

ПРИРОДНЫЕ НАЛЕДИ СЕЛЕВЫХ БАССЕЙНОВ СРЕДНЕГО И ЮЖНОГО САХАЛИНА

С.В. Рыбальченко¹, К.В. Верховов²

E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

¹ ФГБУН «Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук», г. Южно-Сахалинск, Россия

² Областное автономное учреждение «Спортивно-туристический комплекс «Горный воздух», г. Южно-Сахалинск, Россия

АННОТАЦИЯ: В работе исследованы процессы наледеобразования в селевых бассейнах. На территории Среднего и Южного Сахалина в пределах склоновых и небольших долинных селевых бассейнов, наряду с опасными склоновыми экзогенными процессами, широко распространены малые природные наледы. Механизм формирования таких наледей обусловлен гидрометеорологическими особенностями территории, а также нарушением термического, гидрологического или гидрогеологического режима селевого бассейна.

Основной причиной формирования природных наледей долинных селевых бассейнов является нарушение гидрологического режима водосборного бассейна при селеформировании, которое влияет на годовой твердый сток водотоков. Наледи склоновых селевых бассейнов формируются при нарушении теплового режима поверхности и грунтов при климатических аномалиях, повреждении естественных теплоизоляционных покровов. Формирование склоновых наледей также может быть результатом нарушения гидрогеологического режима водосборного бассейна при антропогенном воздействии или развитии опасных экзогенных склоновых процессов. Криогенные процессы образования наледей оказывают влияние на селевые и русловые процессы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: склоновые экзогенные процессы, природные наледы, склоновые сели, селевой бассейн, русловые процессы.

Сахалин расположен за пределами южной границы криолитозоны, поэтому на территории острова, как правило, отсутствуют специфические криогенные формы рельефа и ландшафты (термокарсты, морозные бугры пучения, наледные поляны и др.), а криогенные процессы имеют локальное распространение, связанное с особенностями отдельной территории – климатическими, геологическими, гидрогеологическими и т. д. [1]. Из-за значительной меридиальной протяженности острова (948 км), а также

© Рыбальченко С.В., Верховов К.В., 2020

существенного влияния Сибирского антициклона, холодного Восточно-Сахалинского течения и акватории Охотского моря, криогенные процессы наиболее присущи Северному Сахалину, а также участкам межгорных котловин с умеренно континентальным микроклиматом, где зимние температуры воздуха могут опускаться до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а среднегодовая температура не превышает $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для Среднего и Южного Сахалина характерен умеренно-мусонный морской климат, многоснежные зимы с значительной толщиной снежного покрова, который оказывает большое отепляющее действие на поверхность и температурный режим грунтов. Однако именно на территории побережья Среднего и Южного Сахалина широко распространены малые (до 1 тыс. м³) наледы поверхностных и грунтовых вод. Образование природных наледей на данной территории наиболее часто отмечается на небольших водотоках, являющихся долинными селевыми бассейнами, а также в пределах склоновых селевых бассейнов, что указывает на тесную взаимосвязь криогенеза природных наледей и селевых процессов.

Несмотря на то что механизмы негативного воздействия наледей на объекты, сооружения и территории хорошо исследованы, разработаны меры борьбы с данными явлениями [3–5], взаимосвязь селевых и криогенных процессов в рамках различных смежных дисциплин практически не изучена, что обуславливает эвристический интерес к изучению процесса наледообразования в пределах селевых бассейнов.

На побережье Среднего и Южного Сахалина расположена большая часть транспортных магистралей, инженерных сетей, населенных пунктов и объектов хозяйственной деятельности. Данные территории наиболее подвержены селеформированию, что обуславливает актуальность и практическое значение представленного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Селевые процессы и природные наледы селевых бассейнов на побережье Среднего и Южного Сахалина

Рельеф побережья Среднего и Южного Сахалина преимущественно представлен участками отмершего клифа, а также аккумулятивными и аккумулятивно-денудационными морскими террасами (высотой не более 80 м) [6], в строении которых преобладают раздельнозернистые и слаболитифицированные осадочные горные породы [7]. Данные породы характеризуются высокой размокаемостью, пористостью, низкими физико-механическими характеристиками и незначительной стойкостью к выветриванию, что определяет их активное вовлечение в процессы селеформирования [8]. Селевые бассейны на побережье Сахалина представ-

лены не только крупными долинными бассейнами, приуроченными к постоянным водотокам рек и ручьев, но и небольшими бассейнами в виде распадков, врезов, оврагов и сухих логов, а также склоновыми селевыми бассейнами – промоинами, денудационными воронками и др. [9–11].

Селевой режим о. Сахалин, в первую очередь, определяется геологическими и геоморфологическими факторами селеобразования, гидрометеорологические факторы выполняют второстепенную роль и, как правило, служат лишь спусковым механизмом для активизации селевых процессов [12]. В связи с особенностями осадконакопления селевые бассейны характеризуются циклическим селеформированием – раз в 3–5 лет, однако в особо активных или молодых бассейнах может отмечаться несколько случаев селеформирования в год.

На территории Сахалина в пределах большинства селевых бассейнов экзогенные процессы (осыпи, сели, оползни, эрозия и др.) чаще всего имеют парагенетический (совместный) характер течения (рис. 1). Это обусловлено особенностями геоморфологического строения селевых бассейнов, характеристиками горных пород различных генетических отложений в пределах селевого бассейна, а также вмещающих горных пород.



Рис. 1. Селевой бассейн с парагенетическим течением экзогенных процессов: в бортах развиты эрозионные врезы и оползни.

