



УДК 556.53(571.53)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.39>

Гидролого-геоморфологические предпосылки формирования селевых потоков на горных реках Слюдянского района Иркутской области

Н. В. Кичигина

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

М. Ю. Опекунова*

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Изучены гидролого-геоморфологические условия формирования селевых потоков на реках Слюдянского района. Для этого на селе- и паводкоопасных реках Хамар-Дабана выполнен анализ рядов максимальных паводочных расходов за 1966–2022 гг.; приведена характеристика взвешенных наносов на реках; дана характеристика строения рельефа территории, выявлены геоморфологические факторы развития катастрофических паводков и селей. По данным Росгидромета для каждого ряда максимальных паводочных расходов были построены эмпирические кривые обеспеченности и различные варианты ее аналитической аппроксимации. Определены годы с высокими паводками с вероятностью максимальных расходов ниже 10 %. Для этих лет выполнен анализ взвешенных наносов. Получены выводы о том, что при прохождении селевых паводков редкой обеспеченности увеличение расходов происходит в первую очередь за счет увеличения скоростей течения – в 4–9 раз. Высокие скорости течения создают предпосылки для селевых проявлений. Наиболее разрушительным был селевой паводок в июле 1971 г. с обеспеченностями максимальных расходов воды 0,001–1,9 % и наибольшими значениями расходов взвешенных наносов. Многократное увеличение расходов взвешенных наносов и мутности происходит при прохождении максимальных расходов воды обеспеченностью 10 % и ниже. Наиболее благоприятными геоморфологическими условиями для развития селевых и катастрофических паводков обладают реки Безымянная, Слюдянка, Хара-Мурин и Утулик. Бассейны рек Снежной и Похабихи обладают минимальными средними значениями рассмотренных показателей, что объясняется их минимальной и максимальной площадью соответственно.

Ключевые слова: селевые потоки, дождевые паводки, максимальные расходы, горные реки, гидролого-морфологический анализ, Слюдянский район.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20059, <https://rscf.ru/project/24-27-20059/>

Для цитирования: Кичигина Н. В., Опекунова М. Ю. Гидролого-геоморфологические предпосылки формирования селевых потоков на горных реках Слюдянского района Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 53. С. 39–54. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.39>

Hydrological and Geomorphological Features of the Mudflows Formation on Mountain Rivers of the Slyudyansky District of the Irkutsk Region

N. V. Kichigina

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

M.Yu. Opekunova*

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article studies the hydrological and geomorphological conditions of mudflow formation on the rivers of the Slyudyanka district based on an integrated approach. For this purpose, the analysis of maximum rainfall water discharge series for the period 1966–2022 was performed on the mudflow- and flood-hazardous rivers of the Khamar-Daban. The characteristics of suspended sediments on the rivers according to the data of hydrological posts are given. The characteristics of the relief structure of the territory are given. The geomorphological factors of the development of catastrophic floods and mudflows are identified. According to Roshydromet data, empirical probability curves and various options for its analytical approximation were constructed for each series of maximum discharges. The calculated values of maximum annual expenses of standard provisions were obtained. The years with high floods with the probability of maximum discharges below than 10 % were determined. The analysis of suspended sediments was performed for these years. The subjects of the study to identify hydrological and geological hazards are fluvial systems, their dynamic properties, spatial and temporal patterns of their functioning. Particularly destructive mudflows occasionally flow along the Slyudyanka, Bezymyannaya, Utulik, and Khara-Murin rivers. The following geomorphological factors have a significant impact on the formation of the solid component of the runoff of the territory under consideration: slope steepness, the proportion of deeply dissected relief (i.e., its energy), and the thickness of loose sediments subject to denudation processes and participating in sediment transport (for the basins under consideration, these are groups of slope processes). This study examines morphometric characteristics. The influence of slope length and steepness was taken into account using a combined relief function, which is used to quantify the relief factor when calculating the soil loss modulus – the LS factor. Conclusions were obtained that during the passage of mudflow floods of rare probability, the increase of water discharges occurs primarily due to the increase in flow velocity, which increased 4–9 times. High flow velocities create prerequisites for mudflow manifestations. The most destructive mudflow was in July 1971, when the probability of maximum water discharge on the rivers was 0.001–1.9 %, and the values of suspended sediment flow rates were the highest according to observations. A multiple increase in suspended sediment flow rates and turbidity occurs during the passage of maximum water discharge with a probability of 10 % and lower. The Bezymyannaya, Slyudyanka, Khara-Murin, and Utulik rivers have the most favorable geomorphological conditions for the development of mudflows and catastrophic floods. The Snezhnaya and Pokhabikh river basins have minimal average values of the considered indicators, which is explained by their minimum and maximum areas, respectively.

Keywords: mudflows, rainfall floods, maxima discharge, mountains rivers, hydrological and morphological analysis, Slyudyansky district.

For citation: Kichigina N.V., Opekunova M.Yu. Hydrological and Geomorphological Features of the Mudflows Formation on Mountain Rivers of the Slyudyansky District of the Irkutsk Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 53, pp. 39–54. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.39> (in Russian)

Введение

Слюдянский район является самым селеопасным муниципальным образованием в Иркутской области. Сочетание имеющихся здесь гидроклиматических и геоморфологических факторов способствует формированию селевых потоков [Будз, 1969; Агафонов, 1990; Опасные ... , 2012]. Сели на рассматриваемой территории являются одними из наиболее опасных природных явлений и потенциально могут привести к серьезной экологической катастрофе, учитывая, что шлам-накопители закрытого Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) в настоящий момент заполнены и расположены в непосредственной близости от акватории оз. Байкал.

