

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-4-115-129.45>

МРНТИ 39.03.15 39.00.00

УДК 910.3

Н. В. Попов¹, С. У. Ранова², А. Н. Камалбекова^{*3}, Ү. Р. Алдаберген⁴

¹ К. г. н., главный научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *popovn@mail.ru*)

² К. г. н., руководитель лаборатории (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *sandu2004@mail.ru*)

^{3*} PhD докторант, младший научный сотрудник (КазНУ им. аль-Фараби, АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *aidana.kamalbekova@gmail.com*)

⁴ PhD докторант, младший научный сотрудник (КазНУ им. аль-Фараби, АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *aldabergen_u@mail.ru*)

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ГЛЯЦИАЛЬНОЙ СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ В ИЛЕ АЛАТАУ

Аннотация. Статья посвящена количественной оценке гляциальной селевой опасности. Район исследования – бассейны рек центральной части северного склона Иле Алатау. Существующие методики выполнения оценок гляциальной селевой опасности базируются в основном на использовании качественных критериев. Несмотря на то, что в целом такие оценки опирались на результаты полевых обследований и наблюдений, их результаты, определялись субъективным фактором. Цель исследования – разрешение проблемы использования количественных критериев при оценке прорывоопасности моренно-ледниковых озер путём создания новой методики количественной оценки гляциальной селевой опасности на основе эмпирических данных. Основой для этой работы также послужили данные геодезических и батиметрических измерений озерных котловин, расположенных на современных моренах и непосредственно у языков ледников, что позволило выявить связи между площадями и объемами озер.

Настоящее исследование основано на результатах оценки прорывоопасности ледниковых озер и гляциальной селеопасности, которые получены для наиболее селеопасных бассейнов рек Иле Алатау. В качестве количественных критериев прорывоопасности ледниковых озер использованы данные непосредственных наблюдений за их прорывами, что дало возможность рассчитать пиковые расходы и гидрографы возникших при прорыве паводков. Также выявлены связи между объемами прорывных паводков и максимальными расходами турбулентных грязекаменных потоков на выходе из селевых очагов (врезов), измеренные инструментальным методом с применением эмпирических расчетных формул.

Ключевые слова: гляциальный прорывной паводок, селевой очаг, гляциальный селевой поток, селевая опасность, ледниковые озера.

Введение. Выбор темы статьи обусловлен тем, что всплеск гляциальной селевой активности с середины XX века в Иле и Жетысу Алатау в целом вывел проблему защиты от катастрофических селей в число наиболее актуальных и значимых. Статистика селевых катастроф Казахстана показывает, что их причинами стали прорывы водоемов, образовавшиеся на современных моренах и на контакте с открытым льдом ледников, которые расположены в бассейнах рек Есик, Талгар, Киши и Улкен Алматы, Каскелен, Шилек, Сарыкан.

Понятие «*гляциальные сели*» объединяет ряд опасных природных процессов, обусловленных выбросом талых ледниковых вод, формирующих прорывные паводки, которые, при наличии сопутствующих условий, преобразуются в селевые потоки. Среди причин паводков выделяют выбросы талых вод в ходе максимального таяния ледников в период абляции и опорожнение внутрiledниковых емкостей, обычно скрытых в теле ледников и современных морен. Как правило, масштаб таких явлений незначителен при их высокой повторяемости. Как показывает статистика, подавляющее число гляциальных селей было вызвано приведенными причинами. В то же время все случаи *катастрофических гляциальных селей* в Казахстане были вызваны прорывами ледниковых озер. Именно поэтому основное внимание здесь уделяется исключительно исследованию прорывов ледниковых озер. В данной работе термин «ледниковые» озера соответствует достаточно широко используемым терминам «приледниковые», «моренные» или «моренно-

ледниковые» озера, поскольку все рассматриваемые водные объекты генетически связаны с ледниками и современными моренами. Таким образом, определение «гляциальная селевая опасность», в силу превалирующего значения прорывов озер в статистике селевых катастроф, практически полностью соответствует широко используемому в последнее время термину «прорывоопасность» ледниковых озер.

Цель настоящего исследования – создание новой методики количественной оценки гляциальной селевой опасности на основе эмпирических данных.

Многолетний опыт изучения данной темы позволил обобщить результаты предыдущих обследований следов гляциальных селей, инвентаризаций селеопасных водных объектов, расположенных в зоне современных морен и ледников, которые в хронологическом порядке в различные годы выполнялись службами Казгидромета, Казселезащиты, Института географии и водной безопасности.

Объектом этого исследования является сравнительный анализ методик оценки гляциальной селевой опасности, а предметом – морфометрические характеристики, особенности гидрологического режима ледниковых озер, различные механизмы формирования максимальных расходов прорывных паводков и гляциальных селей. В работе применялись методы ретроспективного анализа, полевых инструментальных измерений исследуемых объектов, камеральной обработки данных, результаты дистанционных измерений, создания цифровых карт. Впервые опробован подход использования количественных характеристик для оценки селеопасности для конкретных бассейнов северного склона Иле Алатау.

Отмеченное определяет важное значение выполненного исследования для научных и прикладных целей, а применение новых подходов использования количественных характеристик и критериев селеопасности обеспечивают новизну этой работы.

Материалы и методы исследования. Район исследования охватывает наиболее селеопасные районы Иле и Жетысу Алатау (рисунок 1).



Рисунок 1 – Район исследования. Отмечены места формирования катастрофических прорывных гляциальных селей Иле и Жетысу Алатау в бассейнах рек:

1 – Киши Алматы, 2 – Есик, 3 – Улкен Алматы, 4 – Талгар, 5 – Каскелен, 6 – Сарыкан, 7 – Каргалы

Figure 1 – Study Area. Marked are the locations of catastrophic glacial mudflow formation in the Ile and Zhetysay Alatau within the river basins:

1 – Kishi Almaty, 2 – Esik, 3 – Ulken Almaty, 4 – Talgar, 5 – Kaskelen, 6 – Sarykan, 7 – Kargaly

Материалами при подготовке и проведении настоящего исследования послужили:

результаты наземных и аэровизуальных обследований следов гляциальных селей, оперативно выполненных после их формирования;

данные тахеометрических и батиметрических съёмок озерных котловин, позволивших построить планы (карты для крупных объектов) с изогипсами, изобатами, отметками высот места для определения основных морфометрических характеристик ледниковых озёр;

данные тахеометрических съёмок в контрольных створах селевых русел на выходе селей из селевых врезов (очагов селеобразования) в долины рек;

результаты дистанционных измерений и съёмок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с построением цифровых карт и 3D моделей рельефа;

данные дистанционных измерений с космических аппаратов (снимки GoogleEarth, Sentinel), а также GPS;

отчеты о наземных обследованиях следов прошедших гляциальных селей, формализованные в служебных отчетах, записках и публикациях в научных изданиях.

Для оценки прорывоопасности, ледниковых озёр используются критерии прорывоопасности, предложенные различными авторами. Важно отметить, что указанные критерии в основном носят качественный характер, то есть для оценки опасности указанных водоёмов они были получены визуально и без привлечения количественных характеристик.

Так, критерии прорывоопасности ледниковых озёр в работе [11] вообще не содержат количественной информации. Автор ограничился гидрологическим режимом (стационарные, нестационарные, периодически заполняющиеся), а также типом озера и стадией развития.

Критерии прорывоопасности озёр по [13] помимо расположения озера, стадий развития, режима заполнения озера включает 5 градаций площади водной поверхности в тыс. м² (<5, 5-10, 10-50, > 100). Однако никакого обоснования этих цифр не приводится.

Критерии прорывоопасности озёр по [12] помимо типа озера и строения озёрной перемычки содержат в основном также качественные характеристики, такие, как условия разгрузки, гидрологический режим, микрорельеф поверхности перемычки. Количественные критерии представлены объёмом воды в озере, тыс. м³ (3 градации n· 10; n· 100; n· 100 - n· 1000, любой). Однако какое-либо обоснование указанных градаций отсутствует.

