

Опасные экзогеодинамические процессы Қауіпті экзогеодинамикалық процестер Dangerous exogeodynamic processes

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-1-125-139.12>

МРНТИ 39.03.15 39.00.00
УДК 910.3

Н. В. Попов¹, С. У. Ранова², А. Н. Камалбекова^{*3},
Ұ. Р. Алдаберген⁴, И. Б. Скоринцева⁵

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)

⁵ Д. г. н., главный научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; skorintseva@mail.ru)

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОРЫВНЫХ ГЛЯЦИАЛЬНЫХ СЕЛЕЙ В КАЗАХСТАНЕ

Аннотация. Активизация гляциальных селей в Казахстане во второй половине прошлого века на фоне деградации современного оледенения привлекла внимание ученых к этому природному феномену. Многочисленные обследования, проведенные по следам селевых катастроф, показали, что причиной возникновения большинства этих опасных природных явлений оказались прорывы ледниковых озер. Основной целью настоящего обзора является создание антологии исследований прорывных гляциальных селей, ретроспективный ситуационный и объектный анализы. Ситуационный анализ включал рассмотрение конкретных ситуаций, приведших к образованию катастрофических гляциальных селей, выстроенных в хронологическом порядке. Объектный анализ проводился по различным направлениям, где объектами послужили научные публикации результатов исследований, напрямую касающиеся генезиса ледниковых озер, их водного режима, строения озерных плотин, механизмов прорывов ледниковых озер, прогнозов и превентивных противо-селевых мероприятий. Показана важная роль исследований, оказавших фундаментальное воздействие на формирование и углубление знаний в этой специфической области наук о Земле.

Ключевые слова: прорывные гляциальные сели, ледниковые озера, деградация оледенения, современная морена, исследования, публикации.

Введение. Исследование прорывных гляциальных селей в Казахстане имеет продолжительную историю, охватывающую как досоветский период в начале XX века, советский период 1951–1991 годы, так и период независимости Казахстана с 1991 года. Понятие «прорывные 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 период 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 очень высокой повторяемости. Как показывает статистика, подавляющее число гляциальных селей было вызвано приведенными причинами. В то же время все случаи катастро-

фических гляциальных селей в Казахстане были вызваны прорывами ледниковых озер. Именно поэтому основное внимание в обзоре уделяется исключительно исследованиям прорывов ледниковых озер. Ареной проявления гляциальных селевых процессов стали горные регионы Иле (Заилийского) и Жетысу (Джунгарского) Алатау, где прорывы ледниковых озер привели к образованию выдающихся по масштабам воздействия катастрофических селевых потоков.

По мере накопления фактических данных, полученных в результате исследований, менялось научное осмысление роли ледниковых озер в формировании селевых катастроф. В начальный период изучения селевых потоков в Казахстане приоритет базовых процессов в формировании селей отдавался лишь сейсмическим воздействиям, снеготаянию и ливневым осадкам. Оценка реальной селевой опасности изменилась только после всплеска селевой активности в Иле Алатау во второй половине XX века.

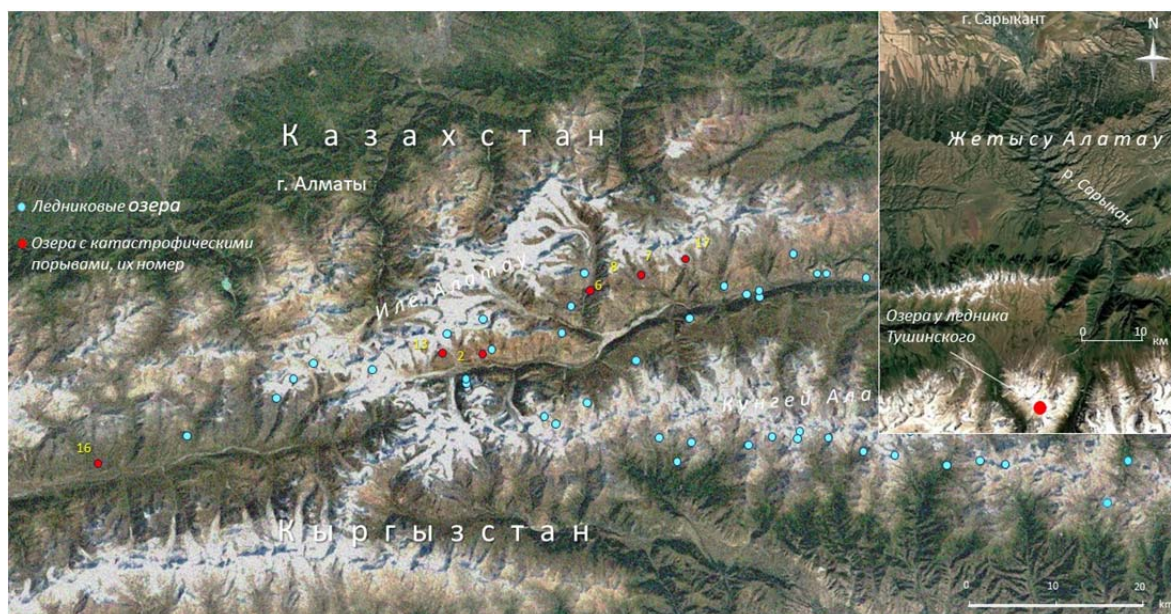
Из обширной массы опубликованного материала по теме исследования для анализа выделены основные работы, внесшие весомый вклад в обследование ледниковых озер, их классификацию, выявление особенностей строения озерных котловин и структуры водоудерживающих плотин, особенности водного режима, оценку и критерии прорывоопасности, механизмы прорывов водоемов. Данные наземных рекогносцировочных обследований, повторных инструментальных съемок ледниковых озер и непосредственные наблюдения за их прорывами позволили выявить связи между объемами прорывных паводков, максимальными прорывными расходами, а также максимальными расходами селей на выходе из селевых очагов (врезов).

Результаты исследований также подготовили обоснование для создания расчетных моделей катастрофических прорывов ледниковых озер. Помимо этого, дана характеристика исследований, касающихся прогнозирования прорывных гляциальных селей, а также обоснования превентивных мероприятий. Показана роль исследований в развитии специфической отрасли науки о селевых потоках, углублении знаний и понимания сложных процессов в гляциальной зоне Казахстана, запущенных изменением климатических условий и деградацией современного оледенения. В ходе подготовки обзора авторы придерживались хронологического подхода в оценке исследований. По мере накопления исходного материала, данных наблюдений происходила принципиальная корректировка общего понимания прорывных процессов, зачастую радикально меняющая общепринятые концепции формирования гляциальных селей в отдельные периоды времени.

