

УДК 627.141.1

## ПОДВЕРЖЕННОСТЬ ТЕРРИТОРИИ «ГОРОД ЮЖНО-САХАЛИНСК» СЕЛЕВЫМ ПРОЦЕССАМ

С.В. Рыбальченко

*Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения РАН, лаборатория экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова*

*Зав. лабораторией, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: rybalchenko\_sv@mail.ru*

В связи с активным освоением западного макросклона Сусунайского хребта (сведение лесной растительности, строительство газопроводов, горнолыжных трасс, профилирование склонов под различные линейные и капитальные сооружения), а также с учетом того, что часть древесной растительности в бассейнах рек, берущих свое начало на Сусунайском хребте, была повреждена в результате ветровалов 2014–2015 гг., отмечается активизация опасных экзогенных геодинамических процессов, к которым относятся селевые потоки. В связи с этим были выполнены комплексные исследования подверженности территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» селевым процессам.

Для данного района выполнено рекогносцировочное обследование селевых бассейнов западного макросклона Сусунайского хребта, после периода массового селепрохождения 31.08–01.09.2023, зафиксированы признаки и следы селепрохождений, отдельные параметры селевых потоков по прямым признакам. Собраны и проанализированы исходные данные по исследуемому району в части селевых процессов и селеформирующих факторов: архивные и фоновые данные, научные публикации, материалы инженерных изысканий, результаты полевых работ. В рамках работы на исследуемой территории установлено наличие комплекса благоприятных для селеформирования природно-территориальных условий, включая геоморфологический, геологический, гидрометеорологический, геоботанический и антропогенный факторы. В качестве одного из основных научных результатов работ первоначально был определен селевой режим территории. При помощи инструментального способа (измерений сети автоматических осадкомеров) и анализа полученных данных выявлено отсутствие выраженного высотного градиента суточных максимумов осадков. При этом фоновые данные подтверждают зависимость сумм осадков от гипсометрических уровней при более длительных периодах наблюдений (месячных, годовых).

После выполнения комплекса полевых, в том числе инструментальных работ, определения природно-территориальных условий селеформирования и селевого режима территории выполнены камеральные работы и получены основные научно-практические результаты: на основе действующих технических нормативов выполнен расчет параметров селевого стока и основных динамических характеристик формирующихся селевых потоков, определены селеопасные зоны и адресный перечень объектов, расположенных в селеопасных зонах.

**Ключевые слова:** селевой поток, селевой режим, Сахалин, селеопасные зоны, селитебная территория

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.7

### ВВЕДЕНИЕ

Для территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» характерно распространение всех структурно-реологических типов селей от связанных грязевых и грязекаменных до наносоводных потоков и селевых паводков. Формирующиеся в горной части Сусунайского хребта крупные сели могут достигать днищ долин, в которых расположены населенные пункты. Так, для г. Южно-Сахалинска представляют опасность селевые потоки, формирующиеся в селевых бассейнах Сусунайского хребта: реки Рогатка, Уюновка, Бурея, Хомутовка, Еланька, руч. Большничный, Московский, Складской и др. (рис. 1).

Площадь городской застройки г. Южно-Сахалинска, находящейся в потенциально селеопасной

зоне, составляет около 25 км<sup>2</sup>. С учетом того, что идет активное освоение западного макросклона Сусунайского хребта, повреждение древесной растительности в результате ветровалов в 2014–2015 гг. в бассейнах рек, берущих свое начало на Сусунайском хребте, отмечается активизация опасных экзогенных геодинамических процессов, к которым относятся селевые потоки. Это оказывает негативное влияние на территорию г. Южно-Сахалинска. В частности, при выпадении ливневых осадков 01.09.2023 г. отмечен массовый сход селевых потоков, как природного, так и антропогенного происхождения, с выходом на территорию г. Южно-Сахалинска. Стоит отметить, что фактических данных о селях, сходивших со Сусунайского хребта, крайне мало.



Рис. 1. Схема участка работ (исследуемые селевые бассейны указаны красным контуром)

Fig. 1. The scheme of the work area (the investigated debris flow basins are indicated by red contour)

Вопросам развития и распространения селевых процессов на территории о. Сахалин посвящены отдельные работы Н.А. Казакова, З.И. Жуковой, Ю.В. Генсиоровского, В.Ф. Перова, В.А. Курковской и др. [Отчет о работах селевого отряда..., 1984; Казаков, Жукова, 1988; Генсиоровский, 2011; Казаков, Генсиоровский, 2008; Куркова и др. 2020; Мальнева, Крестин, 2015; Рыбальченко, 2013; Регон et al., 2017; Petrova, 2022]. Однако, работы по комплексной оценке подверженности селевым процессам наиболее опасной с точки зрения потенциального ущерба от селевых процессов территории ГО «Город Южно-Сахалинск» с использованием современных ГИС и инструментальных методов, действующих технических нормативов с последующей верификацией полученных расчетных данных на основе полевых материалов, собранных непосредственно после массового селепрохождения, с составлением подробных карт селевой опасности и адресного перечня объектов в форматах ГИС, выполнены для исследуемой территории впервые.

Цель работы: на основании научных разработок и материалов полевых работ определить особенности и режим селевых процессов в речных бассейнах западного макросклона Сусунайского хребта, а также подверженность территории ГО «Город Южно-Сахалинск» селевым процессам.

Результаты работы позволяют использовать подготовленные материалы для предотвращения потенциальной угрозы населению и объектам инфраструктуры от гидрометеорологических стихийных бедствий.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках работы были выполнены сбор, анализ и систематизация исходных данных по исследуемой территории. Были проанализированы материалы инженерно-гидрометеорологических и инженерно-геологических изысканий, выполненных в ис-

следуемом районе за последние 10 лет, с привязкой к исследуемым селевым бассейнам. Инженерно-геологические изыскания позволили с достаточной вероятностью сформировать представление об инженерно-геологических условиях и геологической среде, вмещающей селевые бассейны.

