
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 627.141.1

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАРЧЕХОДОВ НА СЕЛЕВЫХ ВОДОТОКАХ о. САХАЛИН

© 2023 г. С. В. Рыбальченко^{1,*}

¹ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,
ул. Максима Горького, 25, Южно-Сахалинск, 693000 Россия

*E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 19.05.2023 г.

В работе рассмотрены региональные особенности явлений карчеходов на селевых реках о. Сахалин, установлены закономерности селеформирования на реках и их селевой режим, изучены факторы формирования карчеходов, характерные для селеносных водотоков о. Сахалин, а также отличия карчеходов на селевых и неселевых водотоках. Именно зональные факторы, обусловленные геопространственным положением и геологической историей развития территории о. Сахалин, формируют природно-территориальный комплекс возникновения карчеходов и заломов на реках остова и обуславливают его особенности. Карчеходы и заломы на селеносных и неселеносных реках Сахалина обладают рядом отличий, обусловленных физическими характеристиками селевой массы и динамикой селевых потоков. Различия формирования карчеходов рассмотрены в качестве особенностей компонентов их открытой геосистемы, в том числе карчей и транспортирующей среды. Это позволяет при полевом рекогносцировочном обследовании идентифицировать перемещенные селем карчеходы по косвенным признакам: значительная переработка древесины с включением большого количества мелкой, грубообработанной фракции в виде щепы, устойчивые несортированные древесно-аллювиальные отложения, поперечное расположение древесных остатков в заламах по оси русла. Отличительной чертой транспортирующей среды на селеносных реках является ее более высокая плотность, что увеличивает ее транспортирующую способность и обуславливает возможность передачи высокого энергетического импульса при движении. При этом даже в относительных небольших руслах могут встречаться достаточно крупные карчи, которые способна перемещать селевая масса.

Ключевые слова: селевой поток, карчеход, заломы, экзогенные процессы на склонах, эрозия берегов рек

DOI: 10.31857/S0869780923040070, **EDN:** DFXYS

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На территории России карчеходы распространены повсеместно, наиболее широко в таежной зоне, лесотундре и зоне широколиственных лесов, реже встречаются в зоне субтропических лесов, лесостепи, в областях высокой поясности. В связи с географическими особенностями (значительной меридиональной протяженностью и разнообразным рельефом) на территории о. Сахалин встречаются таежные, горно-таежные и лесотундровые зоны, а также зоны широколиственных лесов, территории которых наиболее подвержены карчеходам. Территория острова характеризуется высокой густотой речной сети — 1.22 км/км² (при средней густоте речной сети по России — 0.49 км/км²) [12]. Среди регионов России Сахалинская область занимает второе место после Псковской области по густоте речной сети. Высокая густота речной сети и разнообразие специфических ландшафтов обуславливают широкое распространение карчеходов на территории Сахалина.

Карчеходы представляют угрозу для водопропускных сооружений при непосредственном ударном воздействии на их конструктивные элементы, а также при формировании заломов (сплошных завалов русла или водопропускных сооружений древесины) [4]. Это приводит к подпруживанию русла и последующему переливу или прорыву верхнего бьефа, и, как следствие, к повреждению или разрушению водопропускных сооружений (мостов, труб, каналов и др.), размыву дорожных насыпей, дамб, нижнего бьефа, подтоплению и затоплению территории. Наиболее опасны карчеходы и заломы на селитебных территориях в связи с высокой угрозой для населения, объектов жилой застройки и хозяйственной деятельности, а также значительным антропоген-

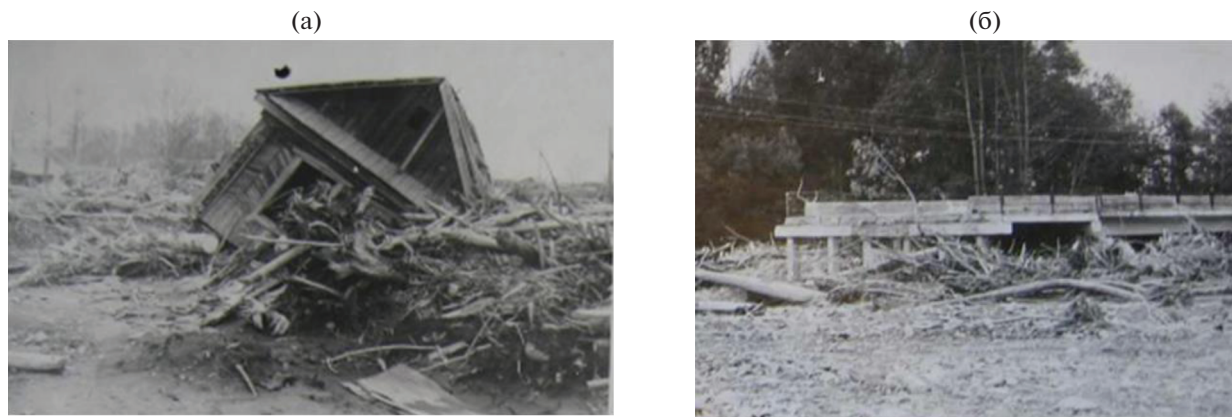


Рис. 1. Повреждение строений (а) и сооружений транспортной инфраструктуры (б) карчеходами в период прохождения тайфуна Филлис 5–6 августа 1981 г. на территории о. Сахалин.

ным влиянием на гидрографическую сеть территории.

В связи с географическими особенностями региона и историей освоения территории большинство населенных пунктов, объектов транспортной инфраструктуры и хозяйственной деятельности расположены по берегам рек или в их устьевой части. Дорожно-транспортная сеть вытянута меридионально вдоль прибрежной полосы и пересекает большое количество водотоков, которые в месте впадения имеют преимущественно широтное расположение.

Данные обстоятельства обуславливают высокую угрозу карчеходов для селитебных территорий и транспортной сети о. Сахалин, а также актуальность исследования подобных явлений. Так, во время прохождения тайфуна «Филлис» 5–6 августа 1981 г. карчеходы являлись одной из главных причин разрушения домов и других строений, мостовых переходов, деформаций русел рек на территории Южного и Среднего Сахалина. Ряд населенных пунктов, расположенных вблизи рек, оказались завалены карчами; строения и мостовые устои разрушались от ударов плывущих карчей (рис. 1).

