rate lidar and video. *Proceedings of the Seventh International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*. Golden, CO June 10–13. 2019. Vol. 7. P. 192–198.



10. Molzhigitov S.K. *Eksperimental'noe issledovanie vozdeistviya selevogo potoka na poperechnuyu zhestkuyu pregradu* (Experimental study of the action of the left flow on a transverse rigid obstacle). *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2017. No. 6 (Part 2). P. 195–200. (in Russ.)
11. Gagoshidze M.S. *Selevye yavleniya i bor'ba s nimi* (Debris flow phenomena and the fight against them). Tbilisi: Sabchota Sakartvelo (Publ.), 1970. 386 p. (in Russ.)
12. Kazakov N.A., Bobrova D.A., Kazakova E.N., and Rybal'chenko S.V. *Issledovanie dinamiki selei na eksperimental'nom stende* (Investigation of debris flow dynamics at the experimental stand). *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*. 2019. Vol. 1. Part. 4. P. 491–503. (in Russ.)
13. Kazakov N.A., Bobrova D.A., and Kazakova E.N. *Issledovanie skorosti iskusstvennogo gryazevego selya na laboratornom stende* (Investigation of the speed of an artificial debris flow on a laboratory bench). *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*. 2020. Vol. 2. Part. 4. P. 405–417. (in Russ.)
14. Shantser E.V. *Ocherki ucheniya o geneticheskikh tipakh kontinental'nykh osadochnykh obrazovaniy* (Essays on the doctrine of the genetic types of continental sedimentary formations). *GIN AN SSSR*. 1966. Part. 161. 239 p. (in Russ.)
15. Vinogradov Yu.B. *Sdvigovyi selevoi protsess i vozniknovenie ochagov* (Shear debris flow process and emergence of foci). *Selevye potoki. Sb.2*. 1977. P. 27–39. (in Russ.)
16. Vinogradov Yu.B. *Erozionno-sdvigovyi selevoi protsess* (Erosion-shear debris flow process). *Selevye potoki. Sb.1*. 1976. P. 114–122. (in Russ.)
17. Maslov N.N. *Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva (opolzni i bor'ba s nimi)* (Soil mechanics in construction practice (landslides and their control)). Moscow: Stroizdat (Publ.), 1977. 320 p. (in Russ.)
18. Stepanov B.S. and Yafyazova R.K. *Selevye yavleniya Yugo-Vostochnogo Kazakhstana. Selevye protsessy i selekhnicheskie sooruzheniya* (Mudflows in South-East Kazakhstan. Mudflow processes and mudflow facilities). Moscow: IG RAN (Publ.), 2014. Vol. 3. 434 p. (in Russ.)
19. Iverson R.M., Reid M.E., and La Husen R.G. Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 1997. 25: 85–138.
20. Wei W. Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows. *Springer*. 2016. 323 p.
21. Jakob M. and Hungr O. Debris-Flow Hazards and Related Phenomena. *Springer Praxis Books, Subseries: Geophysical Sciences*. 2005. 739 p.
22. Kazakov N.A. *Evolutsiya selevoi geosistemy kak protsess samoorganizatsii uporyadochennykh struktur* (Evolution of debris flow geosystem as a process of self-organization of ordered structures). *Georisk*. 2015. No. 2. P. 28–30. (in Russ.)
23. Polunin G.V. *Dinamika i prognoz ekzogennykh protsessov* (Dynamics and forecast of exogenous processes). Moscow: Nauka (Publ.), 1989. 232 p. (in Russ.)
24. Fleishman S.M. *Seli* (Debris flows) Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1978. 312 p. (in Russ.)
25. Stepanov B.S. *Osnovnye kharakteristiki selevykh potokov i selevoi mass. Metody izmereniy* (Main characteristics of debris flows and mudflows. Measurement methods). Moscow: Gidrometeoizdat (Publ.), 1982. 136 p. (in Russ.)
26. Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh* (Sketches about debris flows). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1980. 144 p. (in Russ.)
27. Sheko A.I. *Zakonomernosti formirovaniya i prognoz selei* (Regularities of formation and forecast of debris flows). Moscow: Nedra (Publ.), 1980. 296 p. (in Russ.)
28. *Formirovanie opolznei, selei, lavin. Inzhenernaya zashchita territorii* (Formation of landslides, debris flows, avalanches. Engineering protection of territories). G.S. Zolotareva, S.S. Grigoryana, and S.M. Myagkova (Eds.). Moscow: MGU (Publ.), 1987. 180 p. (in Russ.)
29. Rybal'chenko S.V. *Dinamika razvitiya sklonovykh selevykh basseinov na morskikh terrasakh o. Sakhalin* (The dynamics of the development of slope mudflow basins on the sea terraces of the island Sakhalin). PhD thesis. SPb. 2018. 28 p. (in Russ.)
30. Verkhovov K.V. and Rybal'chenko S.V. *Formirovanie opolznei-potokov na ugledobyvayushchikh predpriyatiyakh* (Formation of landslide flows at coal mining enterprises). *Priroda*. 2019. No. 2. P. 70–76. (in Russ.)