Критерии прорывоопасности озёр по [1] для Казселезащиты представлены более полно. Выделены весьма прорывоопасные озера и непрорывоопасные озера. Здесь опущены потенциально прорывоопасные и непрорывоопасные озера. Помимо типа озера, характеристик перемычки (мёрзлая брекчия, лёд) и её размеров для обоих типов озёр вводятся объём (более 40 000) м³ интенсивный рост объёма в течение 2-10 последних лет, тип и размеры ледника. Также отсутствует обоснование выбора количественных характеристик.

Перечисленные факты свидетельствуют о необходимости создания новой методики количественной оценки прорывоопасности ледниковых озёр.

Ход работы в рамках настоящего исследования включал сбор и обработку исходных материалов, подготовку базы данных для выполнения дальнейших статистических расчетов, выявление связей между морфометрическими характеристиками озёр, максимальными расходами прорывных паводков и вызванных ими селевых потоков, подготовку иллюстративных данных и текста с перечнем использованных источников.

При подготовке настоящей работы применялись следующие методы:

1. Ретроспекция статистического анализа предыдущих исследований. Результаты паспортизации озёр в Иле Алатау 1974-1982 гг. (Казгидромет и Казселезащита), в рамках которой проводились тахеометрические и батиметрические измерения озерных котловин, позволили установить зависимость между площадями и объёмами ледниковых озёр. Выявленная связь описывается формулой (рисунок 2, А) [17, 10]

$$x = 0,059 y^{1,44}, \quad (1)$$

где x – объём озера, м³; y – площадь водного зеркала озера, м².

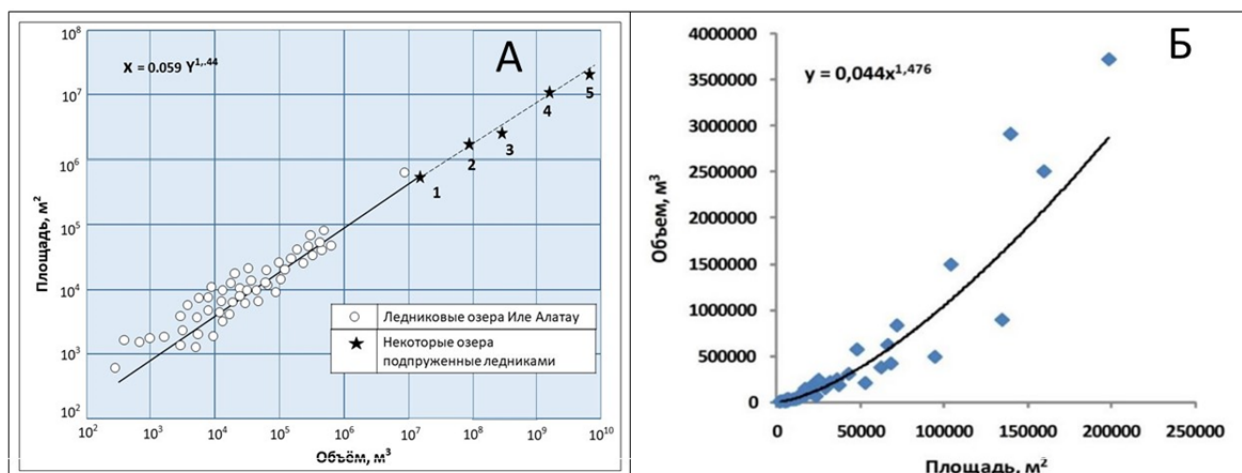


Рисунок 2 – Связь между объемами и площадями ледниковых озер в Иле Алатау по данным инвентаризации 1974 – 1982 гг. (А) и 2017 гг. (Б)

Figure 2 – Relationship between the volumes and areas of glacial lakes in the Ile Alatau based on inventory data from 1974–1982 (А) and the 2017 inventory (Б)

Интересно, что ряд крупных озер, подпруженных ледниками, на графике рисунка 2, А также располагается вблизи линии регрессии уравнения (1):

- 1 – озеро Хазард в Северной Америке (площадь 700 тысяч м², объём 12 млн м³);
- 2 – озеро Мерцбахера в Центральном Тянь-Шане (площадь 5,55 км², объём 304 млн м³);
- 3 – озеро Тальсеква в Британской Колумбии (площадь 3,36 км², объём 907 млн м³);
- 4 – озеро Греналоун в Исландии (площадь 18 км², объём 1,5 км³);
- 5 – озеро Гримсвётн в Исландии (площадь 40 км², объём 7 км³).

Морфометрические характеристики указанных водоёмов с их максимальными значениями взяты из сводки [2].

Важно, что такие озера располагались на месте отступающих языков ледников или непосредственно на теле ледников и современных моренах. Весьма характерно, что большое количество озер, подпруженных ледниками, не попадает на выявленную последовательность поскольку морфологию их котловин определяет морфология самого вместилища озера – участка горной долины.

В Институте географии в 2017 г. проведена инвентаризация ледниковых озер в Иле и Жетысу Алатау. Для этого использовались космические снимки Sentinel 2. Изображения озер оцифровывались с применением программы ArcGis. Объемы озер определялись согласно эмпирической связи площадей водного зеркала и объёмов озер, выявленной для 45 водных объектов в Иле и Жетысу Алатау [10]. Указанная связь (см. рисунок 2, Б) аппроксимируется уравнением:

$$y = 0,044x^{1.476}, \quad (2)$$

где y – объём озера, м³; x – площадь водного зеркала озера, м².

Сравнительный расчет по формулам (1) и (2) для ледниковых озер с близкими значениями площадей показал, что разница в определении объёмов составляет около 4%, что означает возможность применения обеих формул.

Выполненные расчеты позволяют существенно упростить процесс сбора фактических данных по объемам ледниковых озер, используя данные дистанционных измерений площадей указанных водоемов.

Результаты и их обсуждение. Материалы непосредственных наблюдений за прорывами ледниковых озер Иле и Жетысу Алатау позволили выявить основные механизмы их прорывов. Определяющим критерием оценки прорывоопасности ледниковых озер выступают пиковые прорывные расходы, которые служат основным количественным фактором формирования гляциальных селей. Рассчитать значения пиковых расходов воды при прорывах озер можно исходя из объема и времени истечения воды из озерной котловины. Тем не менее в большинстве случаев применить этот метод не представляется возможным, так как прорывы ледниковых озер –

достаточно редкие природные явления, поэтому зафиксировать точное время истечения воды из озёр невозможно вследствие отсутствия непосредственных наблюдений за процессом. Получить значения пиковых расходов при прорывах ледниковых озёр при фиксации падения уровня воды в озерной котловине в ходе прорыва и время истечения воды удалось только в нескольких случаях.

Данные прямых наблюдений за опорожнениями озёрных котловин и наземных обследований, проведённых по следам прорывных гляциальных селей, дают возможность выделить следующие механизмы прорывов ледниковых озёр: поверхностным путём по открытым ледовым каналам в озерных плотинах, подземным путем через ледовые туннели и поверхностным путём по проранам в талых массивах современных морен [12, 30].

Прорывы ледниковых озёр поверхностным путем по открытым ледовым каналам в озерных плотинах. Указанный механизм хорошо изучен за рубежом для озёр, подпруженных ледниками (открытым льдом). Некоторые исследователи считают, что реализация такого механизма редка и недостаточно «эффективна», так как при таких прорывах катастрофических явлений не возникало. Сам по себе предложенный механизм прорыва озера достаточно прост. При достижении растущим уровнем воды в озере гребня ледовой плотины начинается перелив в самой её пониженной части. Вследствие чего формируется открытый, углубляющийся за счёт теплообмена и эрозии ледовый канал, что приводит к постепенному снижению уровня воды в озерной котловине и опорожнению озера.