Только по объектам Сахалинского производственного управления строительства и эксплуатации автомобильных дорог было разрушено 102 автомобильных моста общей протяженностью 2,5 км, а также множество мостов и водопропускных труб на внутрихозяйственных дорогах других ведомств. Было отмечено, что наиболее активно карчеходы возникали именно на селеносных реках. В настоящее время также отмечается подобная тенденция, особенно в период сезонных паводков и выхода глубоких летних циклонов на территорию острова.

На территории о. Сахалин наибольшую опасность карчеходы на селеносных реках представ-

ляют для малых водопропускных сооружений, в том числе водопропускных труб и однопролетных мостовых сооружений с низкой высотой подмостового пространства (согласно СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» на 0,5 м выше максимального расчетного уровня паводка 1% обеспеченности). Зачастую в связи с отсутствием возможности пропуска селевого потока и карчехода эти водопропускные сооружения оказываются полностью забиты, а их конструктивные элементы разрушены, либо подмыты [14].

Проблема угрозы карчеходов на селеносных реках актуальна и для соседних регионов со схожими природными условиями. Так, в Японии многие населенные пункты расположены в устьях залесенных горных селеносных рек. Во время крупных наводнений или в период селепрохождения эти потоки переносят высокие концентрации карчей, которые резко увеличивают их разрушительную силу [20].

Цель данного исследования — изучение региональных особенностей прохождения карчеходов на селеносных водотоках о. Сахалин для дальнейшей возможности теоретического обоснования разработки рекомендаций по их предотвращению и снижению ущерба.

Для исследования региональных особенностей необходимо установить закономерности селеформирования на реках Сахалина и их селевой режим, изучить факторы формирования карчеходов, характерные для селеносных водотоков острова, а также отличия карчеходов на селевых и неселевых водотоках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разные годы изучению формирования карчеход и заломов были посвящены работы В.Н. Домогашева, В.Е. Сергутина, Ю.Ф. Чемякова, Н.С. Евсеева, С.Р. Чалова [5, 6, 15, 16], в кото-

рых были освещены условия формирования карчеходов и заломов, а также руслоформирующая роль заломов древесной растительности. Из зарубежных исследований аналогичным вопросам были посвящены работы R.L. Beschta, G.E. Grant, F. Iseya, H. Ikeda, Y. Ishikawa, T.E. Lisle, G.W. Lienkaemper, F.J. Swanson и др. [17–23].

Ю.Ф. Чемяков один из первых выполнил работы по классификации заломов на основе их морфологических типов и впервые описал древесные аллювиальные отложения, обладающие отсутствием в них сортировки материала, слабой окатанностью, своеобразной текстурой и формой отдельных компонентов, отсутствием слоистости. Эти признаки древесных аллювиальных отложений характерны для наносоводных потоков, однако, ранее при исследовании карчеходов и заломов на реках не относились к признакам проявления селевых процессов и селеносности рек.

Отдельно стоит отметить значительный объем экспериментальных данных, накопленный при моделировании явлений карчеходов и заломов в искусственных каналах. В разные годы серии подобных экспериментов проводились на базе Университета штата Орегон и Лесной службы Тихоокеанской северо-западной исследовательской станции (США) [26]. Практические экспериментальные данные с крупноразмерными моделями карчей были получены В.Н. Домогашевым при разработке методов проектирования мостовых переходов в условиях карчехода, которые впоследствии нашли отражение в нормативной технической литературе. Отдельные эксперименты с использованием влекомых наносов, имитирующих селевые паводки и наносоводные потоки низкой плотности, проводились Университетом Цукуба и Научно-исследовательским институтом общественных работ (Япония) под руководством F. Iseya и H. Ikeda [19]. В целом специализированные исследования движения карчеходов на селеносных реках проводились разными авторами лишь эпизодически в рамках смежных исследований карчеходов или селевых процессов.

В ходе упомянутых экспериментальных работ был накоплен и проанализирован значительный массив данных, на основе которого уточнены общие закономерности вовлечения в движение карчеходов и заломов, а также динамика и взаимодействие самих карчей в потоке, что позволило автору настоящей статьи с привлечением собственных полевых данных провести сравнительный анализ явлений карчеходов на селеносных и неселеносных водотоках на территории о. Сахалин.

Автором с 2008 г. проведены многолетние полевые исследования селеносных водотоков на территории о. Сахалин, а также формирующихся на них карчеходов, в том числе в периоды паводков и селепрохождения. Работы проводились в

рамках научной деятельности, научно-технического сопровождения инженерных изысканий в части опасных экзогенных процессов. В ходе указанных работ были выполнены наблюдения за возникновением и развитием карчеходов и заломов, измерение параметров карчей, а также исследование селевых процессов; был проведен анализ массивов данных по обсуждаемой проблематике, полученный отечественными и зарубежными исследователями [17–26], а также в рамках собственных экспериментов [11]. Проведен сравнительный анализ явлений карчеходов и заломов на селеносных реках в других регионах на основе отдельных эпизодических наблюдений, в том числе в границах криолитозоны на территории Магаданской области и Станового нагорья.

КАРЧЕХОДЫ НА РЕКАХ О. САХАЛИН

Карчеходы и заломы наиболее характерны для территории Среднего и Южного Сахалина. Территория Северного Сахалина наименее подвержена данным явлениям в связи с преобладанием обширных участков равнинной местности лесотундры с более низким бонитетом произрастания древесной корчехформирующей растительности, уменьшением общего количества осадков и циклонической активности, и, как следствие, более низкой водностью водотоков.

Породный состав карчеходов на территории Сахалина разнообразен и зависит от природного ландшафта, в связи с чем условно можно выделить карчеходы широколиственных пойменных лесов с преобладанием ивы, тополя, реже березы и осины, а также карчеходы хвойных горно-таежных, в отдельных случаях таежных лесов с преобладанием пихты, ели и лиственницы. Параметры карчей зависят от бонитета участка произрастания, а также лимитирующих факторов (патогенов и вредителей леса, лесных пожаров, ураганов и т.д.), ограничивающих максимальные размеры древостоя.

Наиболее крупный древостой смешанных лесов может достигать 30–35 м в высоту при диаметре ствола до 0.9 м. Его размеры значительно снижаются в прибрежных зонах в зоне воздействия штормовых ветров. На обширных открытых прибрежных участках, например, на территории Поронайской низменности, высота древостоя редко превышает 20 м при диаметре до 0.5 м и часто имеет искаженную флаговую архитектуру. Из-за особенностей бонитета, лимитирующих факторов, архитектуры корчехобразующих пород и переработки карчи в потоке на территории Сахалина размеры карчей редко превышают 10–12 м в длину при диаметре до 0.8–0.9 м, при этом диаметр мильдю корня карчи может достигать 2–3 м, что значительно влияет на общую динамику карчи в потоке.