Материалы и методы исследования. Настоящий обзор основан на результатах ретроспективного анализа научного материала, посвященного прорывным гляциальным селям Казахстана, и направлен на выявление вклада публикаций в развитие конкретных направлений исследований. Основной упор сделан на исследования прорывов ледниковых озер казахстанских ученых, результаты которых были опубликованы в научной литературе. Исходными данными при подготовке аналитического обзора послужили опубликованные в научных источниках результаты исследований ледниковых озер и прорывных гляциальных селей, проведенных в Казахстане с начала XX века. Статьи, посвященные указанной тематике, опубликованы в различных периодических научных изданиях: трудах институтов, журналах, сборниках, а также в монографиях, материалах научных совещаний, конференций и симпозиумов. Поскольку публикациям результатов исследований обычно предшествовали ведомственные рабочие отчеты, информационные записки, справки и другие материалы, хранящиеся в архивах соответствующих организаций, то некоторые из них также были использованы в настоящем обзоре. При подготовке обзора соблюдался хронологический подход при ситуационном и объектном анализе опубликованных материалов исследований. Ситуационный (ситуативный) анализ основан на рассмотрении конкретных селеопасных ситуаций, приведших к катастрофическим прорывным гляциальным селям. Объектный анализ проводился по отдельным направлениям исследований: генезис и эволюция ледниковых озер, классификация, гидрологический режим и механизмы формирования прорывных паводков, прогнозы, превентивные мероприятия, а также общее развитие знаний о прорывных гляциальных селях.

Настоящий обзор охватывает исследования прорывных гляциальных селей в Иле, большей частью и Жетысу Алатау (см. рисунок).

Место выбора исследований обусловлено тем, что указанные бассейны рек стали ареной развития гляциальных прорывных селей, повлекших огромные материальные ущербы и человеческие жертвы.



Район исследования. Отмечены места формирования катастрофических прорывных гляциальных селей в Иле и Жетысу Алатау (бассейн р. Сарыкан)

Research area. Marked are the locations of catastrophic glacial outburst debris flows formation in the Ile and Zhetysay Alatau (Sarykan River Basin)

Результаты и их обсуждение. В рамках настоящего обзора под определением «ледниковые озера» понимаются все водоемы, расположенные в гляциальной зоне, генетически связанные с современным оледенением. Прорыв озера здесь означает неординарное истечение водной массы из озерной котловины, которое при экстремально высоких параметрах потока формирует опасные прорывные волны.

В Казахстане термин «гляциальные сели» стал широко применяться в научной среде только во второй половине XX века и утвердился в отношении высокогорных селевых потоков [6]. До этого времени предполагалось, что преобладающая роль в формировании селей в условиях региона принадлежит дождям, обоснованием чему послужила селевая катастрофа 1921 г. в Алматы (Верный), вызванная интенсивным ливнем. Обзорная карта селеопасных территорий СССР, составленная в проблемной лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ в 1973-1974 гг., относит указанную территорию к «средней степени селеопасности». Считалось, что в Северном Тянь-Шане формировались только ливневые и талодождевые сели [17]. Позднее территория Иле Алатау перешла в категорию «высокой селеопасности» за счет активизации гляциальных селей.

На начальном этапе целью исследований было выявление участия ледниковых озер в формировании прошедших селевых потоков. Как правило, такие исследования ограничивались аэровизуальными или в лучшем случае наземными рекогносцировочными обследованиями. Результаты подобных исследований оформлялись в небольшие по объему информационные сообщения в периодических научных журналах или специализированных сборниках. В некоторых случаях отмечалось возможное участие прорывных озерных вод, что для большей основательности подкреплялось ссылками на другие селеобразующие факторы – опорожнение подледных/подземных емкостей, обрушение морены, выпадение «теплых» ливней на ледник. Ввиду того, что в большинстве случаев исследование ледниковых озер выполнялось в рамках общего обследования по следам прошедших селей, то морфометрические характеристики, количественные оценки образовавшихся прорывных паводков не определялись.

Впервые информация о наличии ледниковых озер в горах Иле Алатау появилась еще в первой половине XX века в результате исследований гляциологов [7, 8]. В силу своих относительно незначительных размеров ледниковые озера в тот период особого беспокойства не вызывали и воспринимались исследователями только как сопутствующий элемент гляциального рельефа.

Ледники тогда только перешли от стационарного состояния к отступанию, интенсивная деградация современного оледенения в явном виде еще не проявилась [9].

Ситуационный анализ исследований гляциальных прорывных селей в Иле и Жетысу Алатау представлен для каждого конкретного катастрофического прорывного гляциального селя в хронологическом порядке.

20 августа 1951 г. по реке К. Алматы прошел грязекаменный поток, разрушивший мосты, автодорогу и коммуникации в нижележащей долине. Селевой поток не вызвал разрушения в селитебной зоне города Алматы (Алма-Аты), но привлек к себе большое внимание, поскольку возник при ясной солнечной погоде, что само по себе казалось тогда фактом исключительным. Наземное рекогносцировочное обследование показало, что сель возник в результате прорыва небольшого озера у ледника Центральный Туйыксу (Туюксу), впоследствии получившего порядковый номер 2. Объем прорывного паводка оценен ориентировочно в 20 тыс. м³, максимальный прорывной расход – 15-18 м³/с, объем селевого потока – 200 тыс. м³ [55].

7 августа 1956 г. по той же р. К. Алматы прошел мощный селевой поток с расходом до 1000 м³/с и объемом 1,1 млн м³. Сель повлек значительный материальный ущерб, разрушил коммуникации, мосты, хозяйственные объекты. Мнения о причинах селевого потока среди исследователей разделились, что на страницах публикаций вылилось в продолжительную дискуссию. Ряд исследователей отмечал, что в формировании селя приняли участие прорывные воды из озера №2 у ледника Ц. Туйыксу. Другие, отмечая в целом недостаточный, по их мнению, объем озера (около 32 тыс. м³), в качестве основных причин указывали на излияние воды из внутриморенных (внутриледниковых) емкостей или обрушение морены. Количественные параметры прорыва озера и селевого потока получены визуально, без проведения геодезических съемок [2, 11, 13, 14, 18, 24].

6 июля 1958 г. в бассейне р. Есек сформировался селевой поток, достигший завального озера Иссык в среднегорной зоне. Сель отложился в вышележащей долине. Поскольку катастрофических последствий и разрушений в селитебной зоне селевой поток, объем которого первоначально был оценен в 0,14 млн м³, не повлек, то внимание к нему было минимальным, а причиной возникновения был просто назван ливень где-то в горах. Без внимания остались результаты наземного обследования УГМС Казахской ССР верховьев р. Есек, где у ледника Жарсай (правый) была обнаружена опустевшая котловина ледникового озера, впоследствии получившего порядковый номер 17. Максимальный расход прорывного паводка оценен в 150 м³/с. К сожалению, эти сведения были забыты и только через много лет повторный анализ исходных материалов позволил окончательно установить причины этого события и рассчитать объем селевого потока, составившего 2,0-4,0 млн м³ [2, 31, 32, 43].

7 июля 1963 г. в бассейне р. Иссык произошла выдающаяся по масштабу селевая катастрофа. Сель, образовавшийся в верховьях р. Жарсай, уничтожил высокогорное озеро Иссык, разрушил коммуникации, жилые и хозяйственные объекты в селе Иссык (позднее город Иссык), повлек многочисленные человеческие жертвы. Тогда возникли сложности при определении причин формирования катастрофического селевого потока. После проведенных аэровизуальных обследований, непосредственно после прохождения селя, в появившихся публикациях в качестве основной причины его формирования приводились выпадение интенсивного локального ливня (что не подтверждено данными), интенсивное таяние льда, обрушение (оползание) крупного массива увлажненного грунта фронтальной древней (верхнечетвертичной) морены ледников Жарсайской группы. Были указания на возможное участие озерных или ледниковых вод. Сотрудники УГМС КазССР провели наземное рекогносцировочное обследование и обнаружили опустевшую котловину озера у ледника Жарсай (правый), ту же, что и в 1958 г., открывшийся грот (вход в подледный туннель), по которому и была сброшена озерная вода в ходе прорыва.