В Слюдянском районе наибольшее развитие селевые процессы имеют в приустьевых частях русел рек северного склона хр. Хамар-Дабан и в меньшей степени – вдоль трассы Кругобайкальской железной дороги. За исторический период развития территории с начала XX в. сели здесь происходили всегда и приводили к катастрофическим последствиям со значительными ущербами. Самое выдающееся катастрофическое событие зафиксировано в 1971 г., после чего произошло резкое снижение селевой активности на водотоках Южного Прибайкалья. Последующие десятилетия характеризовались длительным селевым затишьем. За это время в бассейнах рек скопилось большое количество материала, который при резком изменении гидроклиматической ситуации может стать твердой фазой селей. В случае выпадения экстремального количества атмосферных осадков может произойти активизация селевых процессов, способных нанести значительный ущерб. Так, в 2019 г. прошли селевые паводки на ряде рек северного склона хр. Хамар-Дабан. Они спровоцировали природно-техногенные процессы в долинах рек, вызвали разрушение инженерных объектов. Произошло заполнение водой карт-накопителей БЦБК. Селевой поток изменил русло р. Большой Осиновки, которая находится ближе всего к карт-накопителям Солзанского полигона. Однако катастрофических последствий удалось избежать.

Изучение гидролого-геоморфологических условий формирования селевых паводков наряду с атмосферными осадками важно для понимания закономерностей их формирования и прогнозирования их поведения [Chen, Yu, 2011; Wang, Liu, 2006]. Цель работы – на основе комплексного подхода изучить гидрологические и геоморфологические условия, необходимые для формирования селевых потоков на реках района. Для этого решались следующие конкретные задачи:

- 1) на селеопасных реках Хамар-Дабана выполнен анализ рядов максимальных расходов воды дождевых паводков за период 1966–2022 гг.;
- 2) дана характеристика взвешенных наносов на реках по сведениям гидрологических постов;
- 3) приведена характеристика строения рельефа территории, выявлены геоморфологические факторы развития катастрофических паводков и селей.

Исходные данные и методика исследования

Выполнен анализ рядов срочных максимальных расходов воды дождевых паводков за период 1966–2022 гг. на шести селе- и паводоопасных реках Слюдянского района на гидропостах: Снежная – пос. Выдрино, Хара-Мурин – пос. Мурино, Утулик – ст. Утулик, Безымянная – ст. Мангутай, Слюдянка – г. Слюдянка, Похабиха – г. Слюдянка. Для каждого ряда максимальных паводочных расходов были построены эмпирические кривые обеспеченности и подобраны различные варианты ее аналитической аппроксимации, а именно: по кривой Пирсона III типа с оценкой параметров по методу моментов и графоаналитическим методом, по функционально-нормальной кривой распределения Виноградова СЗ и непараметрическим методам аппроксимации [Виноградов, 1988]. Получены расчетные значения максимальных паводочных расходов стандартных обеспеченностей. На графики вынесены осредненные по всем методам значения квантилей кривых распределения вероятностей максимального паводочного расхода – 1, 2, 5, 10, 20 и 25 %. Определены годы с высокими паводками с вероятностью максимальных расходов ниже 10 %. Для этих лет выполнен анализ взвешенных наносов.

Исходной информацией для оценки экстремальных характеристик стока за период 1966–2022 гг. были данные максимальных срочных паводочных расходов воды, данные расходов взвешенных наносов и мутности по данным Росгидромета, в том числе из ежегодников и Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО)¹.

Методической основой исследований геоморфологического строения и процессов экзогенного рельефообразования в пределах бассейнов исследования служит гидролого-морфологический анализ, разрабатываемый отечественными, зарубежными школами русловедения [Маккавеев, 2003; Чернов, 2009; Alekseevskiy, Berkovich, Chalov, 2008; Chalov, 2008; Chalov, 2011; The distribution ... , 2021], а также комплекс методов изучения экзогенных рельефообразующих процессов [Агафонов, 1990; Выркин, 1998; Макаров, 2012], в том числе и анализ морфометрических характеристик рельефа.

Предметом исследования для выявления гидрологических и геологических опасностей выступают флювиальные системы, их динамические свойства, пространственно-временные закономерности их функционирования.

В рамках предстоящих исследований эрозионно-руслотворные системы средних и больших рек для каждого геоморфологического района идентифицируются как «сквозные» или «транзитные», так как определяющим и ведущим процессом для таких рек будет флювиальный, а спектр остальных – сопутствующих, в том числе и неблагоприятных, экзогенных процессов будет служить фоном. Для малых рек, напротив, нефлювиальные и флювиальный процессы могут либо преобладать, либо уравнивать друг друга на разных временных отрезках. В этой связи особый интерес представляют селевые русла и бассейны.

Реки района селеопасны, что обусловлено, помимо гидроклиматических процессов, сочетанием экзогенных и эндогенных факторов рельефообразования.

¹ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) URL: <https://gmvo.sknivh.ru> (дата обращения: 29.01.2025).

В бассейнах основных рек района поставщиками обломочного материала в долины служат оползни-сплывы [Макаров, 2012] и другие склоновые процессы [Агафонов, 1990], а при прохождении селей эрозионная деятельность рек приводит к размыву уже существующих в днищах долин скопленных рыхлых отложений в террасах, прирусловых валах, конусах выноса боковых притоков, что существенно увеличивает твердую составляющую стока.

Высокая сейсмичность территории [Хромовских, 1965] усиливает интенсивность склоновых процессов [Ивановский, 1979], также может провоцировать формирование и прохождение селей [Evolution ... , 2018].

Особенно разрушительные селевые потоки время от времени проходят по рекам Слюдянка, Безымянная, Утулик, Хара-Мурин, а р. Похабиха – слабоселеопасна [Литвин, 1991].

В пределах Утулиско-Солзанской равнины селевые потоки верховий рек выходят на широкие равнинные участки и теряют здесь основную массу рыхлого материала, по мере приближения к озеру нередко превращаются в водные потоки.