Криогенные процессы, в т. ч. наледообразование, в пределах селевых бассейнов также имеют парагенетический характер течения, поскольку принимают активное участие в формировании потенциальных селевых массивов и могут оказывать значительное влияние на селевой режим селевого бассейна.

В зависимости от классификации селевых бассейнов следует различать наледи поверхностных вод долинных селевых бассейнов и наледи грунтовых и смешанных вод склоновых бассейнов. Вне зависимости от классификации механизм образования наледей связан с нарушением теплового, гидрологического или гидрогеологического режима водосборного бассейна [3–5, 13–15].

Наледи долинных селевых бассейнов

На побережье Среднего и Южного Сахалина долинные селевые бассейны преимущественно представлены распадками, небольшими V-образными и корытообразными сильно залесенными долинами с крутыми бортами [11]. Микроклимат долин, обусловленный защищенностью их от ветра, небольшими поперечными размерами, значительной влажностью воздуха и перувлажненностью территории, приводит к существенному переохлаждению воздушных масс, грунтов, поверхностных и грунтовых вод в пределах водосборного бассейна. Несмотря на особенности микроклимата долинных селевых бассейнов, повсеместного формирования природных наледей в их пределах не отмечается. Наиболее подвержены процессу наледообразования бассейны водотоков с активным проявлением русловых и селевых процессов, приводящим к значительному переформированию русла [15, 16].

Необходимо отметить, что средняя мутность речных вод Сахалина не превышает 100–300 г/м³ [17, 18], однако средние многолетние модули стока взвешенных наносов достигают 50–60 т/км². Для сравнения, на реках северо-запада России при равных средних значениях мутности речных вод средние многолетние модули стока взвешенных частиц не превышают 10–20 т/км² [19]. Также для Сахалина характерно и наибольшее для территории России понижение земной поверхности [6]. Данные факты свидетельствуют о том, что отдельные дискретные события на водотоках Сахалина (паводки и сели) вносят существенный вклад в объемы их годового твердого стока, гидрологический режим и переформирование русла водотока.

Селевой режим водотоков Сахалина обусловлен особенностями геологического строения и осадконакопления, а также активной циклонической деятельностью в регионе. Обильные осадки ливневого характера формируют максимальные расходы с минимальным временем добегаания, что приводит к частому образованию селевых паводков, наносоводных потоков, грязевых и грязекаменных селей, карчеходов, а также к активному перемещению и переотложению донных наносов.

Основным источником твердого питания селевых потоков, формирующихся в небольших долинных селевых бассейнах, являются различные типы генетических отложений, перемещаемые в русла водотоков с бортов долины при развитии парагенетических склоновых экзогенных процессов, а для крупных селевых бассейнов – аллювиальные отложения берегов и отмытки русла. Заваливание и нивелирование русел, забивание отверстий водопропускных сооружений отложениями и карчами, а также образование осередков влияют на гидрологический режим водотока, что может приводить к увеличению ширины и распластыванию русла с уменьшением глубины потока, образованию многорукавности, формированию запруд, в холодный период года – зажоров, заторов и ледяных пробок из внутриводного льда. Уменьшение глубины потока, затруднение его движения, в т. ч. подпруживание, в период межени приводят к значительному переохлаждению воды и формированию наледей поверхностных вод.

Таким образом, для малых водотоков Сахалина, являющихся долинными селевыми бассейнами, решающее значение в изменении гидрологического режима играют селевые процессы, поскольку в сравнении с небольшими объемами влекомых донных наносов, обусловленными малой транспортирующей способностью водотоков первых порядков, объемы пролювиальных отложений могут достигать нескольких тысяч кубометров. Места отложения селевых масс и карчей приурочены к участкам меандрирования, уменьшения продольного уклона, распластывания или многорукавности русла, что в значительной мере активизирует криогенные процессы на потенциально благоприятных для развития наледей участках водотоков (рис. 2).

Помимо влияния русловых процессов на формирование наледеобразования на селевых водотоках Среднего и Южного Сахалина, следует отметить обратный эффект влияния природных наледей на русловые деформации. С развитием наледей на малых водотоках связано два вида деформаций русел: в зимний период в результате деятельности напорного потока подо льдом, а также во время половодья (размывы берегов при обтекании ледяных массивов) [13]. Уменьшение живого сечения водотока приводит к увеличению скорости потока и, как следствие, размыву дна в местах образования зажоров, заторов, наледей и др. Деформации русла по причине обтекания потоком наледи образуют рукава обтекания или протоки. На территории Среднего и Южного Сахалина в связи с небольшими объемами наледей деформации русла в период весеннего половодья, вызванные обтеканием тел наледей, имеют локальное распространение и несоизмеримы с русловыми деформациями в период паводков или селепрохождения в летне-осенний период.



Рис. 2. Долинный селевой бассейн, заваленный пролювиальными отложениями и карчами, июль 2018 г. – *а*; *б* – наледь поверхностных вод, частично перехваченная в кювете, январь 2019 г.

Наледи грунтовых и смешанных вод склоновых селевых бассейнов

На побережье Сахалина склоновые селевые бассейны представлены элементарными формами эрозионного и денудационного микрорельефа – промоинами, врезами, молодыми быстрорастущими оврагами, денудационными воронками и др. 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 [9].

Как и в долинных селевых бассейнах в пределах склоновых бассейнов также активно протекают парагенетические экзогенные процессы. Основным источником твердого питания склоновых селей являются различные генетические типы отложений, аккумулируемые в тальвеге бассейна, а также элювий верхней части коры выветривания. В отличие от природных наледей долинных селевых бассейнов наледи склоновых бассейнов, в т. ч. внутригрунтовые, формируются из грунтовых и смешанных вод. Основной причиной формирования склоновых наледей является нарушение температурного и гидрогеологического режимов водосборного бассейна по естественным или антропогенным причинам.