Результаты обследования, включая фотоснимки, были включены в специальный отчет, позже переданный в архив организации. Несмотря на наличие прямого свидетельства прорыва ледникового озера, впоследствии получившего порядковый номер 17, мнение об оползневых или ливневых причинах Иссыкской селевой катастрофы в научных кругах и в прессе держалось в течение многих последующих лет. Основная причина такой ситуации – незначительный, по мнению исследователей, объем ледникового озера. Позднее были установлены количественные характеристики прорывного гляциального селя: объем прорывного паводка – 460 тыс. м³, максимальный расход селевого потока – 6,0-7,0 тыс. м³/с, объем – 5,8 млн м³ [2, 11, 12, 15, 32, 33, 43].

15 июля 1973 г. катастрофический селевой поток прошел по р. К. Алматы после прорыва озера №2 у ледника Ц. Туйыксу. Объем прорывного паводка оценен в 228 тыс. м³, максимальный прорывной расход составил 250-350 м³/с, максимальный расход селевого потока – до 10 тыс. м³/с, объем селя – 3, 8 млн м³. Сель причинил огромный материальный ущерб, повлек человеческие жертвы, что вызвало повышенный интерес к изучению ледниковых озер региона. По следам селя специалистами Сектора географии АН КазССР, УГМС КазССР и КазНИГМИ были проведены геодезические съемки опустевшей котловины озера №2 и селевого очага, выполнены расчеты основных характеристик селя. Публиковались разные значения максимальных расходов воды при прорыве озера, что объясняется расхождениями в данных геодезических съемок. В то же время мнение о причинах прорывного гляциального селя было единым, позднее оформленным различными публикациями [2, 4, 5, 39, 51, 52].

19 августа 1975 г. в верховьях реки Мынжылки (приток р. Кумбелсу) сформировался крупный селевой поток, разрушивший мосты и автодорогу в нижележащей долине реки У. Алматы. О причинах его образования единого мнения у исследователей не сложилось [1, 23, 40]. На фронтальном уступе современной морены у небольшого висячего ледника Кумбель вблизи перевала Молодежный образовался достаточно крупный врез (первичный селевой очаг) глубиной 5-7 м с вертикальными бортами, сложенными мерзлой породой. Утром на следующий день выше вреза обнаружено небольшое озеро №14 объемом 4000 м³. Было зафиксировано 15-сантиметровое понижение уровня воды в котловине. Также имело место небольшое поступление воды с ледника. Таким образом, объем воды в 150-200 м³ все-таки был сброшен во врез. Судя по всему, на фронтальном уступе плотины озера заложился талый массив, обводненный фильтрационными водами озера. Просадка талого участка вызвала дополнительный поверхностный сброс воды из озера и подвижку всего талого массива, объем которого и составил массу селевого потока в несколько десятков тысяч м³ с расходом до 300 м³/с в долине реки У. Алматы. На этом основании можно сделать вывод, что в условиях верховий реки Кумбелсу прорывы даже небольших по объему водоемов способны вызывать процессы селеобразования.

3 августа 1977 г. в долине р. Улкен Алматы сформировался катастрофический селевой поток, разрушивший мосты, коммуникации, автодорогу, ряд производственных, жилых объектов, повлекший человеческие жертвы. Импульсом к возникновению селевого потока послужил прорыв озера №13 у ледника Советов в бассейне р. Кумбелсу – правой составляющей р. У. Алматы. По следам селевого потока были проведены специализированные исследования УГМС КазССР и Казселезащитой, результаты которых позволили оценить количественные характеристики прорывного паводка и селевого потока. Прорыв озера произошел по прорану в талом массиве озерной плотины. Объем прорывного паводка составил 74,5-88,4 тыс. м³, максимальный прорывной расход – около 210 м³/с, максимальный расход селевого потока до – 11,0 тыс. м³/с, объем селя – от 2,5 до 3,2 млн м³. На озере в предыдущие годы выполнялись превентивные работы по снижению объема водной массы с 220 до 96,4 тыс. м³. Если в отношении причин возникновения селя у исследователей разногласий не было, то роль выполненных Казселезащитой превентивных мероприятий вызвала дискуссию. Наряду с положительным фактором общего снижения объема озера №13 существовало мнение о провоцировании прорыва превентивными мероприятиями [1, 10, 41, 42].

21 июня 1979 г. в долине р. Орталык Талгар сформировался прорывной гляциальный сель. По следам селевого потока Казселезащитой и Казгидрометом выполнено специализированное обследование, позволившее установить причину, основные параметры прорывного паводка и селевого потока. Сель возник в результате прорыва ранее не известного озера, расположенного у ледника Спортивный. Объем прорывного паводка составил 82,0 тыс. м³, максимальный прорывной расход – 15 м³/с, максимальный расход селя – 340 м³/с, объем селя – 140 тыс. м³. Обращает на себя внимание кажущееся противоречие между достаточно большим объемом прорывного паводка и небольшим объемом вызванного им селевого потока. Во всех других случаях объемы гляциальных селей намного превышали объемы прорвавшихся озер. Здесь же главной причиной, существенно снизившей размах селевых процессов, оказалось слабое увлажнение участка горного склона долины, который в силу местных особенностей оказался вне зоны воздействия основных фильтрационных потоков с ледников. Дата прохождения этого Талгарского селя является самой ранней для документированных гляциальных селей Иле и Жетысу Алатау. Несмотря на относительно

незначительные масштабы явления, сель нанес большой ущерб, полностью разрушив известный альплагерь «Талгар», действовавший с 1937 г. Из 24 строений 21 здание лагеря оказалось полностью разрушенным. Только благодаря своевременному оповещению удалось избежать человеческих жертв [1, 57].

Селевой поток 23 июля 1980 г. в бассейне р. Каскелен в ряду катастроф Иле Алатау занимает особое место благодаря не только удачному прогнозу прорыва, но и своевременно принятым мерам, что позволило существенно снизить его негативные последствия. Важно отметить неординарность события. Характер рельефа убедительно показывает, что по меньшей мере в течение последних нескольких тысяч лет крупных селевых явлений здесь не было. Исследования выявили, что 23 июля 1980 г. прорвалось ледниковое озеро №16, ранее не входившее в число опасных, поскольку его котловина пустовала. По данным прямых наблюдений за падением уровня воды в озере было установлено, что максимальный прорывной расход воды достигал $23 \text{ м}^3/\text{с}$. Объем прорывного паводка составил 220 тыс. м^3 . Прорвавшаяся после открытия грота озерная вода нашла выход на фронтальном откосе современной морены в 230 м от озерной котловины и на 20 м ниже максимального уровня заполнения озера.