В Иле и Жетысу Алатау подобных явлений не отмечалось, поскольку прорывы по рассматриваемому механизму в силу их спокойного осуществления и отсутствия негативных последствий, видимо, выпали из поля зрения исследователей. Пиковые прорывные расходы при опорожнении ледниковых озёр поверхностным путём по открытым ледовым каналам в озёрных плотинах формируются примерно к половине времени опорожнения котловины.

Непосредственные наблюдения хода опорожнения ледниковых озёр по открытым ледовым каналам удалось провести на озере №17 у ледника Жарсай – правый в бассейне р. Есик (1977 г.), озере №8 у ледника Иглы Туйыксу в бассейне р. К. Алматы (1981 г.), озере №5 у ледника Калесника в бассейне р. Л. Талгар (1984 г.), озере Богатырь в бассейне р. Шилек (1985 г.). В последнем случае прорыв озера по открытому ледовому каналу был вызван искусственно в результате превентивных работ.

Описанный механизм опорожнения ледниковых озёр наименее опасен, поскольку формирование открытого канала в ледовом ядре морены занимает достаточно продолжительное время, а принимая во внимание ограниченные объёмы воды, то и пиковые расходы не приводят к формированию катастрофических селевых явлений ниже по профилю долины (рисунок 3).

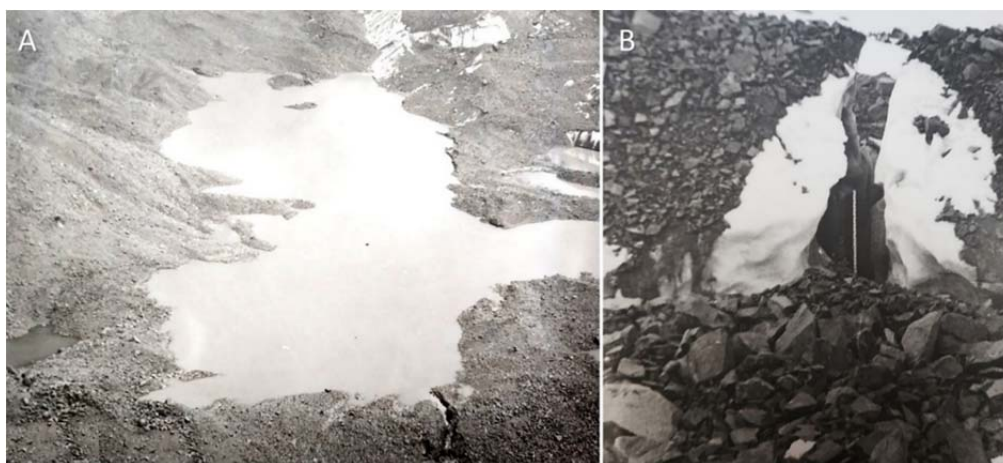


Рисунок 3 – Начальный этап прорыва озера №5 у л. Калесника в бассейне р. Л. Талгар (1984 г.) с формирующимся открытым ледовым каналом в гребне озёрной перемычки – А. Открытый ледовый канал после прорыва озера №8 у л. Иглы Туюксу в бассейне р. К. Алматы (1981 г.) – В. Изображения из архива авторов.

Figure 3 – Initial stage of the outburst of Lake No. 5 near the Kalesnik Glacier in the Talgar River basin (1984), with an open ice channel forming in the crest of the lake dam (A). Open ice channel following the outburst of Lake No. 8 near the Tuyuksu Glacier in the K. Almaty River basin (1981) (B). Images from the authors' archive

Особенностью рассматриваемого механизма опорожнения ледниковых озер служит рост максимальных расходов с пиком в средней части процесса истечения воды. Формирование и интенсивное углубление открытого ледового канала начинаются на крутом фронтальном уступе озерной плотины. Далее термическое воздействие и эрозия продвигают оголовок сформировавшегося канала в котловину озера, когда и проходит пиковый прорывной расход.

Результаты наблюдений показали, что расчет пиковых расходов истечения воды по открытому ледовому каналу можно проводить по формуле:

$$Q_{\max} = \lambda F, \quad (3)$$

где $Q_{\max}$ – пиковый расход воды, м³/с; λ – интенсивность углубления открытого ледового канала, м/с; F – площадь озера, м².

Для условий Иле Алатау максимальные значения λ оказались очень близкими и в среднем составляли 0,00017 м/с или 0,612 м/ч. На Кавказе, при переливе через ледовую плотину озера, отмечалась такая же интенсивность углубления открытого канала за счет теплообмена (0,6 м/ч) [6].

Прорывы ледниковых озер подземным путем по ледовым туннелям. Указанный механизм наиболее часто реализовывался в Иле и Жетысу Алатау и оказался ответственным за подавляющее большинство катастрофических гляциальных селей прорывного характера. Наблюдения показали, что ледниковые озера прорывались подземным путем, используя для сброса водной массы существующие (ранее унаследованные) каналы жидкого ледникового стока.

Для нестационарных ледниковых озер указанные каналы стока представлены подземными ледовыми туннелями, которые многие годы обеспечивали транзитный сброс талых ледниковых вод без их аккумуляции в обычно пустующих озёрных котловинах. Подземные ледовые туннели пронизывают моренно-ледниковый комплекс, представленный моренным рыхлообломочным чехлом, а также погребенными льдами и многолетней мерзлотой, которые составляют ядра современных морен. Длины ледовых туннелей от дренируемых ими озерных котловин до выхода на

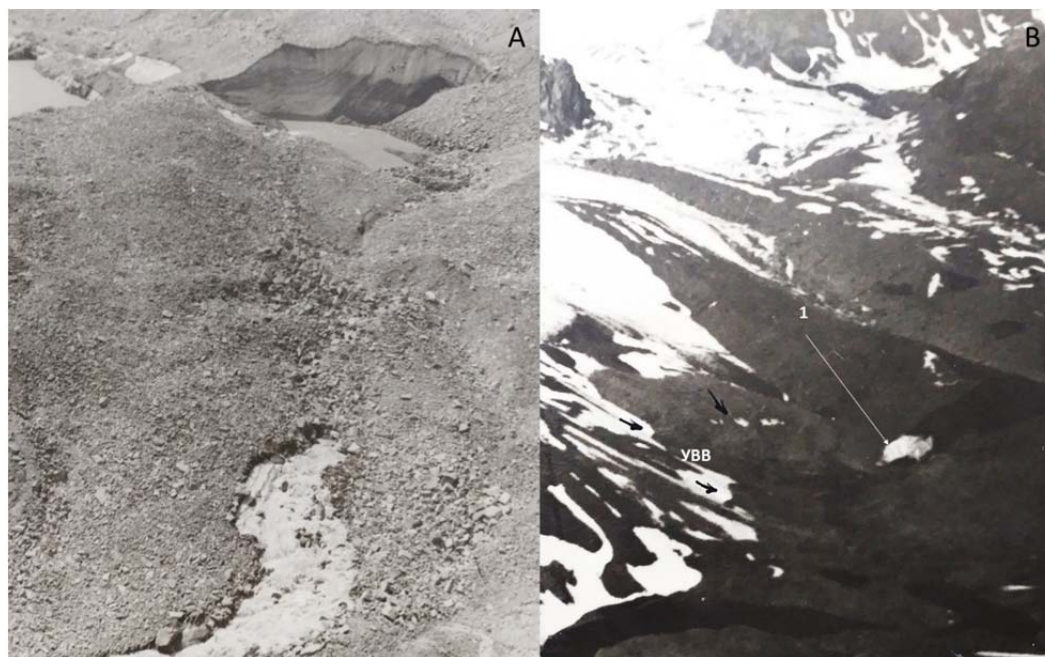


Рисунок 4 – Ледовые туннели при прорывах нестационарных ледниковых озер:

А – прорыв озера №16 в бассейне р. Каскелен (1980 г.), внизу фото выхода из туннеля и прорывной паводок;
 В – опорожненная котловина озера №17 у л. Жарсай правый (1963 г.), отмечен уровень максимального заполнения озера. 1 – входное отверстие ледового туннеля, по которому и осуществился прорыв озера (из архива Казгидромета)

Figure 4 – Ice tunnels during outbursts of non-stationary glacial lakes: A – Outburst of Lake No. 16 in the Kaskelen River basin (1980), showing the tunnel exit at the bottom of the photo and the outburst flood;
 B – Emptied basin of Lake No. 17 near the Zharsay-Right Glacier (1963), with the maximum lake fill level marked.
 1 – Entrance of the ice tunnel through which the lake outburst occurred (from the Kazhydromet archive)

поверхность достигают 300 м, а разница в уровнях между входным и выходным отверстиями – 20–50 м. Площади живого сечения таких туннелей (каналов стока) обычно 5–10 м². По показаниям наблюдателей, находившихся в момент прорыва ледникового озера в непосредственной близости от водоёма, прорыв сопровождается грохотом, выбросом воды и камней в нижнем бьефе озерных плотин, что свидетельствует о напорном истечении воды из канала стока. В этом случае особенностью является то, что максимальные прорывные расходы проходят на начальном этапе опорожнения котловины, а время истечения водной массы обычно составляет не более нескольких часов. Исходя из этого пиковые прорывные расходы определяются площадью живого сечения, а также гидростатическим давлением в туннеле, которое находится по разности высот между уровнем воды в озёрной котловине и выходным отверстием туннеля (рисунок 4).

Туннельные прорывы ледниковых озёр известны для многих горных регионов. Оценка пиковых расходов и разработка моделей опорожнения таких озёр привлекли внимание многих исследователей. Далее приведены эмпирические формулы для расчета пиковых расходов при прорывах ледниковых озёр по туннелям для различных регионов мира (таблица 1).

Таблица 1 – Рекомендуемые эмпирические формулы для расчета пиковых расходов при прорывах ледниковых озёр подземным путём по ледовым туннелям, полученные для различных горных районов

Table 1 – Recommended empirical formulas for calculating peak discharge at glacial lake outbursts by underground ice tunnels, obtained for different mountainous regions

Тип озерной плотины	Расчетная формула		Литература
Моренный с погребённым ледовым ядром	$Q_{max} = 75 (V/10^6)^{0,67}$	(4)*	[24]
	$Q_{max} = aW^{5/4}\sqrt{H}$	(5) *	[3]
	$Q_{max} = 0,0000055 (P_E)^{0,59}$	(6)**	[26]
	$Q_{max} = 46 (V/10^6)^{0,66}$	(7)	[30]
	$Q_{max} = aW^{1,25}H^{0,5}$	(8) ***	[12]
Примечания: a – эмпирический коэффициент, зависящий от длины туннеля; W – площадь живого сечения туннеля, м²; H – превышение над входом в туннель, м. * Максимальный расход в начальный период истечения в туннель для озёр, подпруженных ледником. ** P_E – потенциальная энергия резервуара, определяемая как результат высоты дамбы озера (м), объема (м³) и удельного веса воды (9800 Н/м³). *** Формула (8) уточняет формулу (3) путём ввода численного значения коэффициента ($a=2,7$) для озёр Иле Алатау.			

Прорывы ледниковых озёр поверхностным путем по проранам в талых массивах современных морен. Рассматриваемый механизм прорывов ледниковых озёр по проранам в талых массивах современных морен наиболее опасен, поскольку при разрушении озерных перемычек сопровождается образованием мощной прорывной паводковой волны с расходами, на порядок и более превышающими бытовой (обычный) жидкий ледниковый сток водотока, питающего озеро.

Катастрофические прорывы ледниковых озёр поверхностным путем по проранам в талых массивах современных морен и разрушения озерных плотин известны в различных горных регионах [4, 6, 25–28, 30]. Зачастую выявить действительные причины опорожнения озерных котловин по рассматриваемому механизму затруднительно, так как непосредственные наблюдения отсутствуют, а сам процесс скоротечен и носит лавинообразный характер. Однако внешний вид проранов в телах озерных плотин, судя по фотографиям, размещенным в ряде работ, свидетельствует об отсутствии ледового ядра в местах разрушения озерных плотин.

Катастрофическим прорывам могут предшествовать просадки и сдвиги талых массивов. Это приводит к экспоненциальному росту живого сечения водного потока, интенсивной эрозии перемычки, резкому падению уровня воды в озерной котловине. Пиковый расход проходит в начальный период истечения воды из озера, когда площади водного зеркала и объёмы водной массы близки к максимальным значениям. Время опорожнения озерных котловин в этом случае может быть ограничено несколькими десятками минут.

15 июля 1973 г. в результате прорыва озера №2 у ледника Центральный Туйыксу в бассейне р. Киши Алматы произошла селевая катастрофа, повлекшая значительный материальный ущерб и

человеческие жертвы. Прорыв озера произошел поверхностным путем с разрушением озерной перемычки. В результате чего через возникший проран по долине реки устремилась прорывная волна с пиковым расходом около 250-350 м³/с, что более чем на два порядка превышает бытовой поверхностный сток с ледника [2, 14].

Анализ гидрографов прорыва, полученных в результате обследований, проведенных по следам селевого, показал, что при сходстве их формы и времени процесса пиковые расходы при опорожнении озерной котловины существенно различаются. Следует отметить разброс в значении пикового прорывного расхода, при том, что в основе его определения лежали одни и те же данные о времени истечения водной массы и морфометрических характеристиках озерной котловины. Также выяснилось, что за несколько лет до прорыва озера в его перемычке на месте возникновения прорана уже существовало глубокое, выраженное в рельефе русло, выработанное как поверхностным, так и фильтрационным стоком в направлении нижележащей небольшой котловины озера №3, о чём как очевидном факте свидетельствует фотография в работе 1970 г. (рисунок 5, А) [8].



Рисунок 5 – Прорывы ледниковых озер поверхностным путем по проранам в талых массивах современных морен:
А – прорыв озера №2 у л. Ц. Туйыксу (1973 г.) [2, 3], во врезке – участок места прорыва озёрной перемычки по состоянию до 1970 г. (вид с нижнего бьефа) [8]; В – озеро №13 у л. Советов после прорыва с прораном на гребне фронтальной морены (1977 г.)

Figure 5 – Glacial Lake outbursts via surface paths through breaches in the melt zones of contemporary moraines:
А – Outburst of Lake No. 2 near the Tuyuksu Glacier (1973) [2, 3], the inset shows the section of the lake dam breach site as of 1970 (view from the downstream side) [8]; В – Lake No. 13 near the Sovetov Glacier after the outburst, with a breach in the crest of the frontal moraine (1977)

Прорывы озер, вызванных разрушением их плотин, широко известны для многих регионов. Далее приведены эмпирические формулы для расчета пиковых прорывных расходов (таблица 2).

Полученные эмпирическим путем формулы (9), (11)-(13) для расчёта пиковых прорывных расходов показывают их связи с объёмами озер (прорывных паводков). Формула (10) также включает объем озера, выраженный опосредованно через потенциальную энергию воды. Далее приведен график (рисунок 6), отражающий эти связи, рассчитанные как для случаев прорывов через проран в моренной перемычке, так и при разрушениях перемычек в результате возникновения волн от обрушения ледовых или обломочных масс в озера.

Следует отметить, что случаи прорыва ледниковых озер при обрушении ледовых или обломочных масс, характерные для Южно-Американских Анд, Каракорума-Гиндукуша-Гималаев, в Казахстане в целом не известны. Тем не менее физика процессов поверхностного разрушения неконсолидированных, сложенных рыхлым моренным материалом озерных плотин схожа, как в случае возникновения волн при обрушении ледовых или обломочных масс в водоемы, так и в случае рассмотренных поверхностных прорывов ледниковых озер через прораны в талых массивах современных морен.