Нарушение температурного режима поверхности и грунтов склонового селевого бассейна происходит по причине повреждения, деградации или полного отсутствия естественных теплоизолирующих покровов – снего-

вого и почвенно-растительного. При наступлении устойчивых отрицательных температур по гидрометеорологическим условиям снежный покров может не успеть сформироваться или иметь недостаточную толщину, что неизменно приводит к переохлаждению поверхности и грунтов склонового селевого бассейна и формированию склоновых наледей грунтовых или смешанных вод.

Среди гидрометеорологических особенностей территории Среднего и Южного Сахалина необходимо отметить большую вероятность выпадения жидких осадков в холодный период (ранней зимой или весной) при кратковременных оттепелях и последующих существенных похолоданиях. Формированию склоновых наледей также способствует предшествующее осеннее переувлажнение грунтов. Помимо осадков снежный покров на склонах и в тальвегах повреждается при сходе лавин, являющихся повсеместным явлением для данной территории.

Нарушение почвенно-растительного покрова происходит при активизации склоновых экзогенных процессов: селей, оползней, оплывин, эрозии и др. Возможно повреждение почвенно-растительного покрова в тальвеге селевого бассейна при сходе лотковых лавин. Естественные теплоизоляционные покровы также могут уничтожаться, деградировать или повреждаться при антропогенном воздействии: хозяйственной деятельности, планировке и расчистке территории, строительстве, загрязнении снегового покрова, тепловом загрязнении, сбросе вод на рельеф и др. (рис. 3а).

Нарушение гидрогеологического режима склоновых селевых бассейнов связано с вскрытием водоносных горизонтов, перекрытием или перенаправлением движения грунтовых вод, изменением мест разгрузки подземных вод. Нарушение гидрогеологического режима может происходить как при антропогенном воздействии, так и вследствие естественных причин – активизации склоновых экзогенных процессов с достаточной глубиной захвата пород или эродирующей способностью (рис. 3б).

Следует отметить что, несмотря на возможное влияние селевых потоков на температурный и гидрогеологический режимы склоновых селевых бассейнов, на территории Среднего и Южного Сахалина именно гидрометеорологические условия оказывают решающую роль в формировании склоновых наледей.

На территории Среднего и Южного Сахалина отмечено: критическая толщина потенциального селевого массива, необходимая для селеформирования, соответствует глубине сезонного промерзания, что свидетельствует о решающей роли криогенных процессов и морозного выветривания в формировании потенциальных селевых массивов в склоновых бассейнах. Криогенные процессы приводят к разрушению жестких структурных свя-



зей потенциальных селевых массивов, снижению коэффициента сцепления и несущей способности, и, как следствие, к активному вовлечению их в селевой процесс [20]. Они также обуславливают особенности селевого режима склоновых селевых бассейнов, в т. ч. цикличность селеформирования и наличие периодов активного селеформирования – весеннего и осеннего [12, 20].

В весенний период в склоновых селевых бассейнах формируются вязкопластичные оползни, а также связанные грязевые и грязекаменные сели небольших объемов. Незначительная толщина снежного покрова на склонах и интенсивное воздействие ветра, а также осеннее переувлажнение грунтов приводят к их быстрому промерзанию на большую глубину в сравнении с равнинными участками. При понижении температуры и неустановившемся снежном покрове происходит замерзание поровой воды и образование сегрегационного льда в рыхлообломочных горных породах потенциально-го селевого массива. В период малоснежных зим при заморозках сегрегационные льды подвергаются сублимации и возгонке с образованием кристаллов лепесткового льда, также формируются морозобойные трещины с повторно жильным льдом [4, 21].

Криогенные процессы, в т. ч. образование склоновых и грунтовых наледей, подземных льдов, приводят к разрыхлению верхней части потенциальных селевых массивов и переходу их в предельно рыхлое состояние [22, 23]. В весенний период при постепенном радиационном оттаивании

разрыхленные и переувлажненные грунты смещаются по поверхности мерзлых подстилающих горных пород. В зависимости от особенностей территории данный процесс может происходить в виде солифлюкции, вязкопластичных оползней или связанных селей. Ввиду своей консистенции и невысоких динамических характеристик весенние сели не обладают существенной эродирующей способностью и нивелируют рельеф склонового бассейна. Глубина захвата пород совпадает с глубиной радиационного оттаивания на момент селеформирования и составляет несколько десятков сантиметров. Продолжительность цикла весеннего селеформирования, как правило, 1–2 года.

Осенний период селеформирования связан с вовлечением в селевой процесс всего потенциального селевого массива, сложенного аккумуляруемым в тальвеге бассейна рыхлообломочным материалом, в т. ч. элювием верхней части коры выветривания. Толщина потенциального селевого массива соответствует глубине сезонного промерзания-оттаивания (деятельному слою) и может достигать от одного до нескольких метров. Осенние сели и наносоводные потоки, обладающие высокими динамическими характеристиками и эродирующей способностью, оголяют нижележащие слои горных пород, что при дальнейшем морозном выветривании и осадконакоплении формирует очередной цикл осеннего селеформирования (продолжительность 3–5 лет и более): морозное выветривание и осадконакопление → формирование критической массы потенциального селевого массива в селевом очаге → ливневые осадки (триггер) → селепрохождение. В отличие от долинных селевых бассейнов, криогенные процессы в склоновых селевых бассейнах играют огромную роль в селеформировании.

ВЫВОДЫ

На территории Среднего и Южного Сахалина природные наледи наиболее часто формируются в пределах небольших долинных, а также склоновых селевых бассейнов с активным селеформированием и развитием других склоновых экзогенных процессов, вызывающих нарушение температурного, гидрологического или гидрогеологического режима водосборного бассейна.