Гидрометеорологические и гидрологические аспекты природно-территориальных условий равнинных селитебных районов изучены достаточно хорошо на основе многолетних наблюдений на м/с «Южно-Сахалинск» и гидрологическом посту на р. Рогатке. Данные многолетних стационарных наблюдений дают преимущественно общее представление о гидрологическом характере большинства водотоков западного макросклона Сусунайского хребта, что позволяет с достаточной вероятностью определять бытовые расходы водотоков (не связанные с гидрометеорологическими явлениями редкой повторяемости) и соответствующие им гидрологические характеристики.

Были выполнены работы по оценке влияния высотного градиента на суточные максимумы осадков, используемые для расчета параметров селевого стока. Фактическая оценка возможного высотного градиента суточных максимумов осадков была выполнена инструментальным способом посредством сети автоматических дистанционных осадкометров. Сеть из шести автоматических осадкометров, установленных на различных гипсометрических уровнях в пределах водосборных бассейнов и водоразделов руч. Большничный и р. Еланька (абс. отм. 85, 92, 198, 280, 588, 740 м) и базовой м/с «Южно-Сахалинск» (абс. отм. 22 м), была реализована на базе системы автоматического мониторинга «САМ-ГО», разработанной в ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (рис. 2). Оба водотока относятся к селеносным по фактически зарегистрированным случаям селепроявления и ущербам для селитебной территории.

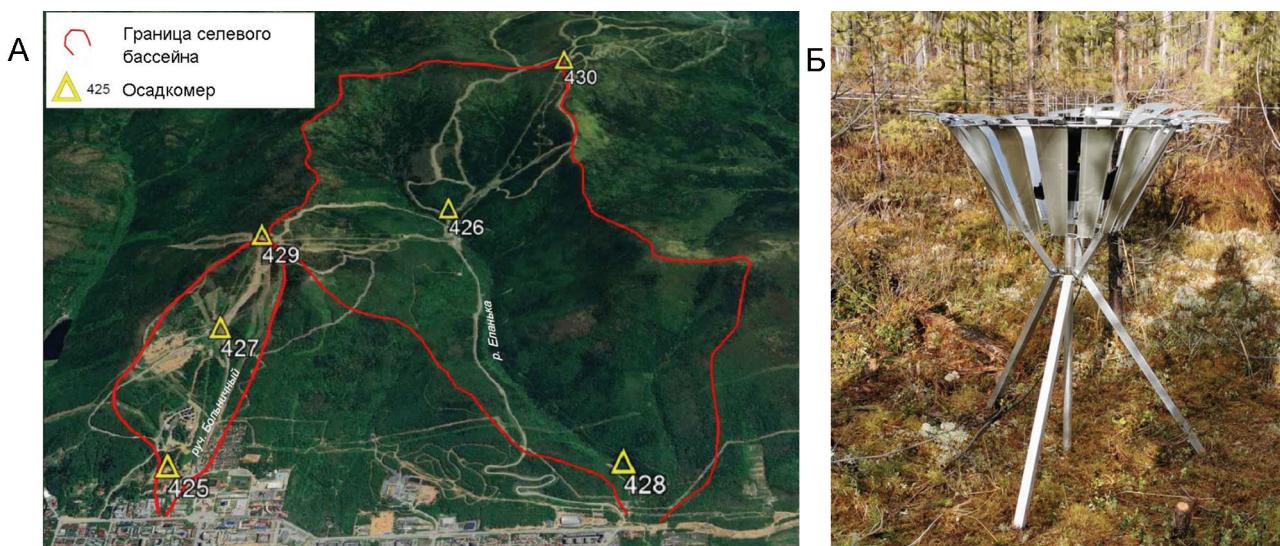


Рис. 2. Оборудование сети наблюдений:  
А – схема сети автоматических осадкомеров; Б – логгеры для измерения осадков

Fig. 2. Technical equipment:

А – The scheme of the network of automatic precipitation meters; Б – Loggers for measuring precipitation

На этапе сбора исходных данных были проанализированы научные работы по тематике селевой опасности в исследуемом районе. Несмотря на большой объем выполненных работ по изучению селевых процессов на территории Сахалина, современное состояние селевых бассейнов на Сусунайском хребте в полном объеме не исследовано, что не позволяет достаточно точно выполнить прогноз формирования крупных селевых потоков большого объема, представляющих угрозу для исследуемой селистной территории, а также определить параметры возможных селевых потоков и селевого стока.

Были проведены полевые работы и рекогносцировочное обследование селевых бассейнов: по характерным признакам (обитостям на деревьях, селевым отложениям, следам корразии и мобилизации четвертичных отложений) определены и координированы посредством GPS морфодинамические зоны селевых бассейнов, в том числе зоны зарождения, транзита и аккумуляции, селевые очаги, очаги твердого питания селей и участки прохождения послеселевого паводка, по высоте заплесков в отдельных морфостворах установлена высота прошедшей селевой волны, установлены и обмерены инструментально (посредством мерной рейки и лазерного дальномера) в части фракционного состава, в том числе отдельных селевых глыб и общего объема твердого выноса отложения селевых потоков 31.08–01.09.2023 г., а также отдельных наиболее крупных исторических селей, отложения которых были вскрыты селепрохождением в 2023 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В геоморфологическом отношении территория городского округа «Город Южно-Сахалинск» расположена в долине р. Сусуя у подножия западного макросклона Сусунайского хребта. Рельеф территории крутосклонный, глубокорасчлененный с высокой потенциальной энергией. Глубина расчленения территории на отдельных участках превышает 600 м, естественная крутизна залесенных склонов долин рек и ручьев изменяется в пределах 15–25° и круче на отдельных участках. Несмотря на относительно небольшие гипсометрические уровни в условиях низкогорья, относительные превышения водоразделов над тальвегами обеспечивают формирование селей с высокими динамическими характеристиками.