Рис. 2. Поступление твердой фазы и древесной растительности в русло при развитии склоновых процессов в бортах долины р. Кормовая (Средний Сахалин, 2018).

На крупных равнинных реках карчеходы отмечаются ежегодно, что связано с сезонными паводками и повторным переотложением карчей и заломов в русловой и пойменной части. Карчи преимущественно движутся в незагруженном режиме транспортировки (без взаимодействия друг с другом) и занимают менее 10% площади поверхности потока (классификация режима транспортировки карчехода приведена согласно [26]). Во время крупных паводков, сопряженных с формированием наносоводных потоков и селевых паводков (периодичностью раз в 5–7 лет), отмечается полузагруженный режим движения карчехода (площадь карчехода составляет 10–30%) с большим количеством контактных взаимодействий карчей и их взаимным влиянием друг на друга, что часто сопровождается формированием заломов. В процесс карчехода вовлекается значительное количество свежей древесины с территории подрабатываемых надпойменных террас и берегов. В составе карчехода отмечается значительное содержание крупных, не переработанных карчей и мелких растительных остатков.

На горных реках карчеходы отмечаются исключительно при крупных паводках либо селепрохождении. Частота формирования карчехода достигает раз в 3–5 лет. Карчи движутся в перегруженном режиме (площадь карчехода составляет более 33%) единым массивом, при селепрохождении в одном конгломерате вместе с селевой массой. Заломы формируются гораздо чаще и приурочены к участкам замедления потока: при стесненном или выположенном русле, меандрировании, увеличении шероховатости русла и др.

На горных водотоках мелкие древесные остатки практически сразу выносятся по руслу и не аккумулируются. Крупные карчи, напротив, даже при значительной переработке долгое время со-

храняются в заламах. По геохронологическим данным лихенометрии возраст отдельных заломов достигает 10–15 лет.

СЕЛЕВОЙ РЕЖИМ РЕК О. САХАЛИН

Большинство рек и малых водотоков Сахалина являются селеносными, за исключением наиболее крупных равнинных рек (Тынь, Поронай, Найба, Сусуя), долины которых приурочены к системе Центрально-Сахалинского тектонического разлома. Источником твердого питания селей служат современные отложения различного генезиса (делювиальные, пролювиальные, аллювиальные, прибрежные морские), сложенные раздельно зернистыми или слабо литифицированными горными породами, а также горные породы аналогичного литологического состава более древних свит.

В горной местности селеносность рек обусловлена широким развитием склоновых геодинамических процессов в бортах долин (оползней, осыпей, склоновых селей и др.), сложенных относительно слабыми горными породами (рис. 2). Геодинамические процессы обеспечивают поступление твердой фракции в тальвеги и русла, которая впоследствии выносятся при паводках в виде селей и влекомых наносов. На данных участках наиболее развит сдвиговый и эрозионно-сдвиговый селевые процессы, которые приводят к формированию связанных грязевых и грязекаменных селей.

Селевой режим горных рек и малых водотоков о. Сахалин характерен своей циклическостью. В большинстве случаев период селеформирования предшествует периоду накопления потенциального селевого массива при активном выветривании горных пород в очагах твердого пи-



Рис. 3. Древесно-грунтовые (пролювиальные) отложения на селеносном водотоке. (Автодорога Южно-Сахалинск—Оха. Средний Сахалин, 2018).

тания, которые при последующем обводнении вовлекаются в селевой процесс. При выпадении обильных осадков могут отмечаться как единичные, так и массовые случаи селеформирования в зависимости от степени предварительного выветривания и обводнения потенциальных селевых массивов в пределах селевых бассейнов. Таким образом, геологический фактор играет определяющую роль, а гидрометеорологический подчиненную и служит триггером в процессе селеформирования [8, 10].

Наибольший вклад в процесс формирования потенциальных селевых массивов вносят силы физического, а именно морозного выветривания. В связи с чем в большинстве случаев селеформирования глубина захвата горных пород не превышает глубины деятельного слоя цикла сезонного замораживания-оттаивания грунтов.

Частота селеформирования в горной местности в среднем составляет 1 раз в 3–5 лет для небольших селевых бассейнов (врезов, долин ручьев), для крупных селевых бассейнов 1 раз в 5–10 лет (для малых рек) [8, 10, 13] (рис. 3). В отдельных молодых и активно растущих селевых бассейнах сели могут отмечаться ежегодно, также возможно формирование нескольких селей в течение года во время весенних и летне-осенних пиков активизации геодинамических процессов.

На равнинных реках острова отмечается формирование селей в виде наносоводных потоков, реже — связанных селей. Истоки большинства равнинных рек на территории острова являются селеносными, поскольку приурочены к макросклонам основных горных сооружений и распо-

ложены в горной местности. На таких водотоках в их равнинной части отмечается формирование наносоводных потоков при движении и осветлении селей по руслу, сформировавшихся в горной местности. В редких случаях отмечается выход в предгорную долину связанных грязевых и грязекаменных селей больших объемов. Также на равнинных участках предгорных долин отмечается формирование наносоводных потоков при развитии эрозионно-транспортного селевого процесса во время паводков. Прогрессирующий рост содержания влекомых наносов в потоке приводит к активной абразии берегов, глубинной эрозии русла и срыву его аллювиальной отмытки. Происходит формирование наносоводного селевого потока, сопряженного с вовлечением значительного объема руслового и пойменного аллювия в селевой процесс. Наносоводные потоки формируются на равнинной местности острова ежегодно в период паводков. Один раз в 10–15 лет происходит формирование наносоводных потоков значительных объемов, которые могут достигать нескольких сотен тысяч кубических метров.

ФАКТОРЫ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАРЧЕХОДОВ

Среди основных факторов формирования карчеходов следует выделить геолого-геоморфологические, гидрометеорологические, геоботанические и антропогенные. Данные факторы общие для всех территорий, подверженных формированию карчеходов, однако благодаря региональным

особенностям территории о. Сахалин они определяют специфические условия возникновения карчеходов.