Помимо влияния селевых процессов на наледообразование в пределах селевых бассейнов, существует обратный эффект воздействия криогенеза наледообразования на селеформирование. В пределах долинных селевых бассейнов наледи приводят к незначительным локальным русловым деформациям в весенний период половодья. В склоновых селевых бассейнах криогенез наледообразования вносит значительный вклад в формирование потенциальных селевых массивов и определяет механизм циклов селеформирования. Более детальное изучение природных наледей в

селевом бассейне может дополнить информацию о его режиме, частоте и цикличности селеформирования.

В настоящее время процессы наледообразования в селевых бассейнах слабо изучены и зачастую не рассматриваются как условие или следствие развития селевых процессов, соответственно криогенез природных наледей не учитывается при рекогносцировочном обследовании территории, оценке селевого режима бассейна, прогнозе селеформирования, создании вариантов инженерной защиты, строительстве и эксплуатации объектов, расположенных в непосредственной близости от селевого бассейна. Противоналедные мероприятия в данном случае сводятся к борьбе с самой наледью (периодическая расчистка, устройство перехватывающих сооружений, противоналедных ограждений и др.), а не с причиной ее формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качура Р.А., Куклин А.С., Лапердин В.К., Тимофеев Н.В. Геологические опасности и риски по нефтегазопроводам на севере о. Сахалин // Известия Иркутского государственного университета. Сер.: Науки о Земле. 2009. Т. 2. № 1. С. 59–74.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 34. Сахалинская область / под ред. З.Н. Пильниковой. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 351 с.
3. Алексеев В.Р. Наледи Сибири и Дальнего Востока. // Сибирский геогр. сб. 1974. № 8. С. 5–68.
4. Алексеев В.Р. Наледи. Новосибирск: Наука: Сиб. отд, 1987. 256 с.
5. Алексеев В.Р. Наледеведение: словарь-справочник. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 438 с.
6. Александров С.М. Остров Сахалин. М.: Наука, 1973. 182 с.
7. Инженерная геология СССР. Т. 4. Дальний Восток / под ред. Е.Г. Чаповского. М.: МГУ, 1977. 504 с.
8. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1977. 320 с.
9. Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Склоновые селевые бассейны и их морфодинамические особенности // Геориск. № 4. 2017. С. 44–49.
10. 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.
11. Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Эволюция селевых бассейнов на морских террасах острова Сахалин и мероприятия по инженерной защите на различной стадии их развития // Вестник ДВО РАН. 2018. № 6. С. 122–132.
12. Казаков Н.А. Сейсмогенные факторы селевого процесса в низкогорье (на примере о. Сахалин) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. № 1. С. 75–81.
13. Лапердин В.К. Наледи Восточного Саяна и их роль в развитии селей // Записки Забайкальского филиала ГО СССР. 1976. Вып. 101. С. 107–110.

14. Лапердин В.К., Тржцинский Ю.Б. Роль выветривания в формировании твердой фазы селей (на примере Восточных Саян) // Геологические факторы формирования оползней и селевых потоков и вопросы их оценки: сб. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 49–54.
15. Лапердин В.К., Качура Р.А. Криогенные опасности в зонах линейных природно-технических комплексов на юге Восточной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 2. С. 27–34.
16. Ушаков А.П. Руслвые процессы в низовьях рек в зимний период // Труды III Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1960. С. 225–229.
17. Грепачевский И.В. Мутность рек Сахалина // Известия сахалинского отдела Географического общества СССР. Южно-Сахалинск, 1970. С. 71–78.
18. Ресурсы поверхностных вод СССР Т. 18. Дальний Восток. Вып. 4. Сахалин и Курилы / под. ред. М.Г. Васьяковского. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 263 с.
19. Федотов В.И. География России // Вестник Воронежского государственного университета. 2015. № 2. С. 73–107.
20. Рыбальченко С.В., Генсиоровский Ю.В. Увлажнение грунтов потенциальных селевых массивов в весенний период на западном побережье Южного Сахалина // Сборник трудов III Международной конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Южно-Сахалинск: ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2014. С. 57–60.
21. Harris C., Brouchkov A., Guodong C. Geocryology: Characteristics and Use of Frozen Ground and Permafrost Landforms CRC Press, 2018. 810 p.
22. Harris, C. & Lekowicz, A.G. An analysis of stability of thawing slopes, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. Canadian Geotechnical Journal, 2000. P. 449–462.
23. Harris C. Mechanisms of mass movements in periglacial environments. In: Anderson, M. G. and Richards, K. S. (Eds.). Slope stability. Chichester, 1989. P. 531–559.

Для цитирования: Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Природные наледы селевых бассейнов Среднего и Южного Сахалина // Водное хозяйство России. 2021. № 1. С. 24–41.

Сведения об авторах:

Рыбальченко Светлана Владимировна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН), Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького 25; e-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

Верховов Константин Владимирович, ведущий инженер, Областное автономное учреждение «Спортивно-туристический комплекс (ОАУ СТК) «Горный воздух», Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, ул. Горный воздух, литер В; e-mail: konstantin_verhovov@mail.ru

NATURAL ICE MOUNDS OF THE MIDDLE AND SOUTHERN SAKHALIN MUDFLOW BASINS

Svetlana V. Rybalchenko¹, Konstantin V. Verkhovov²

E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

¹ *Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers, Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

² *Regional Autonomous institution «Sports and tourist complex (RAI STK) «Mountain air», Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

Abstract: The article deals with the ice mounds formation processes in the mudflow basins. Small natural frosts are widespread on the territory of Middle and Southern Sakhalin within the slope and small valley debris flow basins, along with dangerous slope exogenous processes (debris flows, landslides, erosion, etc.), often having a paragenetic nature of the current. The mechanism of ice data formation is due to the hydro/meteorological features of the territory, as well as disturbance of the thermal, hydrological or hydrogeological regime of the debris flow basin.