Территория исследования

Территория исследования включает в себя северный макросклон хр. Хамар-Дабан и прибрежную полосу южного побережья оз. Байкал в пределах бассейнов рек Снежной, Хара-Мурин, Утулик, Безымянной, Слюдянки и Похабихи (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Морфометрические характеристики рек и их бассейнов

Название реки	Порядок реки	Площадь, км ²	Длина главной реки, км	Интервалы высот (исток/ устье), м	Средняя высота, бассейна, м
Снежная	7	3004,0	173	2280/456	1475
Хара-Мурин	7	1158,0	86	1644/456	1515
Утулик	6	972,0	86	2396/456	1442
Безымянная	5	211,1	19	2090/456	1235
Слюдянка	5	72,5	21	1700/456	1102
Похабиха	4	64,6	20	1520/456	1023

По геоморфологическому районированию А. Г. Золотарева [Атлас, 2004], территория исследования расположена в пределах сочленения района гор, приуроченных к плечам рифта Саяно-Байкальской горной области.

Формирование современного рельефа Прибайкалья связано с проявлением в кайнозое крупных тектонических движений, которые обусловили контрастный облик рельефа, северо-восточную ориентировку основных морфоструктур, а также высокую раздробленность коренной основы, проседание блоков по склонам котловин.

Типы рельефа представлены от высокогорного с древними ледниковыми формами до низкогорного развитого в поле распространения гранитоидовархей-протерозойского возраста и неогеновых базальтов, имеющих незначительное распространение. Полоса побережья представлена неоген-четвертичными отложениями заболоченных Култукско-Слюдянской низ-

менности (реки Похабиха и Слюдянка), Утуликско-Солзанской равнины (реки Безымянная и Утулик) и западной оконечности Танхойской равнины (участок р. Хара-Мурин – Снежная). Характеристика типов рельефа, экзогенных процессов территории исследования приведены в табл. 2.

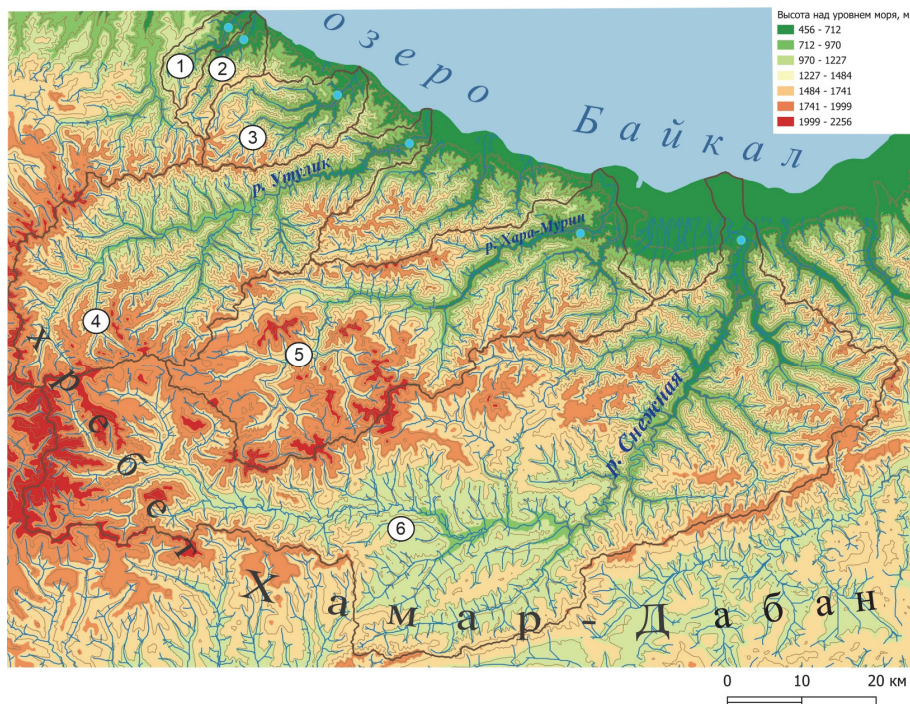


Рис. 1. Территория исследования в пределах бассейнов рек Похабихи (1), Слюдянки (2), Безымянной (3), Утулик (4), Хара-Мурин (5) и Снежной (6); голубыми пунсонами обозначены гидропосты

Бассейны ориентированы с юго-запада на северо-восток, площади бассейнов увеличиваются с запада на восток. Южные оконечности рассматриваемых бассейнов ограничены осевой частью хр. Хамар-Дабан. С востока на запад происходит увеличение площади бассейнов и длины главных рек, что обусловлено развитием морфоструктуры Байкальской рифтовой зоны. Бассейны рек Похабихи и Слюдянки с запада ограничиваются Комаринским хребтом (максимальная высота – 1499 м) субмеридионального простирания, с востока отделены от бассейна р. Безымянной Становым хребтом (Лысая Гора – 1583 м), а на юго-востоке – массивом пика Черского (2090 м). Водораздел между бассейнами Безымянной и Утулик представлен массивами гор Мангутай (1856 м), Сосновский Голец (844 м), Безымянный Голец (2086 м). Далее на запад водораздел бассейна р. Утулик представлен массивами горы Вершина Маргасан (2278 м), с юга – Тумбусун Дума (2256 м). Восточная водораздельная линия тянется по точкам гор Кулемная (1105 м), Голец Солзан (2040 м), безымянной вершины (2046 м).

Таблица 2

Типы рельефа северного макросклона хр. Хамар-Дабан, экзогенные процессы в пределах бассейнов исследования