Формирование селевого потока происходило на левом склоне долины ниже на высотах от 2700 до 3000 м над уровнем моря на участке древней морены. Максимальный расход селевого потока составил $510 \text{ м}^3/\text{с}$, а его объем оценен в 1,5 – 2,0 млн м^3 . В результате селя пострадали участки автодорог, мосты в долине р. Каскелен, дачные участки, отдельные хозяйственные объекты, удалось избежать главного – гибели людей. Событие сопровождалось комплексом своевременно принятых мер, включая краткосрочный прогноз прорыва озера, информирование заинтересованных органов об угрозе гляциального селя, а также проведением мероприятий по подготовке гидротехнических сооружений, коммуникаций и эвакуации населения из опасной зоны. После 1980 г. озеро №16 еще дважды прорывалось по аналогичной схеме без катастрофических последствий, при разных уровнях заполнения котловины [28, 36, 45, 46, 58].

В ночь с 8 на 9 сентября 1982 г. по р. Сарыкан (Сарканд) в Жетысу Алатау прошел катастрофический гляциальный селевой поток. Сель возник в результате последовательного прорыва трех озер, расположенных у ледника Тушинский. Максимальный прорывной расход ниже озер оценен в $290 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальный расход селевого потока в долине р. Сарыкан составил $2300 \text{ м}^3/\text{с}$, объем селевого потока – 2 млн м^3 . В 45 км от прорвавшихся озер, в черте города Сарыканд, сель прошел с расходом $350 \text{ м}^3/\text{с}$. В результате под воздействие селя попало более 400 жилых домов, некоторые были разрушены полностью. Пострадали мосты, автодороги, водохозяйственные и коммуникационные объекты. Только благодаря своевременному оповещению и эвакуации населения из опасной зоны человеческих жертв удалось избежать [1, 26, 28, 54].

06.07.1993 г. в 9 ч 20 мин в бассейне реки Орта Талгар в результате прорыва озера, расположенного у ледника Солнечный, сформировался грязекаменный селевой поток 1-й категории. Событие не было связано с какими-то особенностями текущей гидрометеорологической обстановки (высокий температурный фон, интенсивное таяние снега, ливневые осадки). Прорыв озера № 9 произошел из-за вскрытия подземных каналов стока, причем поверхность озера на 60% была покрыта массами плавающего снега. Формирование селевого потока началось на уступе современной морены, однако основной набор рыхлообломочного материала происходил ниже – в селевом очаге, сформированном на крутом уступе более древней морены. В русло реки Орта Талгар селевой поток вышел в 1,5 км ниже гидропоста «Альплагерь» (бывшая база альпинистов «Талгар»). По визуальной оценке, максимальные расходы потока приближались к $1000 \text{ м}^3/\text{с}$. На момент прорыва в котловине озера скопилось не многим более 100 тыс. м^3 воды. По оставленным меткам в русле максимальный расход прорыва не превышал 10 - 15 $\text{м}^3/\text{с}$, однако этого оказалось достаточно, чтобы сформировать селевой поток на выходе из очага, на два порядка превышающий характеристики водного паводка. По материалам экспедиционного обследования, выполненного в этом же году специалистами Казгидромета, объем рыхлообломочного материала, вынесенного непосредственно из очага, составлял 1,4 млн м^3 , а максимальный расход селя в створе уничтоженного РОС «Правый Талгар-дубль» достигал $1340 \text{ м}^3/\text{с}$. Основная масса селя (около 2 млн м^3) отложилась не доходя до города Талгара (в котловине строящейся противоселевой плотины), а в городской черте максимальные расходы селевого потока не превышали $30 \text{ м}^3/\text{с}$.

Селевой поток нанес ощутимый ущерб: ниже слияния притоков Он и Орта Талгар уничтожены или занесены участки автодороги общей протяженностью около 3 км, поврежден обводной канал Талгарской ГЭС, головное сооружение его полностью занесено селевыми отложениями; снесено несколько опор ЛЭП. На участке от устья реки Орта Талгар до строящейся плотины уничтожено 15 км (две нитки по 7,5 км) трубопровода питьевого водоснабжения, что вызвало перебои в обеспечении водой города и близлежащих населенных пунктов [1, 48].

17.07.2014 г. в бассейне р. Орта Талгар прошел селевой поток 2-й категории. По данным Института географии, селевой поток образовался в результате прорыва термокарстового моренного озера, расположенного на современной, насыщенной льдом морене, на высоте 3420 м под ледником Солнечный. Это озеро уже прорывалось в 1993 г., что привело к образованию катастрофического селя. В процессе опорожнения уровень воды в озере понизился ориентировочно на 4 м. Прорыву озера предшествовали дожди и повышенный температурный фон в высокогорье. По данным наблюдателей Казселезащиты, водоем освободился от зимнего льда к 30 июня, на уровнях воды ниже отметок перелива. Прорыв озера произошел из-за вскрытия внутриморенных каналов стока, при этом в отличие от 1993 года озерная котловина не была наполнена до максимальных отметок, поэтому сформировавшийся селевой поток имел меньшие численные значения. Озеро опорожнилось по подземному ледовому тоннелю длиной 1500 м. Выходное отверстие тоннеля находилось на высоте 3180 м в вершине эрозионного вреза, образованного селом 1993 г.

23 июля 2015 г. в бассейне р. Каргалы Иле Алатау сформировался гляциальный селевой поток, причиной которого послужил прорыв ранее не известного озера, расположенного у ледника Каргалинский. Прорыв озера произошел в ночь с 22 на 23 июля по подземным каналам стока в массиве современной морены. Максимальный прорывной расход составил около 5 м³/с, объем прорывного паводка оценен в 260 тыс. м³. У плотины-селеуловителя, устроенной на выходе реки из гор, объем селевых отложений – около 150 тыс. м³. Конструкция плотины с водосбросными сооружениями не обеспечила полного задержания селевого потока. Жидкая составляющая селя, грязевая суспензия, сбрасывалась ниже плотины по руслу р. Каргалы, где за счет размыва русловых отложений и обрушений бортов сформировался обогащенный наносами вторичный селевой паводок с расходами 15-30 м³/с. В результате прохождения селя в городе Алматы пострадали сотни жилых строений, мосты и пешеходные переходы, коммуникационные объекты. Было эвакуировано более 1000 человек. На ликвидацию последствий прохождения селя потребовалось более 2 млрд тенге [27].

Объектный анализ исследований прорывных гляциальных селей в Иле и Жетысу Алатау ориентирован на такие направления научной деятельности, как специализированные наземные обследования и инструментальные, включая дистанционные, методы измерения, генезис и эволюция ледниковых озер, классификация, водный режим, механизмы прорывов, прогнозы гляциальных селей и превентивные мероприятия.

Наземные обследования ледниковых озер с геодезическими и батиметрическими съёмками на отдельных водоёмах впервые выполнены селевой гидрографической партией УГМС КазССР в 1967-1969 гг. На северном склоне Иле Алатау в междуречье Узункаргалы – Есек выявлено 128 озер, из которых к категории «потенциально селеопасных» отнесено 18 объектов, по которым проверены геодезические и батиметрические съёмки. По остальным озерам инструментальные измерения не осуществлялись. Данные инвентаризации помещены только в ведомственный отчет и, к сожалению, нигде позже не публиковались. В 1970-х годах отдельные исследования также выполнялись Сектором (позднее институтом) географии и Институтом геологических наук АН КазССР. Исследования опасных ледниковых озер продолжились Казселезащитой после создания этой организации в 1973 г. Результаты таких исследований размещены в ведомственных отчетах по паспортизации ледниковых озер. Далее работы по инвентаризации ледниковых озер проводились также Институтом географии с использованием методов дистанционного зондирования, космических снимков, современного инструментария и программного обеспечения. Это позволило осуществлять наблюдение только в Иле Алатау за более чем 160 ледниковыми озерами, из которых 15 отнесены к категории прорывоопасных [16, 28, 30, 33, 34, 59].