The main reason for the formation of natural ice mounds in the valley debris flow basins is disturbance of the hydrological regime of the catchment basin during debris flow formation, which mainly contributes to the annual solid runoff of first order watercourses. Scum of slope debris flow basins are formed in case of violation of the thermal regime of the surface and soil of the debris flow basin due to climatic anomalies, as well as damage to natural heat-insulating coverings: snow and soil-vegetable. It is also possible to form sloping ice as a result of a violation of the hydrogeological regime of the catchment basin under anthropogenic impact or the development of dangerous exogenous slope processes with a sufficient depth of rock capture. Cryogenic processes of ice formation affect debris flow and channel processes.

Key words: slope exogenous processes, natural ice mounds, slope mudflows, debris flow basin, riverbed processes.

The Sakhalin is located beyond the cryolite zone southern boundary, therefore specific cryogenous forms of the relief and landscape (thermokarsts, freeze blowup mounds, frazil glades, etc.) as a rule are not presented on the territory of the island while cryogenic processes are distributed locally in association with the particular features of the given territory (climatic, geological, hydrogeological, and so on) [1]. Due to the considerable meridian extension of the island (948 km), as well as significant impact of the Siberian anticyclone, cold Eastern-Sakhalin Flow and the Sea of Okhotsk water area, the cryogenic processes are mostly typical for the Northern Sakhalin, as well as for plots of intermontane hollows with moderately continental microclimate where winter air temperatures can be as low as -50°C while average annual temperature does not exceed -1.5°C .

Temperate/monsoon sea climate, high-snow winters with significant thickness of snow cover, which has a great warming effect for the soils surface and temperature regime. However, it is exactly on the coast territory of the Middle and Southern Sakhalin where small (up to 1 thousand m^3) ice mounds of surface water and groundwater are widely spread. Formation of natural ice mounds on this territory is mostly often registered at small watercourses

that are valley mudflow basins and within the limits of slope mudflow basins, this indicates close interdependence of the natural ice mounds cryogenesis and mudflow processes.

In spite of the fact that the mechanisms of the ice mounds adverse impact on objects, facilities and territories are well studied and known, and measures of struggle with these phenomena have been developed [3–5], correlation of mudflow and cryogenic processes is practically not studied and this causes an heuristic interest to studying the ice mounds formation process within the mudflow basin boundaries.

The most part of transport thoroughfares, engineering networks, inhabited locations, and economic units are located on the coast of the Middle and Southern Sakhalin. These territories are mostly subjected to mudflow forming and this causes urgent significance and practical value of the presented research.

MATERIALS AND RESULTS OF THE RESEARCH

Mudflow processes and natural ice mounds of the mudflow basins on the coast of the Middle and Southern Sakhalin

The Middle and Southern Sakhalin coast relief is predominantly represented with the sites of dead hoe, as well as with accumulative and accumulative/denudation sea terraces (their height does not exceed 80 m) [6], in their structure split-grained and low-lithified sedimentary rocks predominate [7]. These rocks are characterized by high defrosting capacity, porosity, low physical/mechanical characteristics and insignificant resistance to weathering and this determines their active involvement to the mudflow formation processes [8]. Mudflow basins on the Sakhalin coast are presented not only by major valley basins associated with permanent watercourses of rivers and brooks but also by small basins in the form of splits, breakouts, ravines, and dry gullies, as well as by slope mudflow basins such as scours, denudation funnels, etc. [9–11].

The island of Sakhalin mudflow regime primarily is determined by geological and geomorphological factors of mudflow formation while hydro/meteorological factors play secondary roles and, as a rule, serve only triggers for the mudflow processes activation [12]. In connection with specific features of sediments accumulation, the mudflow basins are characterized by cyclic mudflow formation: once in 3–5 years, however, in the particularly active or young basins several cases of mudflow formation a year can be registered.

On the Sakhalin territory within the most mudflow basins' boundaries exogenous processes (scree, mudflows, landslides, erosion, etc.) most often has paragenous (joint) character of flow. This is determined by particular features of the mudflow basins' geomorphological structure, characteristics of rocks of various genetic sediments within the mudflow basin boundaries, as well as accommodating rocks.

Cryogenic processes including ice mounds formation within mudflow basins also have paragenous character of flow as they actively participate in formation of potential mudflow massifs and can considerably impact the mudflow basin mudflow regime.

Depending on the mudflow basins classification one should differentiate between the valley mudflow basins' surface waters ice mounds and slope basins groundwater or mixed waters ice mounds. Irrespective of the classification the ice mounds formation mechanism is connected with disturbances of thermal, hydrological or hydro/geological regime of the catchment basin [3–5, 13–15].

The valley mudflow basins' ice mounds

On the Middle and Southern Sakhalin coast the valley mudflow basins are mostly presented by splits, small V-shaped and trough-shaped heavily forested valleys with step sides

[11]. The valleys' microclimate determined by their protection against winds, small transverse dimensions, considerable air humidity and over/wetting of the territory leads to considerable supercooling of air masses, grounds, surface waters and groundwater within the catchment boundaries. In spite of the specific features of the valley mudflow basins microclimate no general formation of natural ice mounds is indicated within these boundaries. Basins of watercourses with active manifestation of bed and mudflow processes are the most liable to the ice mound formation processes that cause considerable modification of the bed [15, 16].