Морфоструктурная ступень	Высотный ярус (м над у. м.)	Характеристика рельефа	Формы рельефа (мезо-микро-нанорельеф)	Группы экзогенных геоморфологических процессов
Верхняя ступень (высокогорный и среднегорный эрозионно-денудационный рельеф с древними ледниковыми формами)	1600–2396	Плосковершинные водоразделы с троговыми и планиморфными долинами	Каменные (многоугольники) полигоны разного топологического порядка, каменные венки, каменные розетки	Криогенного выветривания; мерзлотная (процессов местного перемещения вещества)
	1300–1600	Узкие гребневидные и плоские и холмистые водораздельные поверхности, склоны средней крутизны в сочетании эрозионно-денудационными склонами, V и U-образными типами речных долин	Нагорные террасы, курумы, делли. Денудационные склоны средней крутизны	Гравитационно-склоновый, в том числе нивально-гравитационные; склоновый гидрогенного сползания и течения; склоновый водно-эрозионный; криогенно-склоновый
Средняя ступень (среднегорный и низкогорный эрозионно-денудационный рельеф)	1000–1300	Полого-холмистый рельеф водоразделов в сочетании с денудационными останцами и узкими грядами, полигенетические склоны разной крутизны, V и U-образными и трапециевидными типами речных долин	Долины временных водотоков с заболоченными днищами, делли, курумы Долины временных водотоков с крутыми обвально-осыпными склонами, террасированные речные долины, конусы выноса, селевой микрорельеф	Гравитационно-склоновый, в том числе нивально-гравитационные; склоновый гидрогенного сползания и течения; склоновый водно-эрозионный; криогенно-склоновый; флювиальный
Нижняя ступень (эрозионно-денудационный низкогорный и эрозионно-аккумулятивный равнинный и низменный рельеф)	600–1000	Полого-волнистые и гребневидные водоразделы в сочетании с полигенетическими склонами, долины V-образные и трапециевидные	Долины временных водотоков, конусы выноса, террасированные речные долины, селевые гряды, гривы, речные террасы	Флювиальный; склоновый водно-эрозионный, фитогенный, техногенный
	456–600	Равнинный полого-наклонный, сглаженный рельеф озерных террас и предгорных шлейфов с трапециевидными террасированными долинами	Устьевые системы, включая придельтовые и приустьевые аккумулятивные формы, долины временных водотоков, конусы выноса, техногенный рельеф	Флювиальный; склоновый водно-эрозионный, озерный, эоловый, фитогенный, техногенный

Результаты и обсуждение

Анализ рядов максимальных расходов воды дождевых паводков

Проанализированы ряды максимальных паводочных расходов воды за период наблюдений с 1966 по 2022 г. на шести гидропостах (см. рис. 1).

Для каждого ряда максимальных паводочных расходов были построены эмпирические кривые обеспеченности и подобраны различные варианты ее аналитической аппроксимации, получены расчетные значения максимальных паводочных расходов стандартных обеспеченностей. Для всех исследуемых гидропостов определены годы с высокими паводками с превышением порогов вероятностей максимальных расходов 1, 5, 10, 20 и 25 %. На графики вынесены осредненные по всем методам значения квантилей кривых распределения максимального паводочного стока этих вероятностей (рис. 2).

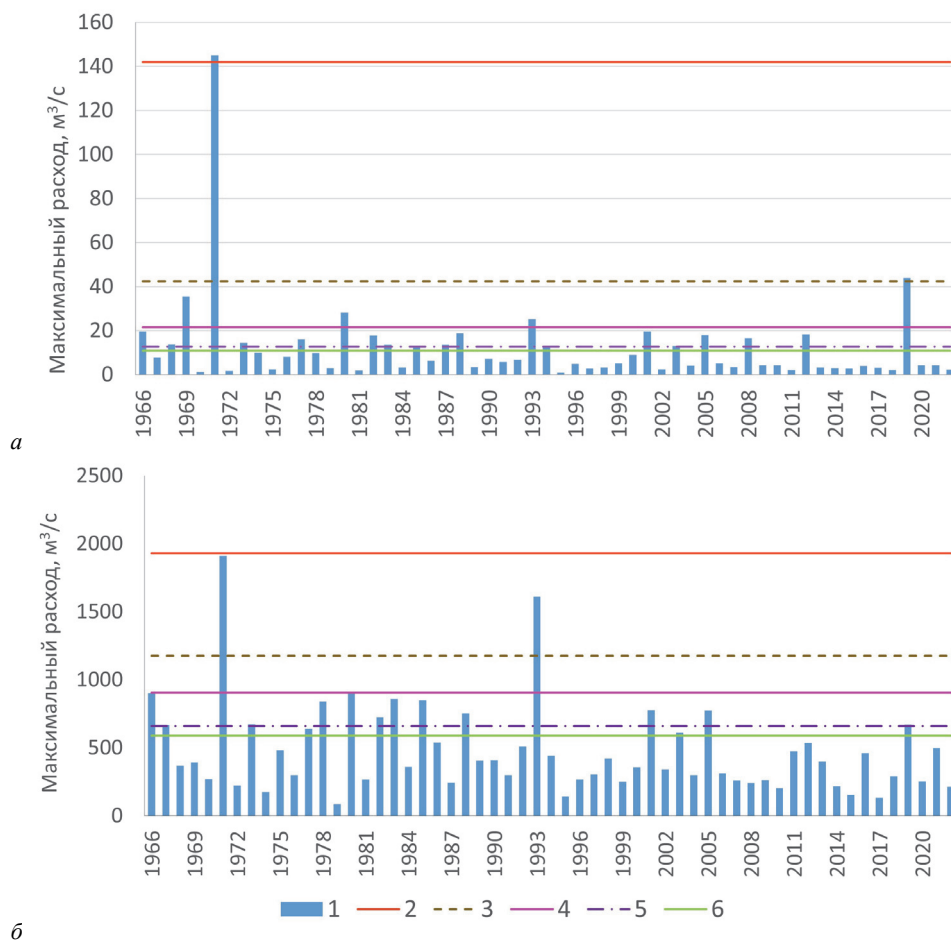


Рис. 2. Максимальные паводочные расходы воды (1) за период 1966–2022 гг. и их обеспеченности (2 – 1 %; 3 – 2 %; 4 – 5 %; 5 – 10 %; 6 – 20 %) для гидропостов:

а – Слюдянка – г. Слюдянка; б – Снежная – пос. Выдрино

Было определено, что в июле 1971 г. во время прохождения катастрофических селевых потоков на всех исследуемых реках наблюдалась самая редкая обеспеченность расходов за весь период наблюдений. Селевой паводок 1971 г. был самым разрушительным, во время бурных июльских дождей мощные селевые потоки прошли практически по всем водотокам юго-западного Прибайкалья. Произошли разрушения построек и мостов на многих участках Кругобайкальской железной дороги, вызвавшие остановку движения на многие сутки. Семь дней не работала Транссибирская железнодорожная магистраль, 20 км путей было смыто в Байкал, селевыми потоками было повреждено несколько мостов, размывы участки федеральной автодороги Иркутск – Улан-Удэ, порвана линия кабельной связи¹. Обеспеченности максимальных расходов этого паводка на реках района по разным методам расчета составили 0,001–1,88 %.