Таблица 2 – Эмпирические формулы для расчёта прорывов озёр с неконсолидированными плотинами и разрушением озерных плотин по данным из различных регионов

Table 2 – Empirical formulas for calculating lake outbursts with unconsolidated dams and lake dam failure using data from different regions

Причины прорыва озёр	Формула	Литература
Поверхностный прорыв по прорану в талом массиве современных морен	$Q_{max} = 0,0048 V^{0,896}(9)$	[29]
	$Q_{max} = 0,00013 (P_E)^{0,6}(10)$	[26]
При обрушении ледника в озеро	$Q_{max} = V/t_w (11)$	[28]
	$Q_{max} = 1100(V/10^6)^{0,44}(12)$	[30]
При обвале	$Q_{max} = 0,72 V^{0,5}(13)$	[27]

Примечание. P_E – потенциальная энергия резервуара, определяемая как результат высоты плотины озера (м), объема (m^3) и удельного веса воды ($9800 N/m^3$); t_w – константа со значением в 1000-2000 с.

Связь между объемами прорвавшихся озёр и пиковыми прорывными расходами, полученная для ледниковых озёр Иле Алатау [29], подтверждает общую тенденцию, отраженную линией регрессии, что позволяет рекомендовать этот подход для расчета количественных характеристик прорывов ледниковых озёр.

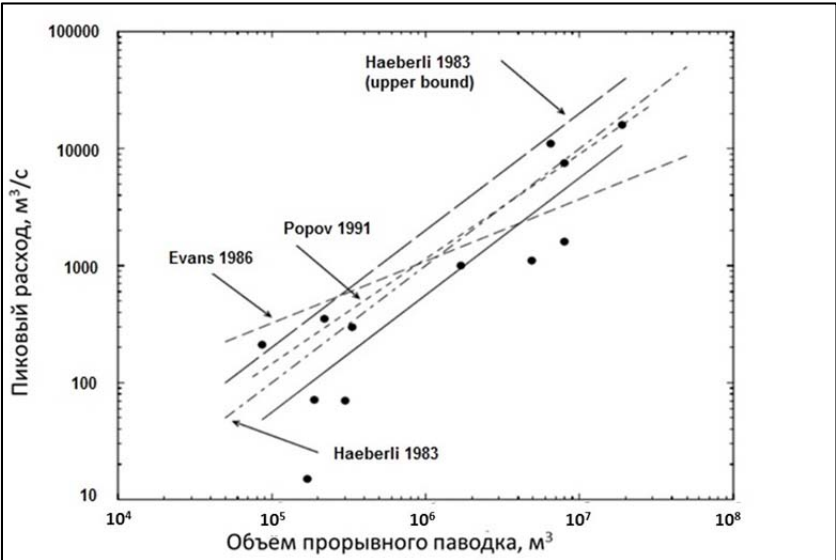


Рисунок 6 – Связи между пиковыми прорывными расходами и объёмами прорвавшихся ледниковых озёр с неконсолидированными рыхлыми плотинами

Figure 6 – Relationships between peak outburst discharges and volumes of glacial lakes that burst through unconsolidated loose dams

График на рисунке 6 показывает, что данные по поверхностным прорывам озёр по талым массивам современных морен для Иле Алатау находятся в доверительном интервале наблюдаемых данных [27-29], что соответствуют сведениям из других горных регионов и повышает их достоверность.

Адекватная оценка связи между прорывными расходами ледниковых озёр и сформированными ими селевыми потоками осуществлена только для тех случаев, когда были определены характеристики прорывных паводков, а максимальные расходы гляциальных селей измерялись инструментальным методом в створах непосредственно ниже селевых врезов (очагов). Данные по этим событиям в Иле и Жетысу Алатау приведены в таблице 3.

Максимальные расходы турбулентных селей на выходе из селевых (врезов) очагов определялись по методу «скорость – площадь» по формуле В. В. Голубцова [5], полученной для Иле Алатау, которая имеет следующий вид:

$$v = 4,25 \cdot h_{cp}^{0,5} \cdot i^{0,17}, \quad (14)$$

где v – скорость селевого потока, м²/с; h_{cp} – средняя глубина селевого потока, м; i – уклон, ‰.

Таблица 3 – Данные о прорывных паводках ледниковых озер и максимальных расходах в створах ниже селевых очагов (врезов)

Table 3 – Data on glacial lake outburst floods and maximum discharges in stations downstream of mudflows

Река	Дата селевого потока	Прорывной расход, м ³ /с	Максимальный расход селевого потока, м ³ /с	Литература
Киши Алматы	15.07.1973	350	10000 (принято 7000)	[3]
Средний Талгар	15.07.1974	30,0	250	[22]
Средний Талгар	02.08.1974	4,2	300	[22]
Шемолган	1975	26,0	360	[19]
Улкен Алматы	03. 08.1977	210	3900	[9]
Жарсай	03.07.1977	35,0	1000	[15]
Средний Талгар	21. 06. 1979	15,0	340	[23]
Каскелен	23.07.1980	22,0	510	[16]
Сарыкан	08. 09. 1982	130	1425	[20]
Средний Талгар	06. 07.1993	15,0	1340	[1]

По данным пиковых расходов при прорывах ледниковых озёр и максимальных расходах гляциальных селей на выходе из селевых очагов установлена корреляционная связь. Коэффициент корреляции (X , Y) по массивам данных x (пиковые прорывные расходы) и y (максимальные расходы селей на выходе из селевых очагов) составил 0,97 (рисунок 7). Уравнение регрессии описывается линейной функцией вида

$$y = 18,925x. \quad (15)$$

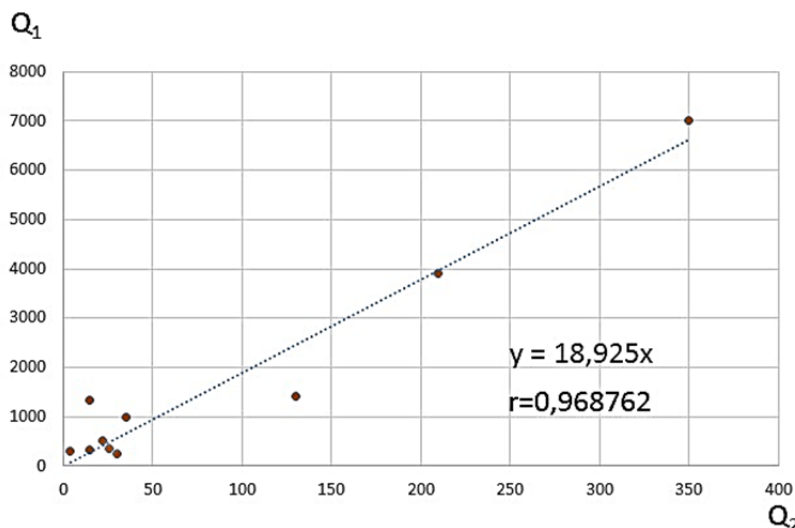


Рисунок 7 – Корреляционная связь между максимальными расходами гляциальных селей на выходе из селевых очагов Q_1 пиковыми расходами при прорывах ледниковых озер Q_2

Figure 7 – Correlation between maximum discharges of glacial mudflows at the exit from mudflow sources (Q_1) and peak discharges during glacial lake outbursts (Q_2)

Закключение. Полученные авторами результаты в ходе настоящих исследований позволяют сделать следующие выводы, касающиеся практического использования разработанной методики количественной оценки гляциальной селеопасности и дальнейших работ по рассмотренной тематике:

1. Для определения объёмов ледниковых озёр дистанционным методом рекомендуется использовать полученные эмпирическим путём, следующие расчётные формулы для Иле и Жетысу Алатау:

$$x = 0,059 y^{1.44}, \quad (1)$$

где x – объём озера, м^3 ; y – площадь водного зеркала озера м^2 , или

$$y = 0,044x^{1.476}, \quad (2)$$

где y – объём озера, м^3 ; x – площадь водного зеркала озера м^2 .