It is noteworthy that the Sakhalin river waters average turbidity does not exceed 100–300 g/m³ [17, 18], however, average many-year modules of the suspended sediments runoff reach 50–60 t/km². To be compared: at the rivers of the North-Western part of Russia in case of the equal average values of the river waters turbidity, the average many-year modules of the suspended particles runoff do not exceed 10–20 t/km² [19]. In addition, the maximal for the territory of Russia depression of the terrestrial surface is typical for the Sakhalin [6]. These facts are evidences of the significant contribution of separate discrete events at the Sakhalin watercourses (floods and mudflows) to the volumes of their annual solid runoff, hydrological regime and modification of a watercourse bed.

The mudflow regime of the Sakhalin watercourses is determined by the specific features of the geological structure and sediments accumulation, as well as active cyclonic activities in the region. Plentiful precipitations of the rain-storm character form maximal flow rate with minimal lag time and this causes often formation of mudflow floods, sediment/water flows, mud and mud/stone flows, karch-travels, as well as active replacement and re-sedimentation of bottom sediments.

The main source of solid supply of the mudflows forming in small valley mudflow basins is the various types of genetic sedimentations replacing in the watercourses beds from the valley sides in case of development of paragenetic slope exogenous processes, while such source for large mudflow basins is the bank alluvial sediments and the bed blind area. The beds charging and leveling, filling of the water-passage facilities with sediments and karches, as well as formation of middle sandbanks impact the watercourse hydrological regime and this can cause the bed width increase and its spreading with subsequent decrease of the flow depth, formation of many bed horns, mil-ponds, and hanging dams, jams and ice blockades of inter-water ice during the cold season. The flow depth decrease, hindering of its movement including ponding during the low-water periods lead to water considerable super/cooling and formation of surface water ice mounds formation.

Thus, the mudflow processes play the decisive role in the hydrological regime changes for the Sakhalin small watercourses that are valley mudflow basins, because the proaluvial deposits volumes can reach several thousand cubic meters in comparison with small volumes of the transported bottom sediments that are caused by low transporting ability of the first order watercourses. The places of the mudflow masses and karches deposition are confined with the sites of meandering, decrease of longitudinal slope, the bed spreading or branching, that considerably activates cryogenic processes at potentially favorable for ice mounds development watercourses ranges.

Beside the channel processes impact to ice mounds formation at the Middle and Southern Sakhalin mudflow watercourses, it should be noted that the reverse effect of natural ice mounds impact on the bed deformation also takes place. Two kinds of the bed deformations are connected with the ice mounds development at small watercourses: during winter period as a result of pressure flow under ice, as well as during floods (the banks washing away in case of flow over ice

massifs) [13]. Decrease of the watercourse effective cross-section leads to the flow rate increase and, as a consequence, to washing out of the bed at spots of hanging dams, jams, ice mounds, etc. The bed deformation because of ice mound flow forms flow branches and channels. On the territory of the Middle and Southern Sakhalin due to small volumes of the bed deformation, ice mounds during the spring flood caused by ice mounds flow are spread locally and are incomparable with bed deformations during floods or mudflow passages during summer/fall period.

Ice mounds of groundwater and mixed waters of slope mudflow basins

On the Sakhalin coast slope mudflow basins are represented by elementary forms of erosion and denudation micro/relief: scours, breakouts, young quickly growing ravines, denudation craters, etc. All slope mudflow basins are characterized by the absence of vividly emphasized thalweg or by a poorly cut bed, which does not reach the local erosion basis, as well as by excess of the thalweg longitudinal slope over the angle of the potential mudflow massifs and enclosing rock strata internal friction, and this determines predomination of shift or erosion/shift mudflow process in slope mudflow basins [9].

Paragenetic exogenous processes equally actively occur in valley mudflow basins within the boundaries of slope basins. Various genetic types of deposits accumulated in the basin thalweg, as well as eluvium of the residual soil upper part are the main sources of the slope mudflows solid supply. In contrast with the natural ice mounds of the valley mudflow basins the slope basins ice mounds including inter-ground ones are formed of groundwater and mixed waters. The main cause of the slope ice mounds formation is the disturbance of the catchment basin temperature and hydro/geological regimes because of natural or anthropogenic reasons.

Disturbances of the surface temperature regime and the slope mudflow basin soils happen because of damage, degradation or complete absence of natural thermal/insulation covers, both snow and soil/plant. In case of stable negative temperatures because of hydro/meteorological conditions the snow cover can fail to be formed or can have insufficient thickness, and this invariably leads to supercooling of the slope mudflow basin surface and soils and, as a consequence, to formation of slope ice mounds of groundwater or mixed waters.

Among hydro/meteorological features of the Middle and Southern Sakhalin territory the big probability of liquid precipitation during the cold period (early winter or spring) accompanied by short-term thaws and subsequent considerable fall of temperature is noteworthy. Preceding autumn overwetting of ground also facilitates formation of slope ice mounds. Snow cover on the slopes and in thalwegs is damaged not only by precipitation but also by avalanching that is wide-spread phenomenon for this territory.

Disturbance of soil/plant cover is usually caused by activation of the slope exogenous processes such as mudflows, landslides, dulling, erosion, etc. Disturbance of soil/plant cover in the mudflow basin thalweg is possible in case of flume avalanching. Natural thermal/insulation covers can also be destroyed, degraded or damaged due to anthropogenic impact such as economic activities, arrangement and cleaning of territories, construction, snow cover pollution, thermal pollution, water discharge, etc.

Disturbances of the slope mudflow basins' hydro/geological regime are connected with the aquifers opening, damming or re-direction of the groundwater movement or changing of the groundwater discharge places. The hydro/geological regime disturbances can be caused either by anthropogenic impact or due to natural causes such as activation of the slope exogenous processes with sufficient depth of the rocks capture or eroding ability.