Результаты обследований позволили изучить генезис и эволюцию ледниковых озер. Было показано, что возникновение ледниковых озер тесным образом связано с деградацией современного оледенения, выразившейся в сокращении линейных размеров ледниковых языков, росте

современных морен с погребенными линзами льда. Следуя за отступающими ледниками, на освобожденных ото льда участках, в образовавшихся понижениях (котловинах), возникли водоемы. Озера интенсивно развивались, наращивали водную массу за счет увеличения размеров котловин, процессов термокарста и таяния открытого льда на контакте с озерной водой. Этот процесс установлен многочисленными повторными инструментальными съемками ледниковых озер и отмечается как характерный признак прорывоопасности многими исследователями [2, 16, 21, 28, 34, 38, 44].

Вопросы классификации (типизации) ледниковых озер также находились в центре внимания исследователей. Если на начальном этапе чаще всего озера в целом именовались «моренными», то по мере накопления данных обследований типизация озер в гляциальной зоне детализировалась и усложнялась. По месту расположения водных объектов выделялись ледниковые, наледниковые, подпруженные ледником, приледниковые, перигляциальные, приледниково-западинные, каровые, моренные, моренно-ледниковые, западинные, подпруженные современной мореной озера, озера вне и на путях стока с ледника. Учет процессов озерообразования позволил выделить также термокарстовые или провальные озера [21, 28, 44, 46, 47, 51, 56, 59].

Изучение данных инструментальных измерений (геодезические и батиметрические съемки), аэрофото- и спутниковых съемок, а также непосредственные прямые наблюдения за прорывами ледниковых озер позволили установить зависимости между основными морфометрическими характеристиками ледниковых озер (линейными размерами, площадями и объемами воды массы). Полученные формулы эмпирических связей сделали возможным дистанционное определение объемов озер, без непосредственного проведения инструментальных измерений. Другим важным результатом исследований стало установление эмпирической связи объема ледникового озера и максимального прорывного расхода. Полученные значения характеристик прорывных паводков (объем, пиковый расход истечения, время опорожнения) различаются в зависимости от типа озер и механизма прорыва (поверхностный по открытому ледовому каналу, по прорану в талых массивах, по гrotам или подземным ледовым туннелям). Расчеты по полученным эмпирическим формулам подтверждаются данными зарубежных исследователей и способствуют объективной оценке прорывоопасности ледниковых озер [16, 19, 22, 28, 43, 46, 59].

Изучение результатов обследований следов гляциальных селей, наблюдения за водным режимом озер и формированием прорывных паводков позволили из общей массы ледниковых озер выделить стационарные и нестационарные озера. Эти водные объекты радикально отличаются характером наполнения котловин, временем существования и механизмами опорожнений. Также предложено классифицировать ледниковые озера по степени их прорывоопасности. Выделяются прорывоопасные, непрорывоопасные и потенциально прорывоопасные озера [21, 26, 44].

Проведенные исследования, натурные наблюдения за формированием прорывных гляциальных селей, количественные параметры, характеризующие экстремальное опорожнение ледниковых озер, послужили базой для разработки расчетных моделей прорывных гляциальных паводков. Предложены модели прорыва ледниковых озер через ледовую плотину, через гrot (подземные каналы стока), через проран в теле озерной плотины [2, 19, 22, 26, 59].

Селевые катастрофы обусловили необходимость развития такого направления исследований, как прогнозирование прорывных гляциальных селей. Базой для разработки методов прогноза гляциальных селей стали сведения, полученные прежде всего в результате обследований по следам селевых катастроф в Иле Алатау. Анализ публикаций по указанной теме показывает, что по мере накопления знаний процессов селеобразования в гляциальной зоне происходила трансформация методов и подходов к прогнозированию этого явления. В качестве прогностических явлений, способствовавших прорывам ледниковых озер, для фонового прогноза гляциальных селей на начальном этапе предлагались такие предикторы, как высота снеговой линии и температура воздуха за определенный период. Впоследствии количество метеорологических предикторов выросло, в методике была включена высота «0» изотермы, сумма атмосферных осадков, средние температуры за июль-август за 5 предшествующих лет, а также расход воды по характерной горной реке за предшествующую декаду. Предлагалось также в качестве предиктора использовать расхождение в текущих значениях объема стока соседних рек с ледниковым питанием, указывающее на скопление талых вод во внутрiledниковых или внутриморенных емкостях. В качестве прогнозного признака предлагалось использовать выявленные особенности водного режима

нестационарных ледниковых озер, само появление которых расценивается как предвестник скорого прорыва [2, 6, 13, 14, 16, 20, 38, 43, 45, 53].

Опыт исследований ледниковых озер позволил также приступить к разработке превентивных противоселевых мероприятий на опасных ледниковых озерах. Работы по предупреждению возможных прорывов ледниковых озер были развернуты Казселезащитой в Иле и Жетысу Алатау, в результате которых объемы десятков водных объектов были существенно снижены. Рекомендованы и впоследствии реализованы следующие инженерные мероприятия: откачка озерных вод с помощью сифонов или насосов; понижение гребня перелива сливного русла в плотинах фронтальных морен с использованием ручного труда, доступной техники или взрывчатых веществ; устройство гидротехнических шлюзов для контроля водного стока; создание обустроенных эвакуационных каналов в теле озерных плотин; контролируемое опорожнение озера по открытому ледовому каналу; защитные меры для предотвращения аварийного сброса озерных вод. Превентивные мероприятия для снижения прорывоопасности ледниковых озер требуют особой осторожности и научного сопровождения в ходе выполнения работ [11, 26, 28, 44, 46].

Заключение. Следует отметить определяющую роль авторов в создании теоретической базы проведенного по обозначенной теме исследования. Впервые создан инструмент системного ретроспективного анализа исследований прорывных гляциальных селей в Казахстане. Это позволило выделить из общей массы опубликованные работы, характеризующиеся ситуационным и объектным анализами. Ситуационный анализ основан на рассмотрении конкретных селеопасных ситуаций, приведших к катастрофическим прорывным гляциальным селям. Объектный анализ проводился по отдельным направлениям исследований, включающий генезис и эволюцию ледниковых озер, классификацию, гидрологический режим и механизмы формирования прорывных паводков, прогнозы, превентивные мероприятия, а также общее развитие знаний о прорывных гляциальных селях. В базу данных выполненного исследования вошли работы, в различной мере способствовавшие развитию науки о селях. Важно, что по мере сбора информации о причинах и последствиях прорывов ледниковых озер менялось также и понимание процессов формирования гляциальных селей.

Ситуационный и объектный анализы исследований прорывных гляциальных селей в Иле и Жетысу Алатау позволяют сделать следующие основные выводы.

Исследования прошедших гляциальных селей показали, что причиной селевых катастроф стали прорывы ледниковых озер, которые воспринимались ранее лишь как сопутствующий элемент гляциального рельефа. Возникновение ледниковых озер обусловлено деградацией современного оледенения в регионе, перешедшей в активную фазу в конце XIX – начале XX века.