2. При внедрении методики следует предусмотреть на первом этапе количественной оценки гляциальной селеопасности выделение механизмов прорывов ледниковых озёр: *поверхностным путём по открытым ледовым каналам в озёрных плотинах, подземным путём через ледовые туннели, поверхностным путём по проранам в талых массивах современных морен*.

3. Пиковые расходы при поверхностных прорывах ледниковых озёр по открытым ледовым каналам в озёрных плотинах путем перелива через ледовые перемычки с постепенным углублением сливного канала за счёт теплообмена и эрозии следует рассчитывать по формуле

$$Q_{\max} = \lambda F, \quad (3)$$

где $Q_{\max}$ – пиковый прорывной расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; λ – интенсивность простаивания (углубления) канала, $\text{м}/\text{с}$; F – максимальная площадь водного зеркала, м^2 .

Непосредственные наблюдения показали, что для условий Иле Алатау максимальные значения λ оказались очень близкими и в среднем составляли $0,00017 \text{ м}/\text{с}$ или $0,612 \text{ м}/\text{ч}$.

4. Пиковые расходы при подземных прорывах ледниковых озёр по ледовым туннелям следует определять по формуле [24]

$$Q_{\max} = 75 (V/10^6)^{0.67}, \quad (4)$$

где V – объём озера, м^3 .

5. Максимальные прорывные расходы при поверхностных прорывах ледниковых озёр по проранам в талых массивах современных морен нужно рассчитывать по формуле [29]

$$Q_{\max} = 0,0048 V^{0.896}. \quad (9)$$

Объёмы и площади ледниковых озёр представляют характеристики потенциальной опасности, поскольку пусковым звеном гляциального селя служат именно прорывы указанных водоёмов с критическими значениями пиковых расходов.

Следует отметить, что наибольшую опасность представляют прорывы ледниковых озёр по проранам в талых массивах и ледовым туннелям, в процессе которых формируются максимальные расходы, на порядок и больше превышающие бытовой сток из озера.

6. Для определения максимальных расходов турбулентных гляциальных селевых потоков при выходе из селевых врезов (очагов) в долины рек рекомендуется воспользоваться полученной эмпирическим путем формулой

$$y = 18,925x, \quad (15)$$

где y – максимальный расход селевого потока; x – максимальный расход прорывного паводка, поступившего в селевой врез.

Достоверность результатов изучения подтверждается исследованиями зарубежных ученых, ссылки на работы, которых приведены в тексте статьи. Подтверждением полученных авторами результатов служат расчёты максимальных прорывных и селевых расходов для конкретного случая прорыва ледникового озера №13-бис в верховьях р. Кумбелсу (рисунок 8).

Расчёт показывает, что при реализации механизма прорыва озера поверхностным путем по прорану в талом массиве современной морены пиковый прорывной расход составляет

$$Q_{\max} = 0,0048 V^{0.896} = 0,0048 \cdot 154500^{0.896} = 214,0 \text{ м}^3/\text{с},$$

а максимальный расход селевого потока на выходе из Кумбелского селевого вреза равен $3961 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует катастрофическому гляциальному селю 1977 г.

7. Важность полученных результатов требует продолжения исследований с охватом всех опасных ледниковых озёр в бассейнах рек Иле и Жетысу Алатау.

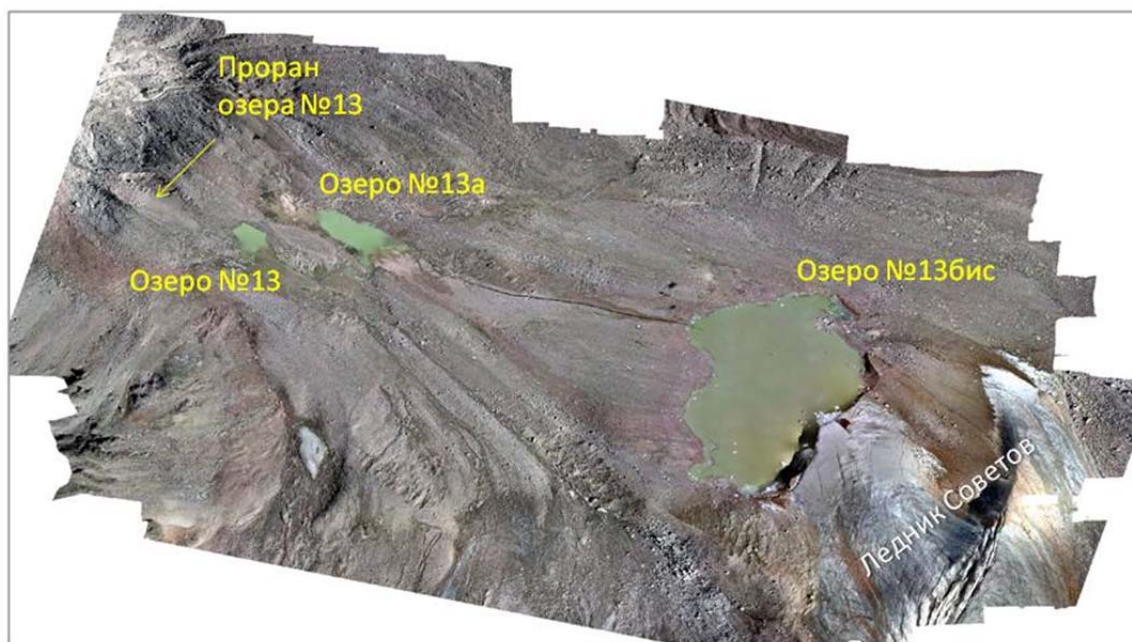


Рисунок 8 – Прорывоопасное озеро №13-бис у л. Советов в бассейне р. Кумбелсу (изображение с квадрокоптера)

Figure 8 – Potentially hazardous Lake No. 13-bis near the Sovetov Glacier in the Kumbelsu River basin (drone image)

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме «Научно-прикладное обоснование селе- оползне- и лавинобезопасности в горных районах Иле и Жетысу Алатау Республики Казахстан». Программно-целевое финансирование № BR21881982.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бекенов К. А., Касенов М. К. Селевая безопасность, 50 лет деятельности Казселезащиты: итоги, эффективность, перспективы. 1973-2023 гг. – Алматы: Zialy baspasy, 2023. – 208 с.
- [2] Виноградов Ю. Б., Земс А. Э., Хонин Р. В. Селевой поток 15 июля 1973 г. на Малой Алматинке // Селевые потоки. – М., 1976. – № 1. – С. 60-73.
- [3] Виноградов Ю. Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 155 с.
- [4] Герасимов В. А. Катастрофические явления северного склона Большого Кавказа, связанные с нивально-гляциальными процессами // Материалы гляциологических исследований. – М., 1978. – Вып. 32. – С. 71-76.
- [5] Голубцов В. В. Моделирование стока горных рек в условиях ограниченной информации. – Алматы, 2010. – 232 с.
- [6] Докукин М. Д., Хаткутов А. В. Озера у ледника Малый Азау на Эльбурсе: динамика и прорывы // Лёд и снег. – 2016. – Т. 56, № 4. – С. 472-479.
- [7] Докукин М. Д., Савернюк Е. А., Багов А. М., Маркина А. В. О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса бассейны рек Бирджалы-Су и Кара-Кая-Су // Лёд и снег. – 2012. – № 2(118). – С. 23-30.
- [8] Дуйсенов Е. Д. Селевые потоки в Заилийском Алатау. – Алма-Ата: Изд. «Казахстан», 1971. – 191 с.
- [9] Есенов У. Е., Деговец А. С. Селевые потоки 1977 г. на реке Большая Алматинка и задачи защиты города Алма-Аты // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1979. – С. 213-222.
- [10] Капица В., Шахгеданова М., Усманова З., Северский И., Благовещенский В., Касаткин Н., Мишенин В., Ребров Ю., Голенко А. Ледниковые озера Иле (Заилийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски // Труды 5-й международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. – Тбилиси: Издательство «Универсал», 2018. – С. 357-366.
- [11] Керемкулов В. А. Морфометрические характеристики и классификация моренных озер // Селевые потоки. – 1985. – № 9. – С. 36-46.
- [12] Медеу А. Р., Благовещенский В. П., Баймолдаев Т. А., Киренская Т. Л., Степанов Б. С. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. – Алматы: Институт географии, 2018. – Т. 2, ч. 2. Основы мониторинга в Иле Алатау. – 288 с.
- [13] Плеханов П. А. Гляциальные сели Заилийского Алатау и возможности их прогноза: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Ташкент, 1984. – 22 с.
- [14] Плеханов П. А., Судаков П. А., Токмагамбетов Г. А. Гляциальный селевой поток на р. Жарсай. 3/УП. – Алма-Ата, 1977. – С. 165-178.
- [15] Попов Н. В. О гляциальном селевом потоке 23 июля 1980 г. на р. Каскелен в Заилийском Алатау // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 222-230.
- [16] Попов Н. В. Особенности морфометрии приледниковых и моренных озер в Заилийском Алатау // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1988. – С. 31-37.