Вследствие особенностей строения русел увеличение расходов в июле 1971 г. происходило за счет повышения уровней воды, средней глубины потока и скоростей течения в 3–4 раза по сравнению с меженными значениями. При этом ширина потока во время катастрофического паводка увеличивалась не так значительно, в среднем в 1,4 раза относительно меженного значения. За исключением гидропоста р. Слюдянка – г. Слюдянка, где она увеличилась в 4,6 раза (табл. 3). Уровень воды в реках поднимался непропорционально мало по сравнению с повышением расхода воды ввиду резкого возрастания скорости потоков (в 4–9 раз).

Таблица 3

Гидрометрические характеристики русел во время катастрофического селевого паводка
26 июля 1971 г. по сравнению с меженью

Река – гидропост	Фаза режима, дата	Уровень, см	Расход, м ³ /с	Площадь водного сечения, м ²	Скорость течения, м/с		Ширина реки, м	Средняя глубина, м
					ср.	наиб.		
Снежная – п. Выдрино	Подъем уровня 23.07.1971*	361/593**	701	256	2,74	4,44	82,2	3,12
	Межень 22.09.1971	162	54,3	152	0,36	0,80	69,5	2,19
Хара-Мурин – п. Мурино	Подъем уровня 24.07.1971*	234/580**	195	121	1,61	1,96	63,0	1,92
	Межень 26.10.1971	109	9,96	32,7	0,31	0,56	62,4	0,52
Утулик – п. Утулик	Пик паводка 26.07.1971	477	1320	317	4,17	6,25	90,4	3,51
	Межень 20.09.1971	154	21,5	46,4	0,46	0,67	73,3	0,63
Безымьянная – п. Мангутай	Пик паводка 26.07.1971	206	255	59,2	4,31	8,57	38,8	1,53
	Межень 15.10.1971	65	5,44	8,09	0,67	1,05	21,9	0,37
Слюдянка – г. Слюдянка	Пик паводка 26.07.1971	291	144	35,7	4,03	8,33	42,3	0,85
	Межень 05.09.1971	164	1,41	2,08	0,68	0,76	9,2	0,28

¹ Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2010 году». Иркутск : Сиб. фил. ФГУНПП «Росгеолфонд», 2011. 395 с. URL: http://www.geol.irk.ru/baikal/rep_2010/pdf/baikal2010_p1-2-2.pdf (дата обращения: 11.01.2025).

Окончание табл. 3

Река – гидропост	Фаза режима, дата	Уровень, см	Расход, м ³ /с	Площадь водного сечения, м ²	Скорость течения, м/с		Ширина реки, м	Средняя глубина, м
Похабиха – г. Слюдянка	Пик паводка 26.07.1971	287	35,3	10,8	3,27	5,27	13,4	0,81
	Межень 13.09.1971	206	2,97	3,4	0,88	1,52	11,6	0,29

Примечание: *измерения в пик паводка (26.07) не проводились; **уровень на дату измерения/уровень в пик паводка (27.07).

Влияние на годовой ход уровня воды оказывает морфология русла реки. В сужениях долины при отсутствии поймы колебания уровней во время паводков выражены более отчетливо, в то время как на нижних участках рек, где имеется широкая пойма, они выражены слабо за счет разливов. Морфодинамический тип русла, развитый выше по течению расположения гидропоста, также оказывает влияние на объемы переносимого материала, скорости течения и расходы воды.

Анализ расходов взвешенных наносов на реках

Для годов с высокими паводками с вероятностью максимальных расходов ниже 10 %, представленных в табл. 3, был выполнен анализ расходов взвешенных наносов (табл. 4).

Таблица 4

Наибольшие расходы взвешенных наносов в отдельные годы со средней, повышенной водностью и наводнениями за период 1966–2022 гг.*

Годы	Река – гидропост	Наиб. расход взв. наносов, кг/с	Дата	Макс. расход воды, м ³ /с	Дата	Обесп. макс. расхода воды, %
1966	Утулик – ст. Утулик	650	6.07	435	05.07	17
	Снежная – п. Выдрино	180	11.06	902	06.07	10
1967	Утулик – ст. Утулик	55	21.08	196	5.06	52
	Снежная – п. Выдрино	74	21-23.08	669	21.08	19
1968	Утулик – ст. Утулик	152	10.06	251	16.07	39
	Снежная – п. Выдрино	66	13.07	368	13.07	50
1969	Утулик – ст. Утулик	650	23.06	492	23.07	13
	Снежная – п. Выдрино	23	24.08	392	24.08	46
1971	Хара-Мурин – п. Мурино	1500	26.07	1670	26.07	1
	Слюдянка – г. Слюдянка	1300	26.07	145	26.07	0,7
1980	Хара-Мурин – п. Мурино	1000	28.06	849	27.06	8
	Утулик – ст. Утулик	1400	27.06	720	27.06	5
	Слюдянка – г. Слюдянка	13	27.06	28,2	27.06	7
1985	Хара-Мурин – п. Мурино	750	17.06	785	17.06	8
	Утулик – ст. Утулик	1100	17.06	523	17.06	11
1988	Хара-Мурин – п. Мурино	16	30.06	203	30.06	60
	Утулик – ст. Утулик	540	13.06	628	03.06	7
2012	Хара-Мурин – п. Мурино	290	19.06	734	19.06	9,3
	Утулик – ст. Утулик	270	19.06	678	19.06	6,1
2019	Хара-Мурин – п. Мурино	128	29.07	701	29.07	10,2
	Утулик – ст. Утулик	162	29.07	572	29.07	11,2

Примечание: *из-за отсутствия данных по наносам представлены не все годы повышенной водности и гидропосты.