В начальный период, вплоть до конца 1960-х годов, исследования ограничивались проведением аэровизуальных наблюдений или наземных рекогносцировочных обследований района возникновения селей без точных инструментальных измерений и были направлены на выявление роли возможных прорывов ледниковых озер в условиях доминирования концепции ливневых или оползневых факторов селеобразования гляциальных селей. Количественные характеристики как прорывных паводков, так и самих гляциальных селей носили весьма приближенный характер, так как назначались визуально.

Специализированные обследования ледниковых озер с включением геодезических и батиметрических работ позволили получить важные количественные характеристики прорывных паводков и катастрофических гляциальных селей.

Исследования установили факты определяющей роли прорывов ледниковых озер в возникновении селевых катастроф в регионе, что привело к изменению устоявшейся концепции формирования гляциальных селей за счет ливней, оползней в зоне верхнечетвертичных морен и выбросов воды из внутриледниковых емкостей. Следует отметить, что устоявшееся мнение сильно влияет на объективную оценку селеопасной ситуации. Так, при обследовании ледниковых озер в верховьях р. Жарсай в 1967-1969 гг. специалисты УГМС КазССР пропустили самое опасное в бассейне озеро №17, ранее вызвавшее катастрофические гляциальные сели 1958, 1963 гг. и которое никакого интереса у исследователей не вызвало, так как котловина у ледника Жарсай (правый) в момент обследования была пуста.

Инвентаризация (паспортизация) ледниковых озер, повторные инструментальные измерения обеспечили накопление морфометрических характеристик озер, что позволило изучить их эволю-

цию, выявить динамику изменения основных параметров озерных котловин. Установлено, что по мере увеличения размеров озерных котловин и объемов водной массы ледниковых озер нарушается устойчивость вододерживающих плотин, формируются ослабленные участки фронтальных морен с тальми массивами, растет интенсивность термокарстовых процессов, что ведет к росту прорывоопасности озер.

Непосредственные наблюдения за прорывами ледниковых озер и формированием прорывных гляциальных селей позволили выделить различные механизмы опорожнения озерных котловин: подземным путем по каналам стока (гrotтам, ледовым туннелям), поверхностным путем по открытым ледовым каналам и проранам в тальных массивах. Наиболее опасными являются прорывы ледниковых озер, происходящих подземным путем и поверхностным за счет образования прорана в ослабленной плотине озера.

Данные гидрометрических режимных наблюдений на озерах гляциальной зоны, отличия в морфометрии озерных котловин, структуре вододерживающих плотин и механизмах прорывов способствовали созданию классификаций ледниковых озер Казахстана.

Важным этапом исследований ледниковых озер стала разработка прогнозов прорывных гляциальных селей. Фоновые краткосрочные прогнозы ориентированы на выявление селеопасных ситуаций на обширной территории, без указания точного места возможных прорывов. Использование текущей гидрометеорологической информации обеспечило их применение в практической деятельности для объявления селеопасной обстановки с учетом складывающихся погодных условий и ограничения доступа населения в опасные зоны. Долгосрочным прогнозом прорывных гляциальных селей являются обнаружение в результате инвентаризации (паспортизации) прорывоопасных ледниковых озер, их картирование и оценка возможных прорывных характеристик.

Важным направлением исследований стала разработка рекомендаций и предложений по снижению/ликвидации опасности прорывов ледниковых озер путем превентивных мероприятий. Многие методы, предложенные казахстанскими исследователями, нашли практическое применение. В арсенале Казселезащиты – снижение горизонта заполнения ледниковых озер путем контролируемого сброса ледниковых озер с использованием энергии воды по открытым ледовым и ледово-мёрзлым каналам, откачка озерных вод сифонами и насосами, устройство эвакуационных каналов для сброса озерных вод с использованием инженерных механизмов, энергии взрывов. Поскольку выполнение работ на плотинах ледниковых озер сопряжено с определенным риском, то огромное значение приобретают рекомендованные защитные меры по предупреждению роста эрозии в каналах и контролю сбрасываемых расходов. Накопленный опыт исследований позволяет перейти к разработке нормативных документов, регламентирующих превентивные работы на ледниковых озерах.

Ретроспективный взгляд на исследования ледниковых озер в Казахстане показал, что они оказали большое влияние в целом на корректировку концепции формирования гляциальных селей, внесли весомый вклад в понимание прорывных явлений, расширили и углубили знания о селевых процессах в гляциальной зоне. Применение современных дистанционных методов мониторинга ледниковых озер, нового инструментария и программных продуктов позволит вывести исследования прорывных гляциальных селей на новый уровень, соответствующий международному научному опыту.

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] Бижанов Н. К., Виноходов В. Н., Кулмаханов Ш. К., Нурланов М. Т. Безопасность и контроль гляциальных селей в Казахстане. – Алматы: Гылым, 1998. – 102 с.
- [2] Виноградов Ю. Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. – Алматы: Гидрометеиздат, 1997. – 156 с.
- [3] Гидрографическое описание озера Иссык. Отчет УГМС КазССР. Фонды УГМС КазССР, 1963.
- [4] Голубов Р. С. Метеорологические условия формирования селевого потока 15 июля 1973 г. // Селевые потоки. – 1976. – № 1. – С. 73-74.
- [5] Голубович В. А. О причинах прорыва озера №2 на Туяксуйской морене 15 июля 1973 г. // Метеорология и гидрология. – 1976. – № 12. – С. 103-105.