В геологическом строении исследуемой территории принимают участие метаморфические породы красносельской свиты. Эти образования относятся к палеозой-мезозойскому зеленокаменному комплексу, в его составе преобладают хлорито-серрицитовые окварцованные сланцы, также представлены кварциты и серпентиниты [Геология СССР..., 1970]. Эти породы относятся к устойчивым, очень прочным, образующим крутосклонные формы рельефа с глубокими горными врезами и бортами крутизной выше 25°. При этом, несмотря на широкое распространение относительно прочных горных пород, активные процессы выветривания и денудации приводят к повсеместному распространению раздельнозернистых или слаболитифицированных

четвертичных отложений различных генетических типов, которые и формируют селевые очаги и очаги твердого питания селей. Такое сочетание распространения различных по своей крепости горных пород приводит к формированию в верховьях водотоков консистентных связных грязекаменных селей со значительным содержанием каменно-глыбового материала, в среднем и нижнем течениях несвязных наносоводных потоков с высокой транспортирующей способностью и обильным количеством влекомых глыб.

Территория также характеризуется значительным увлажнением, обусловленным геопространственным положением региона в переходной зоне «океан – материк» с интенсивной атмосферной циркуляцией и тепломассопереносом [Рыбальченко, 2023]. Для региона характерен муссонный климат и высокая циклоническая активность [Ресурсы поверхностных вод СССР..., 1973].

Учитывая определяющую роль суточного максимума осадков в расчете параметров селевого стока и характеристик русловых селевых потоков [Инструкция..., 1976], в рамках данной работы выполнена оценка распределения осадков с учетом возможного влияния циркуляции атмосферы и высотного градиента распределения осадков. За период наблюдений сети автоматических осадкомеров было зафиксировано шесть репрезентативных событий с фактически измеренным суточным максимумом осадков 19–56 мм. Наблюдения прово-

дились в благоприятный период года наибольшей циклонической активности. При этом в августе месячная сумма осадков по данным ГМС «Южно-Сахалинск» составила 248,2 мм при среднем количестве осадков за август 94 мм, что в 2,6 раза выше нормы. Таким образом, можно сделать вывод о репрезентативности полученных данных автоматических осадкомеров за указанный период наблюдений. В табл. 1 приведены данные наблюдений осадкомеров и ГМС «Южно-Сахалинск» за 2024 г. Предполагалось, что в связи с наличием высотного градиента осадков, суточные максимумы осадков, влияющие на параметры селей, будут значительно выше в горной местности с увеличением абсолютной высоты, однако данные наблюдений автоматических осадкомеров, представленные в табл. 1, свидетельствуют об отсутствии выраженного высотного градиента суточных максимумов осадков, а также влияния румбов господствующих ветров во время осадков в исследуемом районе (в период наблюдения отмечались румбы северных и южных направлений). При этом по данным многолетних стационарных наблюдений отмечена тенденция увеличения суммарного количества осадков с увеличением абсолютной высоты водосборной площади, однако эта тенденция отмечается только для длительных периодов наблюдений в течение периода (теплого/холодного) или года, что очевидно может быть обусловлено продолжительностью и частотой осадков.

Таблица 1

#### Сравнительные данные автоматических осадкомеров (суточные максимумы осадков) за 2024 г.

Дата явления (период наблюдений суточный)	ГМС «Южно-Сахалинск» (абс. отм. 22 м)	Осадкомер № 425 (абс. отм. 92 м)	Осадкомер № 426 (абс. отм. 198 м)	Осадкомер № 427 (абс. отм. 280 м)	Осадкомер № 428 (абс. отм. 85 м)	Осадкомер № 429 (абс. отм. 588 м)	Осадкомер № 430 (абс. отм. 740 м)
01.08–04.08	97,5	–	–	–	–	47,8	–
13.08–14.08	53	51,4	56,2	53,6	–	53,4	28,8
22.08–24.08	42,4	39,8	49	36,6	–	41,2	0
31.08	31	26,4	27,4	24	–	23,2	0
05.09–06.09	23	23	29,4	24,6	–	29,6	15,6
01.10–02.10	21	17,2	17,2	18,6	18,2	12,8	0,2
01.10	44	18,8	19,2	18,4	18,8	11	0,2

При этом, учитывая, что сели относятся к краткосрочным явлениям, в отличие от паводков, и на основе действующих технических нормативов [Инструкция..., 1976], именно суточный максимум осадков установлен в качестве определяющего гидрометеорологического фактора для качественной и количественной оценки селевых процессов. В качестве суточного максимума осадков для расчетов

параметров селевых потоков принятые не фактически зарегистрированные исторические суточные максимумы осадков (по ГМС «Южно-Сахалинск» – 131 мм (2001 г.)), а аналитические данные «ВНИИГМИ-МЦД» – 181 мм, которые на настоящий момент являются наиболее достоверными.

Геоботанические условия в значительной мере не препятствуют развитию селевых процессов,

однако несколько снижают их частоту. При этом за последние годы в связи с высокой антропогенной нагрузкой на горные и предгорные территории отмечается ухудшение геоботанических условий. Значительные объемы леса (до 10% от общей площади) сведены под линейные и площадные объекты (дороги, инженерные коммуникации, горнолыжные трассы и канатные дороги, жилую застройку и др.), а также размещение участков горных работ (карьеры, породные отвалы), что приводит к увеличению склонового стока и активизации склоновых процессов.

В целом природно-территориальные геоморфологические условия района благоприятны для развития экзогенных процессов, в том числе селей различных структурно-реологических типов. Помимо геоморфологических условий к благоприятным условиям, формирующему специфический комплекс селеобразования, стоит также отнести геологические, гидрометеорологические, в меньшей степени геоботанические и антропогенные условия территории.

В рамках сбора исходных данных были выполнены полевые работы и рекогносцировочное обследование территории селевых бассейнов и предполагаемых участков воздействия селевых процессов. По результатам полевых исследований водотоков западного макросклона Сусунайского хребта было установлено, что селевыми процессами затронуты все обследованные водотоки. Зоны зарождения селей преимущественно находятся на абсолютных отметках 300–900 м. Наиболее активными в селевом отношении являются верхние и средние части долин рек (горные и предгорные участки) (рис. 3А–В). В зоне транзита селевых потоков на участках подмываемых берегов и активных русловых деформаций происходит повторная активизация селевых процессов при развитии эрозионно-транспортного селевого процесса. На территории исследования выделяется основной генетический тип селей – дождевой. Типы селевых процессов – сдвиговый, эрозионно-сдвиговый и эрозионно-транспортный. Очаги твердого питания селей расположены на всем протяжении водотоков, за исключением устьевой части, которая зачастую значительно заболочена и заозерена. Структурно-реологические типы селей: формируются связные и несвязные селевые потоки (грязекаменные и наносоводные). Связные сели формируются в верховьях водотоков и проходят по их руслам от 0,1 до 4,0 км, после чего происходит отложение основной массы твердого материала и трансформация селей в наносоводные потоки.