Средние значения расходов взвешенных наносов около или ниже 0,5 кг/с. При расходах воды обеспеченностью менее 10 % максимальные расходы взвешенных наносов резко возрастают на несколько порядков, от единиц-десятков кг/с до сотен-тысяч кг/с. Наибольшие расходы взвешенных наносов за год отмечались в летние месяцы. Все даты максимальных расходов взвешенных наносов и максимальной мутности совпадают с датами прохождения максимального расхода воды.

Во время катастрофического селевого потока 26 июля 1971 г., согласно данным Росгидромета, измеренный расход взвешенных наносов на гидропосту р. Слюдянка – г. Слюдянка составил 650 кг/с по сравнению с меженью 15 сентября 1971 г. – 0,003 кг/с. Средняя мутность потока во время пика была 4500 г/м³, по сравнению с меженью – 2,1 г/м³. Наибольшая мутность в июле 1971 г. на гидропосту р. Хара-Мурин – пос. Мурино составила 1200 г/м³, а на гидропосту р. Слюдянка – г. Слюдянка – 9100 г/м³. А наибольшие по результатам всех срочных наблюдений мутности и расходов воды значения расходов взвешенных наносов на гидропосту р. Хара-Мурин – пос. Мурино были 1500 кг/с, на гидропосту р. Слюдянка – г. Слюдянка – 1300 кг/с. На гидропосту р. Хара-Мурин – пос. Мурино при колебаниях средних месячных значений расходов взвешенных наносов в течение года от 0,003 до 0,16 кг/с значение наибольшего расхода в июле 1971 г. составило 1500 кг/с. Для гидропоста р. Слюдянка – г. Слюдянка в 1971 г. при средних месячных значениях расходов взвешенных наносов от 0,001 до 0,013 кг/с наибольшее значение за июль составило 1300 кг/с.

Геоморфологические факторы формирования селей

На формирование твердой составляющей стока рассматриваемой территории значительное влияние будут оказывать следующие геоморфологические факторы: крутизна склонов, доля глубокорасчлененного рельефа (т. е. его энергии) (табл. 5), а также мощность рыхлых отложений, подверженных процессам денудации и принимающих участие в транспорте наносов (для рассматриваемых бассейнов это группы склоновых процессов). В настоящих исследованиях рассматриваются лишь морфометрические характеристики. Влияние длины и крутизны склонов было учтено с помощью совокупной рельефной функции, которая используется для количественной оценки фактора рельефа при расчете модуля смыва почвы – LS-фактора [Boehner, Selige, 2006; Moore, Grayson, Ladson, 1991].

Таблица 5

Гидроморфометрические характеристики бассейнов

Название бассейна	Доля глубоко расчлененного рельефа площади бассейна, км ² /%	Средняя крутизна склонов, град.	Среднее значение LS-фактора для бассейна	Среднее значение индекса топографической влажности
Снежная	592/19,7	18,55	23	7,12
Хара-Мурин	547/47,23	20,8	26	6,9
Утулик	284,5/29,9	24,6	29	6,4
Безыманная	122,944/58,29	24,4	29	6,4
Слюдянка	24,829/34,23	22,64	27	6,8
Похабиха	4,02/6,2	19,38	24	7,0

Анализ распределения значений топографического индекса влажности, который используется для оценки локальной увлажненности территории с учетом характеристик рельефа [Beven, Kirkby, 1979; Kinnell, 2005], показал его незначительные средние колебания для всех рассматриваемых бассейнов (см. табл. 5), что иллюстрирует общие региональные особенности морфоклиматических характеристик бассейнов в пределах северного макросклона хр. Хамар-Дабан.

Максимальные площади глубокорасчлененный (вертикальная расчлененность составляет 500–1000 м) рельеф занимает в бассейнах рек Безымянной, Хара-Мурин, Слюдянки, Утулик. Для этих же бассейнов характерны максимальные значения средней крутизны склонов, LS-фактора.

Данные факторы указывают на благоприятное развитие гравитационных, водно-гравитационных процессов, которые активизируются при повышении общей увлажненности территории и способствуют перемещению материала непосредственно в русла рек.

Градации бассейнов по площади показывают, что внутри групп значения морфометрических характеристик значительно варьируют.

1. Для бассейнов малых рек Похабиhi, Слюдянки, Безымянной характерна геоморфологическая однородность, которая обусловлена расположением в пределах нижней морфоструктурной ступени макросклона хребта. Расположение в пределах юго-восточной секции сочленения Байкальского и Тункинского рифтов [Мац, Уфимцев, Мандельбаум, 2001], имеющей сложную историю развития рельефа, обусловило их компактность, удлиненность, меньшую разработанность экзогенными процессами. Большая часть территории занята крутыми и покатыми склоновыми поверхностями низкогорного и среднегорного рельефа, что определяет ведущую роль гравитационных и водно-гравитационных процессов в формировании рельефа и функционировании бассейнов. Доля глубокорасчлененного рельефа занимает значительные площади бассейнов у рек Слюдянки и Безымянной, меньшую – у Похабиhi.

2. Реки Утулик, Хара-Мурин обладают близкими по площади бассейнами, значительная часть которых представлена глубокорасчлененным типом рельефа, с преобладанием крутых и средней крутизны склонов, значения LS-фактора также высоки. Большие площади бассейнов по сравнению с первой группой можно расценивать как возрастание риска проявления опасных гидрологических процессов, в том числе и в нижнем течении, где расположены важные объекты инфраструктуры.

3. Бассейн р. Снежной – самый крупный из рассматриваемых, отличается значительным геоморфологическим разнообразием, что способствует развитию широкого спектра нефлювиальных экзогенных процессов, которые в сочетании с деятельностью водных потоков способствуют увеличению объемов переносимого материала. Показатели средних значений LS-фактора, средняя крутизна склонов среди рассматриваемых бассейнов здесь минимальны, что в целом свидетельствует о пониженной составляющей склоновых процессов во флювиальном рельефообразовании. Однако, учитывая геоморфологическую неоднородность территории бассейна, в среднем тече-

нии основной реки и ее притоков выделяются области, где морфометрические характеристики рельефа и его морфология с большой долей вероятности могут способствовать распространению селей и других опасных геологических процессов. Развитие исследований в этом направлении требует более детального анализа и проведения последующего районирования территории на уровне суббассейнов.