- [6] Горбунов А. П. Гляциальные сели и пути их прогноза // Труды КазНИГМИ. – 1971. – Вып. 51. – С. 45-56.
- [7] Городецкий В. Д. Ледники рек Б. и М. Алматинки в хребте Заилийского Алатау // Известия Туркестанского отдела Русского географического общества. – 1918. – Т. XIV, № 1.
- [8] Дмитриев С. Е. Ледники в верховьях р. Малой Алматинки (Туюксу) в Заилийском Алатау, близ г. Верного // Известия Туркестанского отдела Русского географического общества. – 1907. – Т. VI.
- [9] Дмитриев С. Е. Отчет о поездке к истокам р. Чилик (Тау-Чилик) в 1910 г. // Известия Туркестанского отдела Русского географического общества. – 1913. – Т. IX.
- [10] Докладная записка об условиях формирования и прохождения селевого потока в басс. р. Большая Алматинка в период 3-4 августа 1977 г. Управление гидрометслужбы Казахской ССР. г. Алма-Ата, 7 с. (от 18 августа 1977 г. № РК-2-78).
- [11] Дуйсенов Е. Д. Селевые потоки в Заилийском Алатау. – Алма-Ата, 1971. – 192 с.
- [12] Земс А. Э. Некоторые количественные характеристики Жарсайского селя 1963 г. на р. Иссык // Селевые потоки. – М., 1976. – № 1. – С. 75-85.
- [13] Кавецкий С. П., Смирнов И. П. Селевые потоки неливневого происхождения // Труды КазНИГМИ. – 1957. – Вып. 9. – С. 43-52.
- [14] Кавецкий С. П., Гулина В. Р. Сели в районе ледников, возможность прогноза и борьба с ними // Материалы гляциологических исследований. – 1964. – Вып. 9. – С. 99-102.
- [15] Кавецкий С. П., Калмыкина Е. М. Сель на реке Иссык 7 июля 1963 года // Вестник МГУ, серия V, география. – 1964. – № 2. – С. 77-80.
- [16] Капица В. П., Шахгеданова М. В., Усманова З. С., Северский И. В., Благовещенский В. П., Касаткин Н. Е. Ледниковые озера Иле (Заилийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски // Геориск. – 2018. – Т. XII, № 3. – С. 68-78.
- [17] Карта селеопасных районов СССР. ГУГК, 1975.
- [18] Качалов Д. А. О грязекаменном потоке и опыте организации информационно-предупредительной службы // Материалы IV Всесоюзной конференции по селевым потокам. – Алма-Ата, 1959. – С. 32-39.
- [19] Керемкулов В. А., Цукерман И. Г. Модель катастрофического опорожнения озера через проран в теле перемычки, сложенной рыхлообломочными породами // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – № 8. – С. 92-108.
- [20] Керемкулов В. А., Киренская Т. Л. О прогнозировании прорыва моренных озер // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – № 9. – С. 84-92.
- [21] Керемкулов В. А. Морфометрические характеристики и классификация моренных озер // Селевые потоки. – М., 1985. – № 9. – С. 36-47.
- [22] Керемкулов В. А., Цукерман И. Г. Модель опорожнения моренного озера через грот // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – № 9. – С. 59-70.
- [23] Киренская Т. Л., Степанов Б. С., Хонин Р. В. Селевой поток в бассейне Большая Алматинка 19 августа 1975 г. // Селевые потоки. – 1977. – № 2. – С. 115-119.
- [24] Колотилин Н. Ф. Геологические условия образования некоторых селей локального проявления (на примере селевого потока в долине р. Малой Алматинки 7 августа 1956 г.) // Материалы IV Всесоюзной конференции по селевым потокам. – Алма-Ата: Изд. АН КазССР, 1959. – С. 40-51.
- [25] Литовченко А. Ф. Катастрофический селевой паводок на р. Иссык // Метеорология и гидрология. – 1964. – № 4. – С. 39-42.
- [26] Медеу А.Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. Основы управления. – Алматы, 2011. – Т. 1. – 284 с.
- [27] Медеу А. Р., Киренская Т. Л., Благовещенский В. П., Аскарлова М. А. Гляциальный селевой поток в бассейне реки Каргалы (Иле Алатау) 23 июля 2015 г. // Вопросы географии и геоэкологии. – Алматы, 2015. – № 4. – С. 73-79.
- [28] Медеу А. Р., Баймолдаев А. Т., Киренская Т. Л. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана // Антология селевых явлений и их исследования. – Алматы, 2016. – Т. 4, ч. 1. – 576 с.
- [29] Осипова Н. А., Казанников С. М. Оценка объемов выноса рыхлообломочного материала из бассейна р. Кумбельсу селем 1977 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1982. – № 6. – С. 81-83.
- [30] Отчет УГМС КазССР. Обзор селевой деятельности северного склона Заилийского Алатау за 1955-1959 гг. – 1960. – 186 с.
- [31] Отчет УГМС КазССР. Гидрографическое описание озера Иссык. – 1963.
- [32] Отчет УГМС КазССР. Результаты рекогносцировочного наземного обследования реки Жарсай. – 1963.
- [33] Отчет УГМС КазССР. Отчет по произведенному обследованию высокогорных и завальных озер в горах Заилийского Алатау за 1967-1969 годы. – Алма-Ата, 1969. – 186 с.
- [34] Отчет о результатах паспортизации моренных озер Заилийского Алатау. Казселезащита при Совете Министров Казахской ССР, Эксплуатационно-техническое управление связи. – Алма-Ата, 1980. – 66 с.
- [35] Отчет Казселезащиты. Анализ состояния селеопасных моренных озер Заилийского Алатау и предложения по их мелиорации. – Алма-Ата, 1983. – 42 с.
- [36] Отчет Казселезащиты. Прорыв моренного озера №16 и прохождение селевого потока в бассейне р. Каскелен 5 июля 1986 года. – Алма-Ата, 1987. – 14 с.
- [37] Обследование следов селевого потока 6.07.1993 г. в бассейне р. Талгар: Технический отчет за 1993 год Управления по гидрометеорологии при КМ РК, комплексная гидрологическая экспедиция. – Алматы, 1994. – 69 с.
- [38] Плеханов П. А. Гляциальные сели Заилийского Алатау и возможности их прогноза: Дис. ... к. г. н. – Алма-Ата, 1984.
- [39] Плеханов П. А., Судаков П. А., Токмагамбетов Г. А. Причины образования и процессы формирования селевого потока на р. Малая Алматинка 15 июля 1973 г. // Вестник АН КазССР. – 1975. – № 4. – С. 24-25.

- [40] Плеханов П. А. Гляциальный селя 19 августа 1975 г. в бассейне р. Б. Алматинки // Снежные лавины и ледники Казахстана. – Алма-Ата, 1977. – С. 144-154.
- [41] Попов В. И., Степанов Б. С., Мочалов В. П., Хонин Р. В., Марков И. Н., Голубович В. А., Бекаревич В. Е. Селевые явления 3-31 августа 1977 г. в бассейне р. Большая Алматинка // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1980. – № 4. – С. 57-63.
- [42] Попов Н. В. Селевые явления 3–31 августа 1977 г. в бассейне р. Б. Алматинка // XV Всесоюзная научно-техническая конференция по противоселевым мероприятиям: тезисы докладов, 27–28 сентября 1978 г. – Ташкент, 1978. – Вып. 1.
- [43] Попов Н. В. Количественная оценка и причины формирования селей в бассейне реки Жарсай. – Алма-Ата: Казахстан, 1981. – С. 158-166.
- [44] Попов Н. В. О селеопасных озерах гляциальной зоны Заилийского Алатау // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 96-105.
- [45] Попов Н. В. О гляциальном селевом потоке 23 июля 1980 года в бассейне реки Каскелен Заилийского Алатау // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 222-230.
- [46] Попов Н. В. О методах борьбы с гляциальными селями прорывного характера // Противоселевые мероприятия. – Алма-Ата: Казахстан, 1986. – С. 56-62.
- [47] Попов Н. В. Особенности морфометрии приледниковых и моренных озер в Заилийском Алатау // Противоселевые мероприятия. – Алма-Ата: Казахстан, 1988. – С. 31-37.
- [48] Справка о прохождении селевого потока по р. Талгар 6 июля 1993 г.: Оперативная информация ГДП ПО «Казселезащита», Минтрансстрой РК. – 1993.
- [49] Тихомиров Ю. П., Шевырталов Е. П. Некоторые характеристики гляциального селя, прошедшего в бассейне р. Сарканд // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – № 9. – С. 132-138.
- [50] Токмагамбетов Г. А. Ледники Заилийского Алатау. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 367 с.
- [51] Токмагамбетов Г. А., Судаков П. А., Плеханов П. А. Гляциальные сели Заилийского Алатау и пути их прогноза // МГИ: Хроника обсуждения. – 1980. – Вып. 39. – С. 97-101.
- [52] Флейшман С. М., Моссаковская И. А., Перов В. Ф. Алматинский селя 15 июля 1973 г. // Вестник МГУ, серия V, география. – 1974. – № 2. – С. 35-39.
- [53] Фононый прогноз гляциальных селей: методическое руководство. – Алма-Ата: Наука, 1985. – 61 с.
- [54] Хегай А. Ю., Анищенко А. П., Шушарин В. И. Селевые потоки в Заилийском и Джунгарском Алатау (бассейны рек Иссык и Сарканд) в 1982 г. Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 231-236.
- [55] Черкасов П. А. Грязекаменный поток в долине Малой Алматинки // Изв. АН КазССР. Серия геол. – Вып. 16, № 121. – С. 118-120.
- [56] Шатравин В. Н., Ставицкий Я. С. Методические основы выявления селеформирующих факторов при детальном обследовании высокогорных озер // Селевые потоки. – № 8. – С. 83-92.
- [57] Шушарин В. И., Попов Н. В. Развитие селевого потока в бассейне р. Средний Талгар // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1981. – С. 153-157.
- [58] Энгельс А. А., Белецкий А. Я. Инженерно-геологические особенности моренного озера №16 в бассейне р. Каскелен // Селевые потоки. – 1985. – № 9. – С. 138-143.
- [59] Akhmetkal R. Medeu, Nikolay V. Popov, Viktor P. Blagovechshenskiy, Maulken A. Askarova, Alikhan A. Medeu, Sandugash U. Ranova, Aidana Kamalbekova, Tobias Bolch. Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan // Earth-Science Reviews. – 2022. – Vol. 229. – 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>