По данным полевых работ можно говорить о том, что максимальные объемы селей, отмеченные и обмеренные инструментально (при помощи лазерного дальномера и геодезической рейки) в

пределах исследуемой территории, колеблются в пределах от 5000 м<sup>3</sup> до 200 000 м<sup>3</sup>, средняя глубина селевых потоков 2–3 м, на отдельных участках стесненного русла и в особо крупных бассейнах может достигать 4–5 м. Селевые отложения представлены глыбово-валунными и дресвяно-щебнистыми отложениями с супесчано-суглинистым заполнителем. Мощность селевых отложений за одно явление составляет от 0,5 до 2 м.

Помимо природных селей, на Сусунайском хребте зафиксировано формирование антропогенных селевых потоков, вызванных складированием отвалов пустой породы карьеров и выемок в зонах зарождения и транзита селей. Так, за последние 15 лет были неоднократно зафиксированы случаи схода селей с отвала карьера Лиственничный, расположенного в бассейне безымянного притока р. Хомутовки (см. рис. 3Г). Самые крупные сели здесь сходили в 2009, 2013, 2020 и 2023 гг. [Музыченко и др., 2023].

Для определения селевого режима исследуемой территории был использован метод зависимости между установленными случаями селеформирования и определяющими селеформирующими факторами. Поскольку селевые процессы в зависимости от типа селевого процесса (сдвигового, эрозионно-сдвигового или эрозионно-транспортного) могут классифицироваться как экзогенные процессы водно-гравитационного или флювиального характера, в качестве рассматриваемых определяющих селеформирующих факторов приняты геологический и гидрометеорологический факторы.

Геологический фактор определяет скорость формирования потенциальных селевых массивов и очагов твердого питания селей. При этом цикличность геологического фактора сопряжена прежде всего со скоростью выветривания горных пород. Установлено, что при формировании склоновых связных грязевых и грязекаменных селей толщина горных пород, вовлеченных в сдвиговый селевой процесс на начальной стадии мобилизации селевого массива, соответствует мощности деятельного слоя сезонного замерзания – оттаивания (0,5–3 м), что подтверждает влияние цикличности геологического фактора на селевые процессы. При этом формирование потенциального селевого массива на глубину деятельного слоя в связи с широким распространением на территории Сахалина, в том числе в горной части, слабо литифицированных горных пород с низкими значениями физико-механических свойств, происходит уже в течение 2–3 лет. Стоит отметить, что данные сели отмечаются практически ежегодно, зачастую имеют небольшие объемы (первые десятки и сотни м<sup>3</sup>), формируются при динамическом развитии небольших оплывин и вязкопластичных оползней.



Рис. 3. Селевые потоки на р. Рогатке: А – зона формирования селевого потока; Б – зона транзита по притоку (р. Перевальная), июнь 2024 г.; В – зона аккумуляции селя выше плотины водохранилища; Г – антропогенные селевые потоки с северного отвала карьера Лиственничный в р. Хомутовке

Fig. 3. Debris flows on the Rogatka River: A – debris flow formation zone; Б – tributary transit zone (the Perevalnaya River), June 2024; В – debris flow accumulation zone above the water reservoir dam; Г – anthropogenic debris flows from the northern dump of the Larch quarry to the Khomutovka River

Для антропогенных селей с породных отвалов формирование небольших селей отмечается ежегодно, однако это не имеет отношения к цикличности геологического фактора, поскольку техногенные грунты изначально обладают низким сцеплением при их слабой консолидации.

Формирование селей объемом свыше 1000 м<sup>3</sup>, в том числе антропогенных, не имеет прямой зависимости от годовой цикличности геологического фактора, поскольку их частота формирования происходит значительно реже и зависит преимущественно от режима увлажнения территории, предшествующего увлажнения и выпадения селеформирующих суточных сумм осадков. При этом геологический фактор также опосредовано оказывает влияние на данные селевые процессы, поскольку после разгрузки селевых очагов и очагов твердого питания селей требуется период формирования потенциальных селевых массивов.

В отличие от геологического фактора гидрометеорологический фактор на территории Сахалина имеет определяющее значение в формировании крупных селей, в том числе катастрофических. Для определения многолетних селеформирующих периодов, обусловленных гидрометеорологическим фактором, и установления зависимости селевого режима от режима увлажнения территории первоначально были собраны данные о случаях селеформирования.

Результаты полевых исследований (в том числе, оценка возраста селевых отложений по результатам дендрохронологического анализа) и анализ архивных материалов показывают, что грязекаменные и наносводные селевые потоки формировались на Сусунайском хребте в 1875, 1924, 1928, 1930, 1944, 1947, 1955, 1964, 1970, 1981, 1987, 1992, 1993, 2001, 2002, 2003, 2009, 2023 гг., выход селевых потоков на территорию города отмечался в 1875, 1930, 1947, 1981, 2023 гг. [Казакова, 2009].

Для определения зависимости периодов массового селеформирования от цикличности гидрометеорологического фактора были проанализированы достоверно задокументированные случаи селеформирования и гидрометеорологические факторы, при которых они формировались (рис. 4). Согласно

данном рис. 5, периоды массового селеформирования достоверно коррелируются с периодами превышения среднемноголетней суммы осадков теплого периода (апрель – октябрь) по ГМС «Южно-Сахалинск», которая составляет 598 мм (по данным ВНИИГМИ МЦД на 2024 г.).