- [17] Попов Н. В. Количественная оценка и причины формирования селей в бассейне реки Жарсай // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1981. – С. 158-166.
- [18] Степанов Б. С., Яфязова Р. К. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. Т. 3. Селевые процессы и селетехнические сооружения. – Алматы, 2014. – 434 с.
- [19] Тихомиров Ю. П., Шевырталов Е. П. Некоторые характеристики гляциального селя, прошедшего в бассейне р. Сарканд // Селевые потоки. – М.: Гидрометеониздат, 1985. – № 9. – С. 132-138.
- [20] Технический отчет за 1993 год (селевые работы) «Обследование следов селевого потока 6.07.1993 г. в басс. р. Талгар. Глав. управление по гидрометеорологии при Кабинете Министров Республики Казахстан. Комплексная гидрологическая экспедиция». – Алматы, 1994. – С. 4-69.
- [21] Шушарин В. И., Марков И. Н. Наблюдения за формированием гляциальных селей в бассейне р. Средний Талгар // Селевые потоки. – 1976. – Сб. 1. – С. 98-107.
- [22] Шушарин В. И., Попов Н. В. Развитие селевого потока в бассейне реки Средний Талгар // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1981. – С. 153-157.
- [23] Carey M. Disasters, development, and glacial lake control in twentieth-century Peru // Wiegand E. ed. Mountains: sources of water, sources of knowledge. – Dordrecht, 2008. – P. 181-196.
- [24] Clague J. J., Mathews W. H. The magnitude of jökulhlaups // Journal of Glaciology. – 1973. – Vol. 12(66). – P. 501-504.
- [25] Clague J. J., Evans S. G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia // Quat. Sci. Rev. – 2000. – Vol. 19(17-18). – P. 1763-1783.
- [26] Costa J.E., Schuster R.L. The formation and failure of natural dams // Geological Society of America Bulletin. – 1988. – Vol. 7. – P. 1054-1068.
- [27] Evans S.G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of manmade and natural dams // Canadian Geotechnical Journal. – 1986. – № 23. – P. 385-387.
- [28] Haeberli W. Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps // Annals of Glaciology. – 1983. – Vol. 4. – P. 85-90.
- [29] Popov N. Assessment of glacial debris flow hazard in the north Tien-Shan // Proceedings of the Soviet-China-Japan Symposium and field workshop on natural disasters, 2–17 Sept. 1991. – P. 384-39.
- [30] Walder J.S., Costa J. E. Outburst floods from glacier-dammed lakes: the effect of mode of lake drainage on flood magnitude // Earth Surface Processes and Landforms. – 1996. – Vol. 21. – P. 701-723.

REFERENCES

- [1] Bekenov K. A., Kasenov M. K. Mudflow safety, 50 years of Kazselezaschita activity: results, efficiency, prospects. 1973-2023. Almaty: Zialy baspasy, 2023. 208 p (in Russ.).
- [2] Vinogradov Y. B., Zems A. E., Honin R. V. Mudflow on July 15, 1973 on Malaya Almatinka // Mudflows. M., 1976. No 1. P. 60-73 (in Russ.).
- [3] Vinogradov Y. B. Glacial outburst floods and debris flows. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 155 p. (in Russ.).
- [4] Gerasimov V. A. Catastrophic phenomena of the northern slope of the Greater Caucasus associated with nival-glacial processes // Materials of glaciologic researches. Moscow, 1978. Vol. 32. P. 71-76 (in Russ.).
- [5] Golubtsov V. V. Modeling of mountain river runoff under conditions of limited information. Almaty, 2010. 232 p. (in Russ.).
- [6] Dokukin M. D., Khatkutov A. V. Lakes near the Maly Azau glacier on Elbrus: dynamics and breakthroughs // Ice and Snow. 2016. Vol. 56, No 4. P. 472-479.
- [7] Dokukin M. D., Savernyuk E. A., Bagov A. M., Markina A. V. On the restructuring of the hydrographic network of the northeastern foothills of Elbrus (basins of the Birjaly-Su and Kara-Kaya-Su rivers) // Ice and Snow. 2012. No 2(118). P. 23-30 (in Russ.).
- [8] Duisenov E. D. Debris flows in the Zailiyskiy Alatau. Alma-Ata: Izd. "Kazakhstan", 1971. 191 p. (in Russ.).
- [9] Esenov U. E., Degovets A. S. Debris flows in 1977 on the river Bolshaya Almatika and tasks of protection of the city of Alma-Ata // Problems of anti-mudflow measures. Alma-Ata: Kazakhstan. 1979. P. 213- 222.
- [10] Kapitsa V., Shakhgedanova M., Usmanova Z., Seversky I., Blagoveshchensky V., Kasatkin N., Mishenin V., Rebrov Y., Golenko A. Glacial lakes of Ile (Zailiyskiy) Alatau: state, modern changes, probable risks // Proceedings of the 5th International Conference "Debris flows: catastrophes, risk, forecast, protection". Tbilisi: Universal Publishing House, 2018. P. 357-366 (in Russ.).
- [11] Keremkulov V. A. Morphometric characteristics and classification of moraine lakes // Mudflows. 1985. No 9. P. 36-46 (in Russ.).
- [12] Medeu A. R., Blagoveshchensky V. P., Baimoldaev T. A., Kirenskaya T. L. L., Stepanov B. S. Mudflow phenomena of South-Eastern Kazakhstan. Almaty: Institute of Geography, 2018. Vol. 2, ch. 2. Fundamentals of monitoring in Ile Alatau. 288 p. (in Russ.).
- [13] Plekhanov P. A. Glacial mudflows of the Zailiyskiy Alatau and the possibilities of their forecast: Author's thesis Cand. of Geogr. sciences. Tashkent, 1984. 22 p. (in Russ.).
- [14] Plekhanov P. A., Sudakov P. A., Tokmagambetov G. A. Glacial mudflow on the Zharsai River. 3/YII. 1977. P. 165-178 (in Russ.).
- [15] Popov N. V. On the glacial debris flow July 23, 1980 on the Kaskelen River in the Zailiyskiy Alatau // Coll. Problems of anti-mudflow measures. Alma-Ata: Kazakhstan, 1984. P. 222-230 (in Russ.).
- [16] Popov N. V. Features of morphometry of glacial and moraine lakes in the Zailiyskiy Alatau // Problems of antisettlement measures. Alma-Ata: Kazakhstan, 1988. P. 31-37 (in Russ.).