Геолого-геоморфологические факторы обусловлены историей формирования макрорельефа острова при активном тектоногенезе и режимом накопления осадков. В макрорельефе территории Сахалина выделяются две крупные горные системы Восточно- и Западно-Сахалинские горы, имеющие субмеридиальную протяженность, расположенные вдоль восточного и западного побережья острова. Орогенез макрорельефа Сахалина активно протекал в период формирования пояса Альпийской складчатости, особенно активно 1.8 млн л.н., наряду с формированием макрорельефа центральной впадины Японского моря, Татарского пролива и островодужной системы Японских островов. В связи с тем, что в геологическом отношении Сахалинский террейн формировался преимущественно морскими глубоко-водными и мелководными осадками, в геологическом строении острова преобладают третичные осадочные горные породы (аргиллиты, алевролиты, пески, глины, песчаники и др.), со спорадическим распространением магматических и метаморфических горных пород [1, 2]. Таким образом, наиболее крупные горные системы острова сложены терригенными, частично метаморфизованными толщами верхнемелового, палеогенового и неогенового возрастов, смятыми в складчатые структуры при активном орогенезе. Горные породы сильно дислоцированы и характеризуются слабыми фильтрационными свойствами, хорошей размокаемостью, размываемостью (неразмывающие скорости 2.1–5.5 м/с) и набухаемостью, низким сцеплением и углом внутреннего трения, низкой стойкостью к выветриванию и др., что приводит к высокой частоте и глубине расчленения рельефа [2]. Геолого-геоморфологические факторы способствуют тому, что горные сооружения прорезаны множеством долин субширотного простиранья.

Большинство рек на о. Сахалин относится к категории горных и представлено V-образными долинами с крутыми бортами и значительным продольным уклоном русла. Диапазон водосборных бассейнов лежит в интервале абсолютных высот 350–1200 м при глубине расчленения рельефа 250–1000 м. Реки имеют малую длину, большие относительные высоты водосборов и уклоны русел. Площади большинства речных бассейнов составляют 1–15 км², длина водотоков – 3–10 км; средневзвешенный уклон русла – 40–60‰; максимальный уклон – более 100‰; уклоны водосборов малых рек могут достигать 500‰. Данные обстоятельства определяют малое время добегания паводочной волны при выпадении сильных осадков, вследствие чего на этих реках наблюдается резкий и сильный подъем уровней

воды, значительные скорости и деформации русла, что способствует вовлечению древесной растительности пойменных лесов в водный поток.

Стоит отметить, что особенности геологического строения и литологического состава обуславливают активное вовлечение горных пород в опасные склоновые экзогенные процессы гравитационного, водно-гравитационного и флювиального типа (сели, оползни, эрозия и др.). Активное развитие склоновых экзогенных процессов в бортах водосборных бассейнов обеспечивает поступление древесины в русла и тальвеги, которая впоследствии выносятся паводками и селевыми потоками, а также твердой фазы из очагов твердого питания в водный поток. В результате плотность паводковых потоков зачастую приближается к плотности наносоводных потоков. При этом резко возрастает их эродирующая и абразивная способность, что существенно влияет на русловые деформации и вовлечение карчей. Потоки высокой плотности обладают повышенной транспортирующей способностью относительно карчей, поскольку увеличивают влекущую силу потока, воздействующую на мидель корневой системы карчи, а также увеличивают плавучесть карчи в связи с увеличением выталкивающей архимедовой силы; зачастую в наносоводных потоках карчи движутся в стесненных условиях. Наносоводные потоки способны транспортировать карчи даже при относительно небольших уровнях путем ее волочения по дну до момента всплытия. Геологическое строение долин селеносных рек отличается более мощными отложениями незадернованного руслового и пойменного аллювия в виде побочней и осередков, которые активно вовлекаются в движение при прохождении паводка или селя и многократно переотлагаются.

В отличие от полноводных рек основным источником поступления карчей для малых водотоков Сахалина служат не русловые процессы, сопряженные с подмывом и абразией берегов, а активно протекающие в бортах водосборного бассейна склоновые экзогенные процессы, обусловленные геологическими особенностями региона.

Гидрометеорологические факторы обусловлены геопространственным окраинным положением о. Сахалин, расположенным в непосредственной близости от траектории движения тропических циклонов.

В течение года над Сахалином проходит около 100 циклонов, вызывающих усиление ветра, пасмурную с осадками погоду, а в конце лета и начале осени наблюдаются выходы глубоких тропических циклонов (тайфунов), зарождающихся вблизи экватора. Прохождение тайфунов сопровождается штормовыми ветрами, достигающими скорости более 40 м/с, и сильными дождями, за несколько



Рис. 4. Заломы из карчей широколиственных пород в подмостовом пространстве; р. Гребенская (Макаровский район, Средний Сахалин, 2021).

дней часто выпадает больше месячной нормы осадков [7].

Так, например, при прохождении тайфуна в сентябре 1947 г. в г. Долинск за сутки выпало 222 мм осадков при месячной норме 120 мм, в г. Южно-Сахалинск — 107 мм при месячной норме 106 мм [13]. Во время тайфунов “Оджин” и “Филлис” сумма осадков за период с 1 по 7 августа 1981 г. в г. Макаров составила 215 мм (при месячной норме 99 мм), в Южно-Сахалинске — 220 мм. За этот же период в горной местности в пределах Сунайского хребта на абсолютных отметках 400–500 м была зафиксирована сумма выпавших осадков 800–1200 мм [9].

Годовые суммы осадков в днищах долин и на морском побережье Сахалина изменяются от 400–500 мм на севере до 800–1200 мм на юге (в горах средние значения выпавших осадков в зависимости от высотной зоны колеблются в пределах 1500–2000 мм и в отдельные годы могут превышать 3000 мм) [3, 9]. В теплый период выпадает 65–80% годовой суммы осадков.

При прохождении мощных циклонов наблюдается значительное увеличение годового стока рек. Так, при среднегодовом стоке 57.2 км³/год в 2015 г. речной сток в Сахалинской области составил 82.7 км³/год (на 44% выше среднегогодового показателя). Увеличение суммарного годового речного стока произошло в связи с выходом на территорию острова 14 тропических циклонов в июле-октябре 2015 г. Наибольшие осадки на территорию принесли экс-тайфун “Чен-Хом”, “Кило”, “Дуцзюань”, экс-тропический циклон “Чой-Ван”.

Муссонный климат и циклоническая активность на территории острова приводят к частому формированию паводков в летний и осенний пе-

риод. Во время паводков происходит затопление стариц и пойм, что сопряжено с выносом в русло большого количества древесины и последующим формированием карчеходов и заломов.