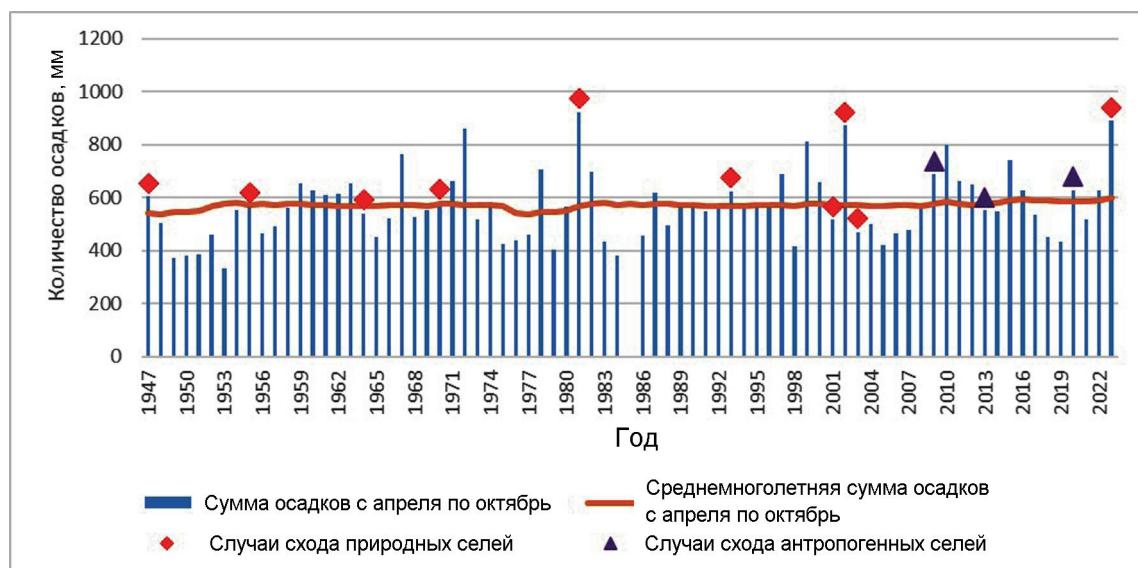


Рис. 4. Суммы осадков теплого периода по данным ГМС Южно-Сахалинска и случаи схода селей с Сусунайского хребта за период с 1947 по 2023 г.

Fig. 4. Precipitation amounts during the warm period according to the Yuzhno-Sakhalinsk Weather Station and cases of mudslides in the Susunai Range for the period of 1947–2023

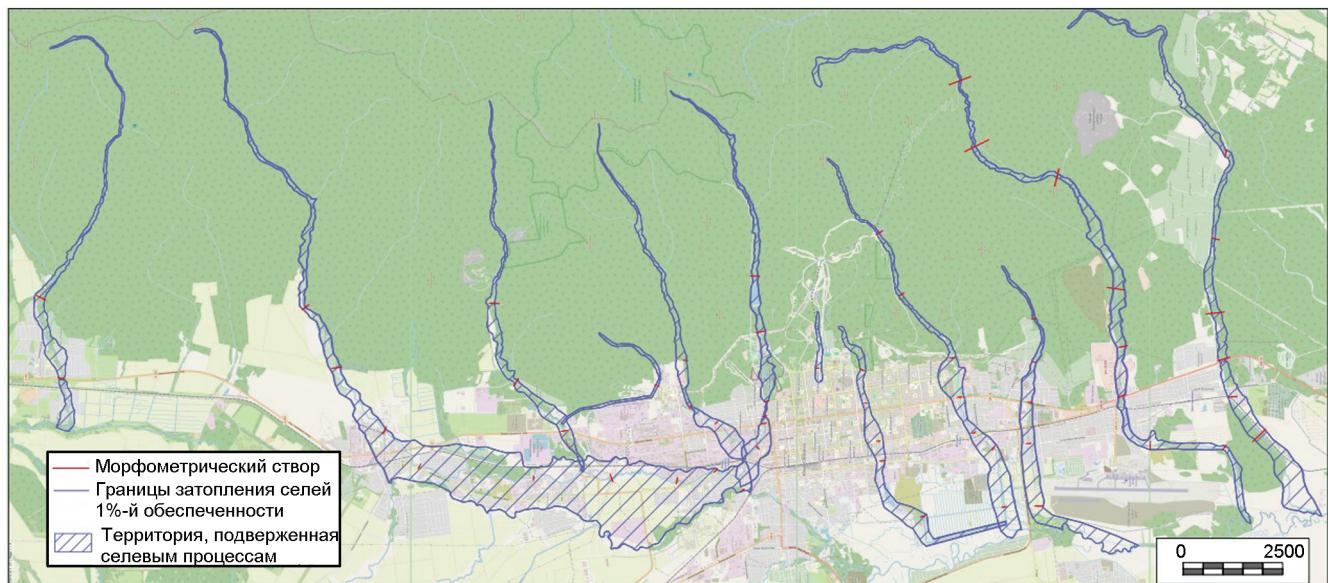


Рис. 5. Схема селевой опасности речных бассейнов западного макросклона Сусунайского хребта

Fig. 5. The scheme of debris flow hazard in river basins of the western macroslope of the Susunai Range

Таким образом, определяющую роль для селеформирования на исследуемой территории играют жидкие осадки, которые в исследуемом районе

отличаются большой интенсивностью, что способствует формирование именно селей дождевого генезиса. На основе анализа многолетних наблю-

дений установлено, что селеобразующие суммы осадков в исследуемом районе составляют 50 мм за сутки (в зависимости от степени предшествующего увлажнения пород потенциальных селевых массивов) [Казаков, Минервин, 2000; Казаков, Генсиоровский, 2007]. С учетом установленной для района исследований суммы селеформирующих осадков 50 мм за сутки, за период 1947–2024 гг. по ГМС Южно-Сахалинска зафиксирован 61 случай выпадения осадков более 50 мм/сутки, в том числе четыре случая выпадения осадков более 100 мм/сут: 16.09.1947 (106,7 мм), 05.08.1981 (115,5 мм), 23.08.2001 (131,4 мм), 01.09.2023 (104,2 мм).

Учитывая выявленную зависимость между периодами массового селеформирования, селевыми катастрофами и режимом осадков, полученные данные об исторических селях сверялись с данными о селеформирующих осадках.