It should be noted that in spite of possible effect of mudflow streams on the slope mudflow basins temperature and hydrological regimes, it is namely hydro/meteorological

conditions play decisive role in the slope ice mounds formation on the territory of the Middle and Southern Sakhalin.

It has been noted on the territory of the Middle and Southern Sakhalin that critical thickness of a potential mudflow massif necessary for ice mudflow formation corresponds to the depth of the seasonal frost penetration and this is the evidence of the cryogenic processes and congelifraction critical role in formation of potential mudflow massifs at slope basins. Cryogenic processes lead to destruction of rigid structural ties of potential mudflow massifs, decrease of the traction coefficient and carrying ability decrease and, as a consequence, to their active involvement in the mudflow process [20]. They also determine the specific features of the slope mudflow basins mudflow regime including cyclic recurrence of mudflow formation and periods of active mudflow formation (spring and autumn) [12, 20].

Visco/plastic landslides and well as connected mud and mud/stone flows of small volumes are formed at the slope mudflow basins during spring periods. The snow cover insignificant thickness at the slopes and intense wind impact, as well as autumn excessive humidity of soils lead to the rapid frost penetration to the greater depth in comparison with plain plots. In case of the temperature drop and unstable snow cover the pore water freezing and segregation ice formation in the potential mudflow massif loose/fragmental debris occur. During low-snow winters in case of frost segregation ice is subjected to sublimation with formation of petalled ice crystals, at the same time frost-shattered cracks with repeatedly vein ice are formed [4, 21].

Cryogenic processes including slope and ground ice mounds, as well as underground ices formation cause the potential mudflow massifs upper part loosening and transition to ultimately loose state [22, 23]. During spring periods and gradual radiation thaw, the loose and over-wetted grounds are replaced along the surface of frozen substrate rocks. Depending on peculiarities of the territory, this process can occur as solifluction, visco/plastic landslides or bound mudflows. Due to their consistence and low dynamic characteristics, the spring mudflows do not possess significant erosion ability and they level the slope basin relief. The depth of the rocks capture coincides with the depth of radiation thawing by the moment of mudflow formation and is some dozens of centimeters. The spring mudflow formation cycle is, as a rule, 1-2 years.

The autumn mudflow period is connected with the entire potential mudflow massif composed of the loose/fragmental debris including eluvium of the residual soil involvement into the mudflow process. The potential mudflow massif thickness corresponds to the depth of seasonal frost penetration/thawing (active layer) and can be from one to several meters. Autumn mudflows and deposit/water flows that possess high dynamic characteristics and erosion ability strip lower layers of rocks and this in the process of further congelifraction and deposits accumulation form the next cycle of autumn mudflow formation (of 3-5 years or more long): congelifraction and deposits accumulation → formation of the potential mudflow massif critical mass in the mudflow center → rain-storm precipitation (trigger) → mudflowing. In contrast with the valley mudflow basins cryogenic processes in slope mudflow basins play significant role in mudflow formation.

CONCLUSIONS

On the Middle and Southern Sakhalin territory natural ice mound are most often formed within the limits of small valley mudflow basins, as well as slope mudflow basins with active mudflow formation and development of other slope exogenous processes that cause disturbances of the temperature, hydrological or hydro/geological regimes of the catchment basins.

Beside the mudflow processes impact on ice mound formation within the boundaries of mudflow basins there is a reverse effect of the ice mounds formation cryogenesis on mudflow formation. Within valley mudflow basins ice mounds cause insignificant local bed deformations during the spring flood period. In slope mudflow basins the ice mounds formation cryogenesis considerably contributes to formation of potential mudflow massifs and determines the mudflow formation cycles mechanism. A more detailed investigation of natural ice mounds in a mudflow basin can add information about the regime, frequency and cyclic recurrence of mudflow formation.

Nowadays the ice mounds formation processes in mudflow basins are poorly studied and often are not considered as a condition or consequence of the mudflow processes development; accordingly, the natural ice mounds formation cryogenesis is not taken into account in reconnaissance survey of territories, assessment of the basin mudflow regime, mudflow formation forecast, creation of options of engineering protection, construction and use of installations located in the direct vicinity of the mudflow basin. In this case all anti-ice mound measures are limited by the struggle against the ice mound per se (periodical cleaning, arrangement of intercepting facilities, anti-ice mound fences, etc.) while the cause of its formation is not cared about.

For citation: Rybalchenko S.V., Verkhovov K.V. *Natural Ice Mounds of the Middle and Southern Sakhalin Mudflow Basins // Water Sector of Russia. 2021. No. 1. P. 24–41.*

About the authors:

Svetlana V. Rybalchenko, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers, Far East Branch of RAS, ul. Gorkogo, 25, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia; e-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

Konstantin V. Verkhovov, Leading Engineer, Regional Autonomous Institution «Sports and tourist complex (RAI STK) «Mountain ai», ul. Gorny Viozdukh, B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000 Russia; e-mail: konstantin_verhovov@mail.ru