За последнее время в связи с повышением температуры мирового океана на территории о. Сахалин циклоническая активность значительно усилилась. Так, за последние 5 лет в летне-осенний период отмечалось более 4 ливневых дождей вероятностью свыше 10%, что было связано с проявлением деятельности тропических циклонов. Учитывая общую тенденцию повышения температуры мирового океана, циклоническая активность и частота карчеходов на территории острова в ближайшее время будут стремительно возрастать.

Геоботанические факторы формирования карчеходов зачастую определяются породным составом карчей. Пойменные леса Сахалина преимущественно представлены типичными широколиственными лесами с преобладанием влаголюбивой растительности (ольха и ива). Данные породы произрастают на поймах и старицах рек, несмотря на активное развитие селевых процессов. Они легко переносят воздействие паводков, влекомых наносов, заиливание корневой шейки, которые не приводят к гибели древостоя, и непосредственное воздействие селевых потоков, что формирует специфические прижизненные пороки древесины в виде свилеватости стволов и ветвей, повышающие их устойчивость. В редких случаях в горно-таежном поясе отмечаются карчеходы хвойных пород.

Стоит отметить, что карчеходы широколиственных пойменных лесов чаще приводят к формированию заломов и представляют наибольшую опасность для водопропускных сооружений на территории о. Сахалин (рис. 4).

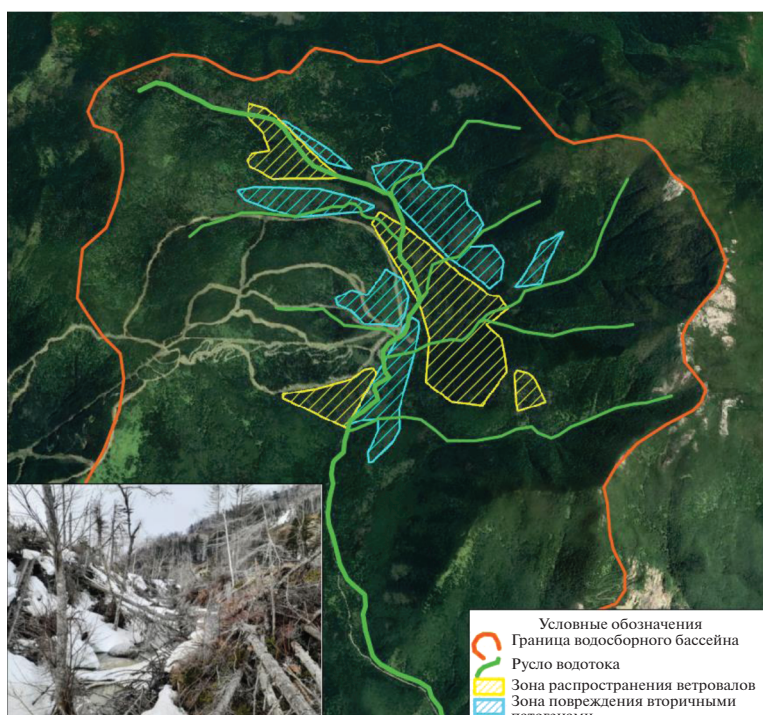


Рис. 5. Потенциальные источники поступления карчей на примере долины р. Марковка (Южный Сахалин, 2021).

Древостой широколиственных пород имеет густую раскидистую крону с мощными ветвями, при избыточном содержании азота в почве отмечается многостольность. Карчи широколиственных пород при стесненном движении в русле быстро формируют ядро залома, в котором происходит последующее активное отложение мелких обломков древесины, влекомых наносов и селевой массы, что приводит к созданию естественной древесно-грунтовой плотины, подпруживающей русло. При движении в потоке карчи широколиственных пород долгое время сохраняют большую часть скелетных ветвей кроны за счет высокой гибкости древесины, свилеватости и относительно большого диаметра скелетных ветвей, что предопределяет более равномерное распределение массы и инерции. Скелетные ветви кроны сохраняются даже при взаимодействии с препятствиями, в том числе береговыми устоями, опорами и пролетами мостов.

Карчи хвойных пород при движении в потоке и взаимодействии с препятствиями теряют большую часть ветвей, таким образом, хвойные карчи состоят из ствола и миделью корня.

Кроме того, существенный вклад в объем поступающих в русло карчей вносят обширные ветровалы, формирующиеся во время многочисленных циклонов при модуляции ветра в V-образных долинах и пригребневых зонах. В дальнейшем ветровальная древесина переносится склоновыми процессами и временными водотоками в тальвег

водосборного бассейна (рис. 5). Помимо ветровальной древесины, значительные площади сухостоя формируются при поражении леса патогенами, в том числе вторичными, которые при развитии на участках ветровала распространяются на окружающие лесные массивы.

Антропогенные факторы формирования карчеходов характерны для всех урбанизированных и селитебных территорий и выражаются в воздействии на гидрографическую сеть территории, что приводит к следующим последствиям:

- существенное увеличение и перераспределение склонового стока при сведении почвенно-растительного слоя, вертикальная планировка территории и создание площадей с твердым покрытием;
- переформирование русел и пойм при застройке прибрежной зоны;
- снижение пропускной способности живого сечения при строительстве каналов и прочих водопропускных сооружений, пересечении водотоков коммуникациями и инженерными сетями надземным способом при прокладке по эстакадам, подмостовым пространствам или по дну;
- значительная захламленность русел и пойм твердыми отходами (бытовыми, производственными, строительными), которые слабо подвержены биodeградации, способны накапливаться в значительных объемах и активно вовлекаться в формирование заломов при паводках.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАРЧЕХОДОВ НА СЕЛЕНОСНЫХ РЕКАХ САХАЛИНА

Формирование карчеходов и заломов на селеносных и неселеносных реках Сахалина обладает рядом отличий, обусловленных физическими характеристиками селевой массы и динамикой селевых потоков. Рассматривая явление карчехода как открытую геосистему, в которой непрерывно происходит обмен веществом и энергией между ее компонентами и окружающей средой, можно выделить ее основные компоненты: собственно карчи, транспортирующую среду, русло (как геоморфологическую единицу) и вмещающую геологическую среду. Определение особенностей карчеходов на селеносных реках наиболее удобно выполнить на основе определения особенностей каждого из компонентов указанной геосистемы. Отличительные черты селевых русел и вмещающей их геологической среды рассмотрены выше. Особенности карчей и транспортирующей их среды стоит рассмотреть более подробно в качестве компонентов геосистемы, учитывая их физические особенности и вклад в вещественно-энергетический баланс геосистемы.