Период формирования катастрофических селей на исследуемой территории составляет раз в 40–50 лет (1875, 1947, 1981, 2023 гг.) и соответствует

прохождению интенсивных осадков 1–3% обеспеченности, при обязательном предварительном увлажнении территории выше среднемноголетней суммы осадков для установленного периода (см. рис. 5). В среднем для селей на территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» период селеформирования составляет раз в 5–7 лет, при выпадении селеформирующей суммы осадков интенсивностью 50 мм/сут и предшествующем увлажнении территории [Казаков, Минервин, 2000; Казаков, Генсиоровский, 2007].

Определение селеопасных зон, в том числе зон непосредственного воздействия селевых потоков и послеселевых паводков, является одной из приоритетных прикладных задач при определении селевой опасности речных бассейнов. Для определения селеопасных зон, по заданным морфостворам были выполнены расчеты основных параметров селевого стока и динамические характеристики формируемых селевых потоков 1% обеспеченности, приведенные в табл. 2, в соответствии с действующим техническим нормативом ВСН 03-76.

Таблица 2

## Динамические характеристики селевых потоков

Название водотока	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Протяженность, км	Уклон селевого русла, %	Максимальная глубина селевого потока 1% обеспеченности, м	Скорость селя 1% обеспеченности по ОДМ218.2.052-2015, м/с	Максимальная скорость селя 1% по ОДМ218.2.052-2015, м/с	Максимальный расход селевого паводка с вероятностью превышения 1%, м <sup>3</sup> /с	*Объем выноса твердых материалов за расчетный инструментально измеренный максимальный сель, тыс. м <sup>3</sup>	Структурно-реологический тип селя	Тип селевого процесса	Тип селя	Тип ПСМ
Р. Бурея	13,4	4,45	169	3,2	3,6	6,4	170,1	178,4/~160				
Р. Еланька	5,09	1,83	279	3,3	4,0	7,1	148,1	64,7/~55				
Р. Зима	2,03	2,39	175	1,35	2,8	5,0	31,2	13,4/~				
Р. Колка	25,2	8	108	3,1	3,2	5,7	177,1	312,9/~				
Р. Красносельская	29,9	8,8	105	3,23	3,3	5,9	196,9	384,3/~				
Руч. Пригородный	2,46	2,38	228	1,89	2,9	5,2	50,6	25,2/~				
Р. Рогатка	16,1	4,19	199	4,5	2,3	4,1	226,3	229,1/~200				
Р. Уюновка	14,9	6,23	153	3,2	3,4	6,1	169,5	249,9/~220				
Р. Хомутовка	7,58	1,53	317	4,1	4,1	7,3	217,1	78,4/~				
Р. Христофоровка	15,4	5,38	157	3,56	2,8	5,0	203,2	273,9/~				
Руч. Складской	2,62	1,76	55,5	2,1	2,7	4,8	90,2	33,5/~				
Руч. Больничный	2,29	1,01	79,9	2,0	2,8	5,1	104,3	24,8/~				

Примечание. \* Инstrumentально измеренные (тыс. м<sup>3</sup>) данные объема выноса твердых материалов за максимальный сель приведены только для водотоков, на которых в рамках полевых работ были четко идентифицированы отложения исторических селей и границы их аккумуляции.

Полученные данные по объему твердого выноса и селевым уровням сверялись с материалами рекогносцировочного обследования на предмет их репрезентативности и достоверности. Стоит отметить, что в условиях редкой повторяемости селей данные о фактических параметрах селевых потоков, полученные по материалам полевых работ, могут выступать только в качестве верификационных сведений.

На основе ЦМР и вычисленного значения наивысшего селевого горизонта, с учетом физических особенностей селевых потоков: возможности блуждания селевого потока в пределах долины в связи с его высокой абразионной способностью и значительным динамическим импульсом, заваливания водопропускных сооружений, в том числе слабо канализированных, естественных селевых русел селевыми отложениями (особенно в пределах контактного слоя), существующих водопропускных сооружений и их способности/не способности к пропуску селевых расходов экспертыным методом определены зоны воздействия селевых потоков и послеселевых паводков – селеопасные зоны (см. рис. 5). Список объектов, расположенных в селеопасной зоне, определен на основе открытых картографических сервисов при наложении в цифровом формате селеопасных зон операторским методом. В селеопасной зоне расположено около 10% селитебной территории города Южно-Сахалинска ( $25,6 \text{ км}^2$ ), 3175 объектов жилой и промышленной застройки.

## ВЫВОДЫ

На исследуемой территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» определено наличие комплекса благоприятных для селеформирования природно-территориальных условий, включая геоморфологический, геологический, гидрометеорологический, геоботанический и антропогенный факторы. Определяющий гидрометеорологический фактор для качественной и количественной оценки селевых процессов – суточный максимум осадков. При помощи инструментального способа (измерений сети автоматических осадкометров) на основе собранных и проанализированных данных выявлено отсутствие выраженного высотного градиента суточных максимумов осадков на исследуемой тер-

ритории. При этом фоновые данные подтверждают зависимость сумм осадков от гипсометрических уровней при более длительных периодах наблюдений (месячных, годовых).

На основе установленной зависимости между периодами массового селеформирования, селевыми катастрофами и режимом осадков, анализа фоновых данных о зарегистрированных селях, подтвержденными результатами рекогносцировочных обследований и методами дешифровки исторических селей, установлен селевой режим территории. В среднем для селей на территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» период селеформирования составляет раз в 5–7 лет, при выпадении селеформирующей суммы осадков интенсивностью 50 мм/сут и предшествующем увлажнении территории. Катастрофические сели, представляющие угрозу для селитебной территории, формируются в период крупных паводков редкой повторяемости 1–3% обеспеченности.

По результатам рекогносцировочного обследования селевых бассейнов достоверно установлены следы селепрохождений и селевая опасность обследованных водосборов. По данным полевых работ максимальные объемы селей, отмеченные в пределах исследуемой территории, колеблются в пределах от 5000 до 200 000 м<sup>3</sup>, средняя глубина селевых потоков 2–3 м, на отдельных участках стесненного русла и в особо крупных бассейнах может достигать 4–5 м.