Заключение

Анализ морфометрических характеристик рельефа исследуемых бассейнов показал, что наиболее благоприятными геоморфологическими условиями для развития селевых и катастрофических паводков обладают реки Безымянная, Слюдянка, Хара-Мурин, Утулик. Бассейны рек Снежной и Похабихи обладают минимальными средними значениями рассмотренных показателей, что объясняется их минимальной и максимальной площадью соответственно. Для р. Снежной возможны значительные вариации в проявлении и интенсивности опасных гидрологических и геоморфологических процессов, которые не учитываются ввиду отсутствия системных наблюдений. Территория бассейна слабоселеопасной р. Похабихи на фоне остальных рассмотренных бассейнов обладает минимальными значениями характеристик, влияющих на развитие селевых паводков и селей.

При прохождении селевых паводков редкой обеспеченности, вследствие особенностей строения русел, увеличение расходов происходит в первую очередь за счет увеличения скоростей течения. Уровень воды в реках и ширина потока увеличивались непропорционально мало по сравнению с повышением расхода воды ввиду резкого возрастания скорости потоков, которая увеличивалась в 4–9 раз. Высокие скорости течения обеспечивают высокую транспортирующую способность потока и создают предпосылки для селевых проявлений. Наиболее разрушительным был селевой паводок в июле 1971 г., на всех исследуемых реках отмечена самая редкая обеспеченность максимальных расходов воды за весь период наблюдений – 0,001–1,9 %.

Максимальные в году расходы взвешенных наносов и мутность в большинстве случаев отмечались в день прохождения максимального паводочного расхода воды. Многократное резкое увеличение расходов взвешенных наносов и мутности происходит при прохождении максимальных расходов воды обеспеченностью 10 % и ниже.

Таким образом, учитывая неоднократную повторяемость селевой активности, необходим детальный анализ всех геолого-геоморфологических и морфодинамических факторов развития опасных гидрологических и геологических процессов.

Список литературы

Агафонов Б. П. Экзолигодинамика Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Наука, 1990. 176 с.

Атлас Иркутской области: Экологические условия развития / ред. В. В. Воробьев, А. Н. Антипов, В. Ф. Хабаров. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН ; М. : Роскартография, 2004. 90 с.

- Будз М. Д. Условия формирования селей в Прибайкалье // Оползни, сели, термокарст в Восточной Сибири и их инженерно-геологическое значение. М. : Наука, 1969. С. 60–95.
- Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока: Опыт критического анализа. Л. : Гидрометеониздат, 1988. 312 с.
- Выркин В. Б. Современное экзогенное рельефообразование котловин байкальского типа. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 1998. 175 с.
- Ивановский Л. Н. Особенности развития долин на южном побережье Байкала в антропогене // История развития речных долин и проблемы мелиорации земель. Сибирь и Дальний Восток. Новосибирск : Наука, 1979. С. 55–62.
- Литвин В. М. Опыт региональной оценки интенсивности проявления экзогенных геологических процессов на юге Восточной Сибири // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 72–81.
- Макаров С. А. Сели Прибайкалья. Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН, 2012. 111 с.
- Мац В. Д., Уфимцев Г. Ф., Мандельбаум М. М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: СО РАН; филиал «ГЕО», 2001. 251 с.
- Опасные геологические процессы в Юго-Западном Прибайкалье / В. К. Лапердин, К. Г. Леви, В. С. Имаев, В. Г. Молочный. Иркутск : ИЗК СО РАН, 2016. 199 с.
- Хромовских В. С. Сейсмогеология Южного Прибайкалья. М. : Наука, 1965. 122 с.
- Alekseevskiy N. I., Berkovich K. M., Chalov R. S. Erosion, sediment transportation and accumulation in rivers // International Journal of Sediment Research. 2008. Vol. 23, N 2. P. 93–105.
- Beven K. J., Kirkby M. J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology // Hydrology Science Bulletin. 1979. Vol. 24, N 1. P. 43–69.
- Boehner J., Selige T. Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation // SAGA – Analysis and Modelling Applications, Goettinger Geographische Abhandlungen. 2006. Vol. 115. P. 13–27.
- Chalov R. S. Comparative analysis of channel processes on mountain, semi-mountain and plain rivers // Geography and Natural Resources. 2008. Vol. 29, N 1. P. 28–35.
- Chalov R. S. Sediment runoff, transporting capacity of flows and their role in river channel formation // Geography and Natural Resources. 2011. Vol. 32, N 3. P. 220–225.
- Chen C.-Y., Yu F.-C. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS // Geomorphology. 2011. Vol. 129. P. 387–397.
- Evolution of debris flow activities in Gaojiagou Ravine during 2008–2016 after the Wenchuan earthquake / R. L. Fan, L. M. Zhang, H. J. Wang, X. M. Fan // Engineering Geology. 2018. Vol. 235. P. 1–10.
- Kinnell P. I. A. Alternative Approaches for Determining the USLE-M Slope Length Factor for Grid Cells // Sci. Soc. Am. J. 2005. Vol. 60, N 3. P. 674–680.
- Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrological Processes. 1991. Vol. 5, N 1. P. 3–30.
- The distribution of water and suspended sediment flow during spring flood in the forked channel of the lower Ob (within Khanty-Mansi autonomous area) / R. S. Chalov, A. A. Kamyshev, A. A. Kurakova, A. S. Zavadskii // Water Resources. 2021. Vol. 48, N 1. P. 18–28.
- Wang L., Liu N. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // Int. J. Geogr. Inf. Sci. 2006. Vol. 20, N 2. P. 193–213.