Карчи в виде транспортируемых и отложившихся древесных остатков являются одним из главных источников твердого питания карчеходов. Необходимо отметить, что карчи, в отличие от вовлекаемые в поток обломков горных пород (валуны, песок, галька и др.), стоит выделять в качестве отдельного компонента геосистемы по ряду признаков.

Плотность отдельных минеральных частиц в потоке может колебаться от 1.2 т/м^3 для пористых вулканогенных пород до 3.2 т/м^3 для основных магматических и метаморфизованных пород, а крупность минеральных частиц от 0.01 мм для глинистых частиц до глыб из скальных горных пород размером в несколько метров в поперечнике. В связи с этим селевую массу относят к полиминеральным полидисперсным суспензиям. Обломки горных пород в русле, как правило, обладают значительной окатанностью, их форма стремится к форме гравитационного равновесия: либо шарообразной, либо кубовидной (при слабой окатанности). Обломки слоистых горных пород имеют эллипсоидную либо параллелепipedную форму.

В отличие от обломков горных пород, древесные остатки обладают значительно меньшей и более однородной плотностью, которая в зависимости от породного состава древесины колеблется в пределах $0.45\text{--}0.65 \text{ т/м}^3$, что обеспечивает их плавучесть. Тогда как взвешенные минеральные частицы подвержены лишь медленному осаждению в стесненных условиях и не обладают истинной плавучестью. Относительно более однородна

и размерность древесных обломков, соотношение размеров наиболее крупных карчей ($10\text{--}12 \text{ м}$) и мелких переработанных древесных обломков ($1\text{--}2 \text{ см}$) редко превышает $1: 1500$, при том, что аналогичное соотношение крупности минеральных частиц горных пород (от 0.01 мм до $2\text{--}3 \text{ м}$) в русле может составлять $1: 200000$. Стоит отметить, что древесные обломки за счет сосудистого слоистого строения древесины, даже будучи подверженные значительной переработке, в потоке сохраняют вытянутую цилиндрическую форму. Таким образом, однородность плотности, размеров, формы и свойство плавучести древесных обломков относительно минеральных частиц и их значительный вклад в твердое питание потока позволяют их выделить в отдельный элемент геосистемы карчехода.

Отличительные особенности карчей на селеносных реках преимущественно выражаются в их более существенной переработке потоком. Вне зависимости от породного состава карчехода при транспортировке карчей селем, размер их редко превышает $5\text{--}7 \text{ м}$ за счет перемалывания древесины твердой грубодисперсной фракцией селевой массы. В древесных остатках селевых потоков отмечается повышенное содержание грубо переработанной древесины мелкой фракции в виде щепы, что позволяет идентифицировать древесно-аллювиальные отложения селевого потока от аналогичных отложений паводков и наносовых потоков.

Таким образом, физика переноса древесины отличается от физики переноса осадка из-за различий в форме, плотности и размере подвижных компонентов. Древесина имеет форму стержня, а не сферы, поэтому сила, действующая на площадь поперечного сечения частицы, больше для древесины, чем для осадка. Поскольку древесные обломки удлиненные, а их длина часто совпадает с шириной канала транспортировки, вероятность их столкновения с краем русла выше, чем у неорганических фрагментов, которые часто на много порядков меньше ширины канала. Более высокая вероятность столкновения с краем русла повышает вероятность того, что древесина будет отложена на неглубоких участках или застрянет у дна или береговых препятствий.

Отличительная черта транспортирующей среды на селеносных реках — ее более высокая плотность, которая может составлять $1.1\text{--}2.5 \text{ т/м}^3$, что увеличивает ее транспортирующую способность и обуславливает возможность передачи высокого энергетического импульса при движении. При этом даже в относительно небольших руслах могут встречаться достаточно крупные карчи, которые способна транспортировать селевая масса.



Рис. 6. Древесно-минеральные (пролювиальные) отложения на селеносном водотоке. (Автомобильная дорога Южно-Сахалинск—Оха. Средний Сахалин, 2018).

Момент захвата карчи и вовлечения ее в поток на селеносных реках возникает до момента флотации (всплытия) карчи, который, как правило, возникает при достижении потоком уровня, равного радиусу карчи либо милдью корня карчи (при его наличии). За счет высокого давления селевого потока до момента всплытия карча в селевом потоке перемещается волочением.

В отличие от водных потоков, в селевом потоке карчи движутся в загруженном режиме совместно с селевой массой, поэтому их осаждение происходит при остановке самой селевой массы, в том числе в селевых грядах по краям селевого русла. Отложение карчей в водном потоке часто может происходить при взаимодействии с местными препятствиями либо при повышении шероховатости русла вследствие взаимодействия милдью корня карчи с дном. При транспортировке карчи в селевом потоке давление потока значительно превышает местные сопротивления и предел прочности древесины. Поэтому даже в относительно узких V-образных долинах горных селевых водотоков с коренным дном, сложенным грубодисперсным материалом, даже крупные карчи зачастую перемалываются селевой массой и проталкиваются ее импульсным воздействием по руслу до момента аккумуляции самого селевого потока.

В связи с совместным движением карчей и селевой массы в загруженном режиме отложения карчеходов на селевых водотоках не отличаются сортировкой древесных остатков по длине русла,

что характерно для прочих рек, где крупность отложений уменьшается по длине реки.

Древесно-аллювиальные отложения селевых водотоков формируют обширные заломы из несортированного материала, которые сохраняются длительное время и в период паводков приводят к значительному переформированию русла и образованию русловых островов (рис. 6).

Поскольку карчи в селевых потоках движутся в загруженном режиме, большая их часть отлагается в поперечном направлении в осевой части и в продольном направлении по периферии русла в селевых грядах. Данная закономерность обычно наблюдается на неселеносных водотоках при высокой плотности карчехода и загруженном режиме транспортировки, что также подтверждено экспериментальными моделями в искусственных каналах. В целом экспериментальные модели движения и отложения карчехода в загруженном режиме, описанные ранее, подтверждены автором при полевых наблюдениях за проявлениями карчехода на селеносных реках о. Сахалин.

Стоит отметить, что формирование карчеходов значительных объемов на реках Сахалина сопряжено исключительно с селепроявлением.

ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что наиболее подвержены формированию карчеходов на территории о. Сахалин селеносные реки, представленные малыми горными водотоками, а также реками, расположенными в предгорной

местности. Селевой режим данных водотоков чрезвычайно активен. Это обусловлено наличием больших уклонов и геологическим строением водосборных бассейнов, сложенных раздельнозернистыми и слаболигифицированными горными породами, а также муссонным климатом и активной циклонической деятельностью на территории острова.

Среди основных факторов формирования карчеходов выделены геолого-геоморфологические, гидрометеорологические, геоботанические и антропогенные. Данные факторы общие для всех территорий, подверженных формированию карчеходов. Однако благодаря региональным особенностям территории Сахалина они определяют специфические условия возникновения карчеходов на острове.

Макрорельеф территории и геологическое строение основных горных сооружений Сахалинского террейна, сложенных преимущественно морскими отложениями, способствуют активному развитию склоновых экзогенных процессов в бортах водотоков, которые обеспечивают поступление в русло и тальвеги рек твердой фазы и древесной растительности, что приводит к их селеопасности. Также к региональным особенностям стоит отнести большое количество жидких осадков, годовые суммы которых в долинах и на побережье составляют 800–1200 мм, а в горной местности могут достигать 1500–2000 мм. К региональным геоботаническим особенностям стоит отнести породный состав карчей, представленный преимущественно широколиственными породами (ива и ольха), которые в отличие от карчеходов хвойных пород более склонны к формированию заломов и наиболее опасны для водопропускных сооружений.

Таким образом, именно зональные факторы, обусловленные геопространственным положением и геологической историей развития территории острова, формируют природно-территориальный комплекс возникновения карчеходов и заломов на реках Сахалина, и обуславливают его особенности. Особенности различия формирования карчеходов на селевых и неселевых водотоках о. Сахалин рассмотрены на примере особенностей компонентов их открытой геосистемы (карчей и транспортирующей среды). Это позволяет при полевом рекогносцировочном обследовании идентифицировать по косвенным признакам карчеходы, перемещенные селем: значительная переработка древесины с включением большого количества мелкой, грубообработанной фракции в виде щепы, устойчивые несортированные древесно-аллювиальные отложения, поперечное расположение древесных остатков в заламах по оси русла.

Несмотря на высокую опасность проявления карчеходов на селеопасных реках о. Сахалин, вопрос комплексной инженерной защиты объектов и территории от данных процессов остается нерешенным. Профилактические мероприятия по расчистке русел и пойм от древесных остатков и пойменной растительности имеют существенный экологический аспект, поскольку карчи играют важную роль в формировании экосистем нерестилищ и путей миграции к ним анадромных видов рыб, в том числе лососевых, имеющих важное хозяйственное значение. В данном случае профилактическая расчистка допустима только при непосредственной угрозе нанесения ущерба объектам и территориям при проявлении карчехода.

Особое внимание стоит уделять обеспечению пропускной способности карчехода через малые гидротехнические сооружения для недопущения их повреждения либо разрушения, а также вопросам своевременного устранения последствий карчеходов, в том числе разборе заломов в русле и на гидротехнических сооружениях.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке государственного задания FWWW-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С.М. Остров Сахалин. М.: Наука, 1973. 182 с.
2. Геология СССР. М.: Недра. 1970. Т. 33. Ч. 1. 432 с.
3. Генсировский Ю.В., Казаков Н.А., Рыбальченко С.В. Гидрометеорологические условия периодов массового селеобразования на о. Сахалин // Тр. Междунар. конф. "Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита". Пятигорск: Институт "Севкавгипроводхоз, 2008. С. 95–98.
4. Домогашев В.Н. Разработка метода проектирования мостовых переходов в условиях карчехода: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1984. 182 с.
5. Домогашев В.Н., Сергунов В.Е. Карчеход и русловой процесс // Геоморфология. 1987. № 2. С. 54–56.
6. Евсеева Н.С. Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 484 с.
7. Земцова А.И. Климат Сахалина. Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. 197 с.
8. Казаков Н.А. Массовое формирование селей в низкогорье о. Сахалин: условия и повторяемость // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 1. С. 14–30.
9. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В. Влияние вертикального градиента осадков на характеристики гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье // Геоэкология. 2007. № 4. С. 342–347.
10. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В. Грязекаменные сели катастрофических объемов в низкогорье острова Сахалин // Тр. Междунар. конф. "Селевые

- потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита". Пятигорск. 2008. С. 45–48.
11. 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. № 4. С. 491–503.
 12. Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Т. 18 Дальний Восток. Вып. 4. Сахалин и Курилы / Под ред. М.Г. Васильковского. Л.: Гидрометиздат, 1973. 262 с.
 13. Рыбальченко С.В. Селевая опасность для населенных пунктов Сахалинской области // ГеоРиск. 2013. № 3. С. 40–44.
 14. Рыбальченко С.В., Оганезов А.С. Влияние дефектов систем водоотведения автомобильных дорог на изменение геосистем морских террас // Геоэкология. 2021. № 4. С. 24–41.
 15. Чалов С.Р., Ермакова А.С., Есин Е.В. Речные заломы: экологическая и руслоформирующая роль // Вестник Московского университета. Сер. 5: география. 2010. № 6. С. 25–31.
 16. Чемяков Ю.Ф. Заломы, их образование и развитие // Известия Всесоюзного географического общества. 1955. Т. 87. № 2. С. 134–136.
 17. Beschta R.L. The effects of large woody debris on channel morphology: a flume study // Proc. on the D.B. Simons Symposium on Erosion and Sedimentation. 1983. P. 863–878.
 18. Grant G.E. Effects of Wood Loading and Mobility on Channel Stability, Breitenbush River, Oregon // Report to the Detroit Ranger District, Willamette National Forest, 1987. 40 p.
 19. Iseya F., Ikeda H. Pulsations in bedload transport rates induced by Longitudinal Sediment Sorting: A flume study using sand and gravel mixture // Geografiska Annaler, 1987. 69 (1). P. 15–27.
 20. Ishikawa Y. Studies on Disasters Caused by Debris Flows Carrying Floating Logs Down Mountain Streams. PhD dissertation. Kyoto University, Japan. 1990. 121 p.
 21. Ishikawa Y., Kusano S., Fukuzawa M. Mudflow and floating log disaster in Ichinomiya Town, Kumamoto Pref. in 1990 // Japan-US Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control. 1991. P. 487–496.
 22. Lisle T.E. Stabilization of a gravel channel by large streamside obstructions and bedrock bends, Jacoby Creek, northwestern California // Geological Society of America Bulletin, 1986. V. 97. P. 99–101.
 23. Lienkaemper G.W., Swanson F.J. Dynamics of large woody debris in streams in old-growth Douglas-fir forests // Canadian Journal of Forest Research 1987. V. 17. № 2. P. 150–156.
 24. Nakamura F., Swanson F.J. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon // Earth Surf. Process. Landforms. 1993. V. 18. № 1. P. 43–61.
 25. Haruka T., Slim M., Shiho A., Takashi O., Ushio K. Comparison of length and dynamics of wood pieces in streams covered with coniferous and broadleaf forests mapped using orthophotos acquired by an unmanned aerial vehicle // Progress in Earth and Planetary Science. 2021. V. 8. № 1. P. 1–16.
 26. Christian A. Brauderick, Gordon E. Grant, Yoshiharu Ishikawa, Hiroshi Ikeda. Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment // Earth Surface Processes and Landforms, 1997. V. 22 (7). P. 669–683. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199707\)22:73.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199707)22:73.0.CO;2-L)