На основе действующих технических нормативов и собственных научных работ выполнен расчет параметров селевого стока и основных динамических характеристик формирующихся селевых потоков. Полученные расчетным путем параметры селевого стока и динамические характеристики формируемых селевых потоков 1%-й обеспеченности, подтверждены данными рекогносцировочного обследования в части отмеченных селевых уровней и объемов твердого стока, что указывает на репрезентативность выполненных расчетов, достаточных для дальнейшего определения селеопасных зон в пределах исследуемой территории. На основе ЦМР и вычисленного значения наивысшего селевого горизонта определены селеопасные зоны и адресный перечень расположенных в них объектов.

**Благодарность.** Представленные результаты получены при финансовой поддержке государственного задания FWWW-2025-0001.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин / под ред. В.Н. Вещагина. М.: Недра, 1970. 403 с.

Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03-76. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 30 с.

- Генсиоровский Ю.В.* Экзогенные геологические процессы и их влияние на территориальное планирование городов (на примере о. Сахалин): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 2011. 19 с.
- Казаков Н.А., Жукова З.И.* Районирование о. Сахалин по степени проявления селевой деятельности // Труды Гидрометцентра Сахалинского УГМС. Региональные исследования. 1988. С. 131–137.
- Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В.* Влияние вертикального градиента осадков на характеристики гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 4. С. 342–347.
- Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В.* Грязекаменные сели катастрофических объемов в низкогорье острова Сахалин // Труды международной конференции «Селевые потоки: Катастрофы, риск, прогноз, защита», 22–29 сентября 2008 г. Пятигорск, 2008. С. 45–48.
- Казаков Н.А., Минервин И.Г.* Селевые процессы на о. Сахалин // Прикладная геоэкология, чрезвычайные ситуации, земельный кадастр и мониторинг. 2000. Вып. 4. С. 35–38.
- Казакова Е.Н.* Повторяемость крупных грязекаменных селей на Сусунайском хребте по данным дендрохронологического анализа Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2009. № 3. С. 258–263.
- Куровская В.А., Виноградова Т.А., Васякина А.В.* Моделирование паводков и наносоводных селей в бассейне реки Сусуя // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сборник докладов. Санкт-Петербургский государственный университет. СПб., 2020 С. 307–312.
- Мальнева И.В. Крестин Б.М.* Оценка опасности оползней и селей на о. Сахалин и развитие этих процессов в ближайшем десятилетии // Геодинамические про-
- цессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. 2015. С. 343–345.
- Музыченко Л.Е., Лобкина В.А., Музыченко А.А.* Расчет параметров антропогенных селей, формирующихся на отвалах карьера Лиственничный (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 1. С. 89–99.
- ОДМ 218.2.052-2015 Методические рекомендации по проектированию и строительству противоселевых сооружений для защиты автомобильных дорог. М.: НТЦ ГеоПроект, 2015.
- Отчет о работах селевого отряда по изучению селевых явлений о. Сахалин за 1983 г. / Проблемная лаборатория снежных лавин и селей. М.: Географический факультет МГУ, 1984. 73 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Вып. 4. Дальний Восток. Сахалин и Курилы / под ред. М.Г. Васьковского. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 263 с.
- Рыбальченко С.В.* Селевая опасность для населенных пунктов Сахалинской области // ГеоРиск. 2013. № 3. С. 40–44.
- Рыбальченко С.В.* Особенности формирования селеопасных районов в переходных зонах «материк – океан» на примере о. Сахалин // Экологические системы и приборы. 2023. № 6. С. 74–83.
- Perov V, Chernomorets S, Budarina O, et al.* Debris flow hazards for mountain regions of Russia: Regional features and key events, *Natural Hazards*, 2017, no. 88(1), p. 199–235.
- Petrova E.* Investigation of accidents in the infrastructure triggered by debris flows in Russia, *Natural Hazards*, 2022, vol. 114, no. 3, p. 3293–3308.

#### Электронный ресурс

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://meteo.ru> (дата обращения 20.03.2025).

Поступила в редакцию 24.06.2025

После доработки 15.07.2025

Принята к публикации 17.10.2025

## SUSCEPTIBILITY OF THE YUZHNO-SAKHALINSK CITY TERRITORY TO MUDFLOWS

S.V. Rybalchenko

Special Research Bureau for Automation of Marine Research Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Laboratory of Exogenous Geodynamic Processes and Snow Cover

Head of the laboratory, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: rybalchenko\_sv@mail.ru

The active development of the western macroslope of the Susunai range (deforestation, construction of a gas pipeline, ski slopes, slopes grading for various linear and permanent structures), as well the fact that the woody vegetation in the river basins rising in the Susunai range was partly damaged by windstorms, have led to the increase in dangerous exogenous geodynamic processes, including the debris flows. Thereby the susceptibility of the territory of the Yuzhno-Sakhalinsk urban district to debris flow processes was studied comprehensively.

For the area, a reconnaissance survey of the debris flow basins formed on the western macroslope of the Susunai range after a period of mass debris flows of 31.08–01.09.2023, was performed; signs and traces of debris flows were recorded, as well as individual parameters of debris flows based on direct signs. The initial

data on the debris flow processes and forming factors within the studied area were collected and analyzed, such as archival and file materials, scientific publications, engineering survey materials, and field work results. During the field work on the studied territory a complex of natural and territorial conditions promoting the debris flows formation was identified, including geomorphologic, geological, hydrometeorologic, geobotanical and anthropogenic factors. The debris flow regime of the territory was revealed as a main scientific result of the work. Application of an instrumental method (measurements of a network of automatic precipitation meters) and analysis of the data obtained showed the absence of a pronounced altitudinal gradient of daily precipitation maxima. At the same time, the archival data confirm the dependence of precipitation amounts on the hypsometric levels for the longer observation periods, i.e. monthly and annual ones.

After completing a complex of field work, including instrumental measurements, and determining the natural and territorial conditions of debris flow formation and the debris flow regime of the territory, the data were processed in the laboratory and the main scientific and practical results were obtained. The parameters of the debris flow and the main dynamic characteristics of emerging debris flows were calculated based on the current technical standards. The debris flow-prone zones were identified and the address list of objects located in debris flow-prone zones was compiled.