REFERENCES

1. *Kachura R.A., Kuklin A.S., Laperdin V.K., Timofeyev N.V.* Geologicheskiye opasnosti i riski po neftegazoprovodam na severe o. Sakhalin [Geological dangers and risks in respect of oil/gas pipelines in the North of the Sakhalin Island] // *Ivestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle.* 2009. Vol. 2. No. 1. Pp. 59–74.
2. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* [Scientific/applied reference book on the climate of the USSR]. Vyp. 34. Sakhalinskaya oblast / pod red. Z.N. Pilnikovoy. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 351 p.
3. *Alekseyev V.R.* Naledi Sibiri i Dalnego Vostoka [Ice mounds of Siberia and the Far East]. // *Sibirskiy geogr. sb.*, 1974. No. 8. Pp. 5–68.
4. *Alekseyev V.R.* Naledi [Ice mounds]. Novosibirsk: Nauka; Sib. otd-nie, 1987. 256 p.
5. *Alekseyev V.R.* Naledvedeniye: [Science of ice mounds]: reference book/vocabulary. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2007. 438 p.
6. *Aleksandrov S.M.* Ostrov Sakhalin [The Sakhalin Island]. M.: Nauka, 1973. 182 p.
7. *Inzhenernaya geologiya SSSR* [Engineering geology of the USSR]. Vol. 4. Dalniy Vostok / pod red. E.G. Chapovskogo. M.: MGU, 1977. 504 p.
8. *Maslov N.N.* Mekhanika gruntov v praktike stroitelstva (opolzni i borba s nimi) [Land mechanics in the building practice (landslides and prevention of them)]. M.: Stroyizdat, 1977. 320 p.

9. *Rybalchenko S.V., Verkhovov K.V.* Sklonoviye seleviye basseiny i ikh morphodinamicheskiye osobennosti [Slope mudslide basins and their morpho/dynamic specific features] // Georisk. No. 4, 2017. Pp. 44 – 49.
10. *Rybalchenko S.V., Verkhovov K.V.* Formi sklonovykh selevykh basseynov na morskikh terrasakh o. Sakhalin i ikh savisimosti ot litologicheskogo sostava gornykh porod [Forms of the slope mudslide basins on the sea terraces of the Sakhalin Island and their dependencies on lithological structure of mountain rocks] // Geoekologiya. 2018. No. 4. Pp. 53–61.
11. *Rybalchenko S.V., Verkhovov K.V.* Evolutsiya selevykh basseynov na morskikh terrasakh ostrove Sakhalin i meropriyatiyapo inzhenernoy zashchite na ralichnoy stadiyi ikh razvitiya [Evolution of the mudslide basins on the sea terraces of the Sakhalin Island and on engineering protection measures at various stages of their development]. // Vestnik DVO RAN. 2018. No. 6. Pp. 122–132.
12. *Kazakov N.A.* Seysmogenniye factory selevogo protsessa v nizkogorye (na primere ostrova Sakhalin) [Seismicity factors of the mudslide process in low mountains (the Sakhalin Island as a study case)] // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidroecologiya. Geokriologiya. 2007. No. 1. Pp. 75–81.
13. *Laperdin V.K.* Naledi Vostochnogo Sayana i ikh rol v razvitiy seley [Ice mounds of the East Sayan and their role in development of mudslides]. // Zapiski Zabaykalskogo filiala GO SSSR. 1976. Vyp. 101. Pp. 107–110.
14. *Laperdin V.K., Trzhitsinskiy Y.B.* Rol vyvetrivaniya v formirovaniyi tverdoy fazy seley (na primere Vostochnykh Sayan) [The role of weathering in the mudslides solid phase formation (the Eastern Sayan as a study case)] // sb.: Geologicheskkiye factory formirovaniya opolzney i selevykh potokov i voprosy ikh otsenk. M.: Izd-vo MGU, 1976. Pp. 49–54.
15. *Laperdin V.K., Kachura R.A.* Kriogenniye opasnosti v zonakh lineynykh prirodno-tekhnicheskikh kompleksov na yuge Vostochnoy Sibiri [Cryogenic dangers in the zones of linear natural/engineering complexes in the South of Eastern Siberia]. // Kriosfera Zemli. 2009. Vol. XIII. No. 2. Pp. 27–34.
16. *Ushakov A.P.* Rusloviye protsessy v nizovyakhrek v zimniy period [Channel processes in the rivers downstream during winter periods] // Trudy III Vsesoyuz. gidrol. syezda. L.: Gidrometeoizdat, 1960. Pp. 225–229.
17. *Grepachevskiy I.V.* Mutnost rek Sakhalina [The Sakhalin rivers turbidity] // Izvestiya sakhalinskogo otdela Geograficheskogo otshchestva SSSR. Yuzhno-Sakhalinsk, 1970. Pp. 71–78.
18. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Resource of the USSR surface waters] V. 18. Dalniy Vostok. Vyp. 4. Sakhalin i Kurily / pod red. M.G. Vaskovskogo. L.: Gidrometeoizdat, 1973. 263 p.
19. *Fedotov V.I.* Geografiya Rossii [Geography of Russia] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. No. 2. Pp. 73–107.
20. *Rybalchenko S.V., Gensiorovskiy Y.V.* Uvlazhneniye gruntov potentsialnykh selevykhmassivo v veseniy period na zapadnom poberezhye Yuzhnogo Sakhalina [Moistening of the ground of potentially mudslide massifs during spring periods on the Western shore of the Southern Sakhalin] // Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy konf. “Selevyie potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita”. Yuzhno-Sakhalinsk: FGBUN Institut morskoy geologii i geofiziki DO RAN, 2014. Pp. 57–60.
21. *Harris C., Brouckov A., Guodong C.* Geocryology: Characteristics and Use of Frozen Ground and Permafrost Landforms CRC Press, 2018. 810 p.
22. *Harris, C. & Lekowicz, A.G.* An analysis of stability of thawing slopes, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. Canadian Geotechnical Journal, 2000. P. 449–462.
23. *Harris C.* Mechanisms of mass movements in periglacial environments. In: Anderson, M. G. and Richards, K. S. (Eds.). Slope stability. Chichester. 1989. P. 531–559.