- [17] Popov N. V. Quantitative assessment and causes of mudflow formation in the basin of the Zharsai River // Problems of mudflow control measures. Alma-Ata, 1981. P. 158-166 (in Russ.).
- [18] Stepanov B. S., Yafyazova R. K. Debris flow phenomena of South-Eastern Kazakhstan. Vol. 3. Mudflow processes and mudflow engineering structures. Almaty, 2014. 434 p. (in Russ.).
- [19] Tikhomirov Y. P., Shevitalov E. P. Some characteristics of the glacial mudflow that took place in the basin of the Sarkand River // Mudflows. Moscow: Gidrometeoizdat, 1985. No 9. P. 132-138 (in Russ.).
- [20] Technical report for 1993 (mudflow works) "Survey of traces of mudflow 6.07.1993 in the basin of the Talgar River. Talgar". Main. Department of Hydrometeorology under the Cabinet of Ministers of the Republic of Kazakhstan, complex hydrological expedition. Almaty, 1994. P. 4-69 (in Russ.).
- [21] Shusharin V.I., Markov I.N. Observations on the formation of glacial mudflows in the basin of the Middle Talgar River // Mudflows. 1976. P. 98-107 (in Russ.).
- [22] Shusharin V. I., Popov N. V. The development of debris flow in the basin of the river Sredny Talgar // Problems of antisettlement measures. Alma-Ata, 1981. P. 153-157 (in Russ.).
- [23] Carey M. Disasters, development, and glacial lake control in twentieth-century Peru // Wiegandt E. ed. Mountains: sources of water, sources of knowledge. Dordrecht, 2008. P. 181-196 (in Russ.).
- [24] Clague J. J., Mathews W. H. The magnitude of jökulhlaups // Journal of Glaciology. 1973. Vol. 12(66). P. 501-504 (in Russ.).
- [25] Clague J. J., Evans S. G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia // Quat. Sci. Rev. 2000. Vol. 19(17-18). P. 1763-1783.
- [26] Costa J.E., and Schuster, R.L. The formation and failure of natural dams // Geological Society of America Bulletin. 1988. Vol. 7. P. 1054-1068.
- [27] Evans S.G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of manmade and natural dams // Canadian Geotechnical Journal. 1986. No 23. P. 385-387.
- [28] Haeblerli W. Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps // Annals of Glaciology. 1983. No 4. P. 85-90.
- [29] Popov N. Assessment of glacial debris flow hazard in the north Tien-Shan // Proceedings of the Soviet-China-Japan Symposium and field workshop on natural disasters, 2-17 Sept. 1991. P. 384-39.
- [30] Walder J. S., Costa J. E. Outburst floods from glacier-dammed lakes: the effect of mode of lake drainage on flood magnitude // Earth Surface Processes and Landforms. 1996. Vol. 21. P. 701-723.

Н. В. Попов¹, С. У. Ранова², А. Н. Камалбекова^{*3}, Ұ. Р. Алдаберген⁴

¹ Г. ғ. к., бас ғылыми қызметкер

(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; popovn@mail.ru)

² Г. ғ. к., табиғи қауіп-қатерлер зертханасының жетекшісі

(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; sandu2004@mail.ru)

^{3*} PhD докторант, кіші ғылыми қызметкер

(әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; aidana.kamalbekova@gmail.com)

⁴ PhD докторант, кіші ғылыми қызметкер

(әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; aldabergen_u@mail.ru)

ІЛЕ АЛАТАУДАҒЫ ГЛЯЦИАЛДЫ СЕЛ ҚАУІПІН САНДЫҚ БАҒАЛАУ

Аннотация. Мақала гляциалды сел қауіпін сандық форматта бағалау мәселесін зерттеуге арналған. Зерттеу ауданы-Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігі. Қазіргі уақытта гляциалды сел қауіптілігін бағалауды орындау әдістемелері негізінен сапалық критерийлерді пайдалануға негізделген. Жалпы алғанда, мұндай бағалау далалық зерттеулер мен бақылаулардың нәтижелеріне негізделгеніне қарамастан, олардың нәтижелері негізінен субъективті фактормен анықталды. Зерттеудің мақсаты-эмпирикалық деректер негізінде гляциалды сел қауіпін сандық бағалаудың жаңа әдістемесін құру арқылы мореналық-мұздық көлдердің серпінділігін бағалау кезінде сандық критерийлерді қолдану мәселесін шешу.

Жұмыста Іле Алатауының неғұрлым зерттелген сел қауіпі бар аудандары үшін есептеу әдісімен алғаш рет алынған гляциалды сел қауіпін бағалау нәтижелері келтірілген. Гляциалдық сел қауіпін сандық бағалау үшін мореналық-мұздық көлдерінің серпілістерін тікелей бақылау нәтижелері пайдаланылды, бұл серпінді су тасқынының сандық сипаттамалары мен гидрографтарын алуға мүмкіндік берді. Сондай-ақ, эмпирикалық есептеу формулаларын қолдана отырып, аспаптық әдіспен өлшенген сел ошақтарынан (кесінділерден) шығудағы серпінді су тасқыны көлемі мен турбулентті балшық тас ағындарының максималды шығыстары арасындағы байланыстар анықталды.

Түйін сөздер: гляциалдық серпінді су тасқыны, сел ошағы, гляциалдық сел ағыны, сел қауіпі, мұздық көлдері.

N. V. Popov¹, S. U. Ranova², A. N. Kamalbekova³, U. R. Aldabergen⁴

¹Candidate of Geographical Sciences, Chief Researcher

(JSC “Institute of Geography and Water Security”, Almaty, Kazakhstan; *popovn@mail.ru*)

²Candidate of Geographical Sciences, Head of the Laboratory of Natural Hazards

(JSC “Institute of Geography and Water Security”, Almaty, Kazakhstan; *sandu2004@mail.ru*)

³PhD Student, Junior Researcher (al-Farabi Kazakh National University, JSC “Institute of Geography and Water Security”, Almaty, Kazakhstan; *aidana.kamalbekova@gmail.com*)

⁴PhD Student, Junior Researcher (al-Farabi Kazakh National University, JSC “Institute of Geography and Water Security”, Almaty, Kazakhstan; *aldabergen_u@mail.ru*)

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GLACIAL DEBRIS FLOW HAZARD IN ILE ALATAU

Abstract. The present publication is devoted to studying the problem of quantitatively assessing glacial debris flow hazards. The study area, which includes river basins in the central part of the northern slope of Ile Alatau, is characterized by increased debris flow activity. Currently existing methods of glacial debris flow hazard assessment are based mainly on qualitative criteria. Despite the fact that such assessments were generally based on the results of field surveys and observations, their outcomes were largely determined by subjective factors. The aim of the study is to address the problem of using quantitative criteria in assessing the outburst hazard of moraine-glacial lakes by creating a new methodology for the quantitative assessment of glacial debris flow hazards based on empirical data.

The geodetic and bathymetric measurements of lake basins located on modern moraines and directly at glacier tongues served as a basis for this work, allowing us to identify relationships between lake areas and volumes. This paper presents the results of glacial debris flow hazard assessment, largely obtained for the first time using a computational method, for the most studied debris flow-prone areas of Ile Alatau. For the quantitative assessment of glacial debris flow hazard, the results of direct observations of moraine-glacial lake outbursts were used, allowing us to obtain quantitative characteristics and hydrographs of outburst floods. The relationships between the volumes of outburst floods and the maximum discharge of turbulent mudstone flows at the outlet of debris flow centers (incisions), measured by the instrumental method and using empirical calculation formulas, were also identified. These data were obtained during special surveys of the traces of past debris flows.

Keywords: glacial outburst flood, debris center, glacial debris flow, debris hazard, glacial lakes.