**Keywords:** debris flow, debris flow regime, the Sakhalin Island, debris flows-prone zones, residential area

**Acknowledgements.** The presented results were obtained with financial support from state assignment FWWW-2025-0001.

## REFERENCES

- Gensiorovskii Yu.V. *Ekzogennye geologicheskie protsessy i ikh vliyanie na territorial'noe planirovanie gorodov (na primere o. Sakhalin)* [Exogenous geological processes and their influence on the territorial planning of cities (case study of the Sakhalin Island)], Extended Abstract of Ph.D. in Geology and Mineralogy, Irkutsk, 2011, 19 p. (In Russian)
- Geologiya SSSR, tom 33. Ostrov Sahalin* [Geology of the USSR, volume 33. The Sakhalin Island], V.N. Vereshchagin (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1970, 403 p. (In Russian)
- Kazakov N. A. Zhukova Z. I. Raionirovaniye o. Sakhalin po stepeni proyavleniya selevoi deyatel'nosti [Zoning of the Sakhalin Island according to the degree of mudflow activity], *Trudy Gidrometsentra Sakhalinskogo UGMS*, Regional'nye issledovaniya, 1988, p. 131–137. (In Russian)
- Kazakov N.A., Gensiorovskii Yu.V. Gryazekamennye seli katastroficheskikh ob'emov v nizkogor'e ostrova Sakhalin [Mudslides of catastrophic volumes in the low mountains of the Sakhalin Island], *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii "Selevye potoki: Katastrofy, risk, prognoz, zashchita"* [Mudflows: catastrophes, risk, forecast, protection], Pyatigorsk, 22–29 sentyabrya 2008, Pyatigorsk, 2008, p. 45–48. (In Russian)
- Kazakov N.A., Gensiorovskii Yu.V. Vliyanie vertikal'nogo gradiента osadkov na kharakteristiki gidrologicheskikh, lavyňykh i selevykh protsessov v nizkogor'e. [Influence of vertical precipitation gradient on characteristics of hydrological, avalanche and mudflow processes in low mountains], *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2007, no. 4, p. 342–347. (In Russian)
- Kazakov N.A., Minervin I.G. Selevye processy na o. Sahalin [Mudflow processes on the Sakhalin Island], *Prikladnaya geoekologiya, chrezvychajnye situacii, zemel'nyj kadastr i monitoring*, Moscow, POLTEKS Publ., 2000, vol. 4, p. 35–38. (In Russian)
- Kazakova E.N. Povtoryaemost' krupnykh gryazekamennykh selei v Susunaiskom khrebre po dannym dendrokronologicheskogo analiza [Recurrence of large mudstone mudslides in the Susunai Range according to dendrochronological analysis], *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, hidrogeologiya, geokriologiya*, 2009, no. 3, p. 258–263. (In Russian)
- Kurovskaya V.A., Vinogradova T.A., Vasyakina A.V. [Modeling of floods and mudslides in the Susuya River basin], *Gidrologiya: ot poznaniya k mirovozzreniyu* [Hydrology; from the study to the worldview], *Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamяти vydayushchegosya russkogo uchenogo Yurya Borisovicha Vinogradova*, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet, St Peterburg, 2020, p. 307–312. (In Russian)
- Mal'neva I.V. Krestin B.M. [Assessment of the danger of landslides and mudslides on the Sakhalin Island and the development of these processes in the next decade], *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy. Opyt Neftegorska* [Geodynamic processes and natural hazards. The experience of the Neftegorsk town], 2015, p. 343–345. (In Russian)
- Muzychenko L.E., Lobkina V.A., Muzychenko A.A. Raschet parametrov antropogennyh selej, formiruyushchihsya na otvalah kar'era Listvennichnyj (o. Sahalin) [Calculation of the parameters of anthropogenic mudflows formed on the dumps of the Larch quarry (the Sakhalin Island)], *Tihookeanskaya geologiya*, 2023, vol. 42, no. 1, p. 89–99. (In Russian)
- ODM 218.2.052-2015 *Metodicheskie rekomendacii po proektirovaniyu i stroitel'stu protivoselevykh sooruzhenij dlya zashchity avtomobil'nyh dorog* [ODM 218.2.052-2015 Methodological recommendations for the design and construction of anti-mud structures for the protection of highways], Moscow, NTC GeoProekt Publ., 2015. (In Russian)
- Otchet o rabotakh selevogo otryada po izucheniyu selevykh yavlenii o. Sakhalin za 1983 g* [Report on the work of the Sakhalin Island mudflow detachment for 1983], Problemnaya laboratoriya snezhnykh lavin i selei, Geograficheskii fakul'tet Moscow St. un-t Publ., 1984, 73 p. (In Russian)
- Perov V., Chernomorets S., Budarina O. et al. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: Regional features and key events, *Natural Hazards*, 2017, no. 88(1), p. 199–235.
- Petrova E. Investigation of accidents in the infrastructure triggered by debris flows in Russia, *Natural Hazards*, 2022, vol. 114, no. 3, p. 3293–3308.

*Resursy poverhnostnyh vod SSSR, t. 18, vyp. 4, Dal'nyj Vostok. Sahalin i Kurily* [Surface water resources of the USSR, vol. 18, vol. 4, The Far East. Sakhalin and the Kuril Islands territories of the Yuzhno-Sakhalinsk City District], M.G. Vas'kovsky (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, 263 p. (In Russian)

Rybal'chenko S.V. Osobennosti formirovaniya seleopasnyh rajonov v perekhodnyh zonah "materik – okean" na prim-

ere o. Sahalin [Features of the formation of mudflow-prone areas in the "mainland – ocean" transition zones; case study of the Sakhalin Island], *Ekologicheskie sistemy i prirody*, 2023, no. 6, p. 74–83. (In Russian)

Rybalchenko S.V. Selevaya opasnost' dlya naseleennyh punktov Sahalinskoj oblasti.[Mudflow hazards for the Sakhalin region settlements], *GeoRisk*, 2013, no. 3, p. 40–44. (In Russian)

Received 24.06.2025

Revised 15.07.2025

Accepted 17.10.2025