DRIFTING TIMBER FORMATION ON MUDFLOW RIVERS ON SAKHALIN ISLAND

S. V. Rybalchenko^{a, #}

^aSpecial Research Bureau for Automation of Marine Research, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Maksima Gor'kogo 25, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000 Russia

[#]E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

The paper considers the regional features of the phenomena of timber drifting on mudflow rivers on Sakhalin Island. The regularities of mudflow formation in Sakhalin rivers and their mudflow regime are established and the factors causing timber drifting in the debris flow watercourses of Sakhalin Island are studied. Due to the history of Sakhalin terrain and macrorelief formation, the main mountain structures are composed of marine sediments. This promotes mudflows on rivers, the active development of exogenous processes on river slopes, and the flow of solid phase and woody vegetation into the channel and talvegs. As a result, the density of streams increases, their eroding and abrasive ability rises, which affects significantly channel deformations and involves timber drifting. High-density flows have an elevated transporting capacity, since they increase the pulling force of the flow affecting the midsection of the drifting timber root system, and also raise the timber buoyancy due to an increase in the pushing Archimedean force. Also, regional features include a large amount of liquid precipitation, the annual amounts of which in the valleys and on the coast are 800–1200 mm, and in mountainous areas can reach 1500–2000 mm. The main species of drifting timber drifting include broad-leaved trees (willow and alder), which, unlike coniferous wood, are more prone to form logjams and are most hazardous for culverts.

Keywords: debris flow, timber drifting, logjams, slope exogenous processes, riverbank erosion

REFERENCES

1. Aleksandrov, S.M. Sakhalin Island. Moscow, Nauka Publ., 1973, 182 p. (in Russian)
2. Geology of the USSR. Moscow, Nedra Publ., 1970, vol. 33, part 1, 432 p. (in Russian)
3. Gensiorovskii, Yu.V., Kazakov, N.A., Rybal'chenko, S.V. Hydrometeorological conditions of mass mudflow formation periods on Sakhalin Island. In: Proc. Intern. Conf. "Mudflows: disasters, risk, forecast, protection". Pyatigorsk, 2008, pp. 95–98. (in Russian)
4. Domogashev, V.N. [Development of a method for designing bridge crossings in the conditions of drifting timber mudflows. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Diss., Krasnoyarsk, 1984, 182 p. (in Russian)
5. Domogashev, V.N., Sergunov, V.E. Drifting timber and riverbed process. *Geomorfologiya*, 1987, no. 2, pp. 54–56. (in Russian)
6. Evseeva, N.S. [Modern morpholithogenesis in the southeast of the West Siberian plain. Tomsk, NTL Publ., 2009, 484 p. (in Russian)
7. Zemtsova, A.I. Climate of the Sakhalin island. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 197 p. (in Russian)
8. Kazakov, N.A., Gensiorovskii, Yu.V. [Influence of the vertical precipitation gradient on the characteristics of hydrological, avalanche and mudflow processes in the low mountains. *Geoekologiya*, 2007, no. 4, pp. 342–347. (in Russian)
9. Kazakov, N.A., Gensiorovskii, Yu.V. Mud-stone mudflows of catastrophic volumes in the low mountains of Sakhalin Island. In: Proc. Intern. Conference "Mudflows: disasters, risk, forecast, protection". Pyatigorsk, 2008, pp. 45–48. (in Russian)
10. Kazakov, N.A. Mass formation of mudflows in the Sakhalin low mountains: conditions and frequency. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 14–30. (in Russian)
11. Kazakov, N.A., Bobrova, D.A., Kazakova, E.N., Rybal'chenko, S.V. Investigation of debris flow dynamics on an experimental stand. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*, 2019, vol. 1, no. 4, pp. 491–503. (in Russian)
12. Kazakov, N.A., Bobrova, D.A., Kazakova, E.N. Investigation of an artificial mudflow velocity on a laboratory stand. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*, 2020, vol. 2, no. 4, pp. 405–417 (in Russian)
13. Surface water resources in the USSR. Vol. 18. The Far East. Issue 4. Kuril Islands and Sakhalin. Vaskovskii, M.G., Ed., Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1973, 262 p. (in Russian)
14. Rybal'chenko, S.V. The mudflow hazard for settlements of the Sakhalin region. *GeoRisk*, 2013, no. 3, pp. 40–44. (in Russian)
15. Chalov, S.R., Ermakova, A.S., Esin, E.V. River logjams: ecological and channel-forming role. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2010, no. 6, pp. 25–31. (in Russian)
16. Chemekov, Yu.F. Logjams, their formation and development. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1955, vol. 87, no. 2, pp. 134–136. (in Russian)
17. Ishikawa, Y. Studies on disasters caused by debris flows carrying floating logs down mountain streams. Doctoral thesis. Kyoto University, Japan. 1990. 121 p.
18. Lienkaemper, G.W., Swanson, F.J. Dynamics of large woody debris in streams in old-growth Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, vol. 17, no. 2, pp. 150–156.
19. Nakamura, F., Swanson, F.J. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surf. Process. Landforms*. 1993, vol. 18, no. 1, pp. 43–61.
20. Haruka, T., Slim, M., Shiho, A., Takashi, O., Ushio, K. Comparison of length and dynamics of wood pieces in streams covered with coniferous and broadleaf forests mapped using orthophotos acquired by an unmanned aerial vehicle. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, vol. 8, no.1, pp. 1–16.