References

- Agafonov B.P. *Ekzolitodinamika Baikalskoi riftovoi zony* [Exolithodynamics of the Baikal rift zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 176 p. (in Russian)
- Atlas Irkutskoi oblasti: Ekologicheskie usloviya razvitiya* [Atlas of the Irkutsk Region: Ecological Conditions of Development. Eds. V.V. Vorobyov, A.N. Antipov, V.F. Khabarov. Irkutsk, Institute of Geography SB RAS Publ., Moscow, Roskartografiya Publ., 2004, 90 p. (in Russian)
- Budz M.D. *Usloviya formirovaniya selei v Pribaikal'e* [Mudflow conditions in the Baikal region]. *Opolzni, seli, termokarst v Vostochnoi Sibiri i ikh inzhenerno-geologicheskoe znachenie* [Landslides, mudflow formation, thermokarst in the east of Siberia and their engineering-geological significance]. Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 60–95. (in Russian)

Vinogradov Ju.B. *Matematicheskoe modelirovanie processov formirovaniya stoka: Opyt kriticheskogo analiza*. [Mathematical modeling of runoff formation processes: Experience of critical analysis]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 312 p. (in Russian)

Vyrkin V.B. *Sovremennoe ekzogennoe rel'efoobrazovanie kotlovin baikal'skogo tipa* [Modern exogenous relief formation of basins of the Baikal type]. Irkutsk, IG SB RAS Publ., 1998, 175 p. (in Russian)

Ivanovsky L.N. *Osobennosti razvitiya dolin na yuzhnom poberezh'e Baikala v antropogene* [Features of the development of valleys on the southern coast of Lake Baikal in the anthropogene]. *Istoriya razvitiya rechnykh dolin i problemy melioratsii zemel. Sibir i Dalnii Vostok* [History of the development of river valleys and problems of land reclamation. Siberia and the Far East]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, pp. 55-62. (in Russian)

Litvin V.M. *Opyt regionalnoi otsenki intensivnosti proyavleniya ekzogennykh geologicheskikh protsessov na yuge Vostochnoi Sibiri* [Experience of regional assessment of intensity of manifestation of exogenous geological processes in the south of Eastern Siberia]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology], 1991, no. 6, pp. 72–81. (in Russian)

Makarov S. A. *Seli Pribaikal'ya* [Debris Flows in Cis-Baikalia]. Irkutsk, IG SB RAS Publ., 2012, 111 p. (in Russian)

Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M. *Kainozoi Baikalskoi riftovoi vpadiny. Stroenie I geologicheskaya istoriya* [Cenozoic of the Baikal Rift Basin. Structure and Geological History]. Novosibirsk, SB RAS GEO Publ., 2001, 251 p. (in Russian)

Laperdin V.K., Levi K.G., Imaev V.S., Molochny V.G. *Opasnye geologicheskie protsessy v Yugo-Zapadnom Pribaikal'e* [Dangerous geological processes in the South-West Baikal region]. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2016, 199 p. (in Russian)

Khromovskikh V.S. *Seismogeologiya Yuzhnogo Pribaikal'ya* [Seismogeology of the Southern Baikal region]. Moscow, Nauka, Publ., 1965. 122 p. (in Russian)

Alekseevskiy N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S. Erosion, sediment transportation and accumulation in rivers. *International Journal of Sediment Research*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 93-105.

Beven, K.J., Kirkby, M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrology Science Bulletin*, 1979, vol. 24, no. 1, pp. 43-69.

Boehner, J., Selige, T. Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. *SAGA – Analysis and Modelling Applications, Goettinger Geographische Abhandlungen*, 2006, vol. 115, pp. 13-27.

Chalov R.S. Comparative analysis of channel processes on mountain, semi-mountain and plain rivers. *Geography and Natural Resources*, 2008, vol. 29, no. 1, pp. 28-35.

Chalov R.S. Sediment runoff, transporting capacity of flows and their role in river channel formation. *Geography and Natural Resources*, 2011, vol. 32, no. 3, pp. 220-225.

Chen C.-Y., Yu F.-C. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology*, 2011, vol. 129, pp. 387-397.

Fan R.L., Zhang L.M., Wang H.J., Fan X.M. Evolution of debris flow activities in Gaojiagou Ravine during 2008–2016 after the Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, 2018, vol. 235, pp. 1-10.

Kinnell P.I.A. Alternative Approaches for Determining the USLE-M Slope Length Factor for Grid Cells. *Sci. Soc. Am. J.*, 2005, vol. 60, no. 3, pp. 674-680.

Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, pp. 3-30.

Chalov R.S., Kamyshev A.A., Kurakova A.A., Zavadskii A.S. The distribution of water and suspended sediment flow during spring flood in the forked channel of the lower ob (within Khanty-Mansi autonomous area). *Water Resources*, 2021, vol. 48, no. 1, pp. 18-28.

Wang L., Liu N. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 2006, vol. 20, no. 2, pp. 193-213.

Сведения об авторах***Кичигина Наталья Витальевна***

*кандидат географических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория гидрологии и климатологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
664033, Россия, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
e-mail: nkichigina@mail.ru*

Опекунова Марина Юрьевна

*кандидат географических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геоморфологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
664033, Россия, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
старший научный сотрудник
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 83
e-mail: opek@mail.ru*

Information about the authors***Kichigina Natalia Vitalievna***

*Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist
Laboratory of Hydrology and Climatology
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
Russian Federation
e-mail: nkichigina@mail.ru*

Opekunova Marina Yurievna

*Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist, Laboratory
of Geomorphology
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
Russian Federation
Senior Research Scientist
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov st., Irkutsk, 664074,
Russian Federation
e-mail: opek@mail.ru*

Коды научной специальности: **1.6.16, 1.6.14**

Статья поступила в редакцию **17.02.2025**; одобрена после рецензирования **10.09.2025**; принята к публикации **12.09.2025**

The article was submitted **February, 17, 2025**; approved after reviewing **September, 10, 2025**; accepted for publication **September, 12, 2025**