REFERENCES

- [1] Bizhanov N. K., Vinohodov V. N., Kulmakhanov Sh. K., Nurlanov M. T. Safety and control of glacial mudflows in Kazakhstan. Almaty: Gylym, 1998. 102 p. (in Russ.).
- [2] Vinogradov Yu. B. Glacial breakthrough floods and mudflows. Almaty: Hydrometeoizdat, 1997. 156 p. (in Russ.).
- [3] Hydrological description of Issyk Lake // Report of UGMS KazSSR. UGMS KazSSR Archives, 1963 (in Russ.).
- [4] Golubov R. S. Meteorological conditions of the formation of the mudflow on July 15, 1973 // Mudflows. 1976. No. 1. P. 73-74 (in Russ.).
- [5] Golubovich V. A. On the causes of the breakthrough of Lake No. 2 on the Tuyuksu moraine on July 15, 1973 // Meteorology and Hydrology. 1976. No. 12. P. 103-105 (in Russ.).
- [6] Gorbunov A. P. Glacial mudflows and ways to predict them // Proceedings of KazNIGMI. 1971. Issue 51. P. 45-56 (in Russ.).
- [7] Gorodetsky V. D. Glaciers of the Bolshaya and Malaya Almatinka rivers in the Zailiysky Alatau ridge // Proceedings of the Turkestan Branch of the Russian Geographical Society. 1918. Vol. XIV, No. 1 (in Russ.).
- [8] Dmitriev S. E. Glaciers in the upper reaches of the Malaya Almatinka River (Tuyuksu) in Zailiysky Alatau, near the city of Verny // Proceedings of the Turkestan Branch of the Russian Geographical Society. 1907. Vol. VI (in Russ.).
- [9] Dmitriev S. E. Report on the trip to the sources of the Chilik River (Tau-Chilik) in 1910 // Proceedings of the Turkestan Branch of the Russian Geographical Society. 1913. Vol. IX (in Russ.).
- [10] Memorandum on the conditions of formation and passage of the mudflow in the Bolshaya Almatinka River basin from August 3-4, 1977 // Hydrometeorological Service Administration of the Kazakh SSR. Alma-Ata, 7 p. (August 18, 1977, No. RK-2-78). (in Russ.).
- [11] Duisenov E. D. Mudflows in Zailiysky Alatau. Alma-Ata, 1971. 192 p. (in Russ.).
- [12] Zems A. E. Some quantitative characteristics of the Zharsai mudflow of 1963 on the Issyk River // Mudflows. M., 1976. No. 1. P. 75-85 (in Russ.).

- [13] Kavetsky S. P., Smirnov I. P. Mudflows of non-rainfall origin // Proceedings of KazNIGMI. 1957. Issue 9. P. 43-52 (in Russ.).
- [14] Kavetsky S. P., Gulina V. R. Mudflows in glacier areas, possibility of prediction and control // Materials of glaciological research. M., 1964. Issue 9. P. 99-102 (in Russ.).
- [15] Kavetsky S. P., Kalmykina E. M. Mudflow on the Issyk River on July 7, 1963 // Bulletin of Moscow State University. Series V, Geography. 1964. No. 2. P. 77-80 (in Russ.).
- [16] Kapitsa V. P., Shakhgedanova M. V., Usmanova Z. S., Seversky I. V., Blagoveshchensky V. P., Kasatkin N. E. Glacial lakes of the Ile (Zailiysky) Alatau: state, current changes, probable risks // Georisk. 2018. Vol. XII, No. 3. P. 68-78 (in Russ.).
- [17] Map of mudflow-prone areas of the USSR. GUGK, 1975. (in Russ.).
- [18] Kachalov D. A. On debris flows and the experience of organizing an information-warning service // Materials of the IV All-Union Conference on Mudflows. Alma-Ata, 1959. P. 32-39 (in Russ.).
- [19] Keremkulov V. A., Tsukerman I. G. Model of catastrophic lake drainage through a breach in a dam composed of loose detrital material // Mudflows. M.: Hydrometeoizdat, 1984. No. 8. P. 92-108 (in Russ.).
- [20] Keremkulov V. A., Kirenskaya T. L. On the prediction of moraine lake breakthroughs // Mudflows. M.: Hydrometeoizdat, 1985. No. 9. P. 84-92 (in Russ.).
- [21] Keremkulov V. A. Morphometric characteristics and classification of moraine lakes // Mudflows. M., 1985. No. 9. P. 36-47 (in Russ.).
- [22] Keremkulov V. A., Tsukerman I. G. Model of moraine lake drainage through a grotto // Mudflows. M.: Hydrometeoizdat, 1985. No. 9. P. 59-70 (in Russ.).
- [23] Kirenskaya T. L., Stepanov B.S., Khonin R. V. Midflow in the Bolshaya Almatynka basin on August 19, 1975 // Mudflows. 1977. No. 2. P. 115-119.
- [24] Kolotilin N. F. Geological conditions of the formation of certain local mudflows on the example of the mudflow in the valley of the Malaya Almatinka River on August 7, 1956 // Materials of the IV All-Union Conference on Mudflows. Alma-Ata: Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, 1959. P. 40-51 (in Russ.).
- [25] Litovchenko A. F. Catastrophic mudflow flood on the Issyk River // Meteorology and Hydrology. 1964. No. 4. P. 39-42 (in Russ.).
- [26] Medeu A. R. Mudflow phenomena in Southeastern Kazakhstan. Fundamentals of management. Almaty, 2011. Vol. 1. 284 p. (in Russ.).
- [27] Medeu A. R., Kirenskaya T. L., Blagoveshchensky V. P., Askarova M. A. Glacial mudflow in the Kargaly River basin (Ile Alatau) on July 23, 2015 // Questions of Geography and Geoecology. Almaty, 2015. No. 4. P. 73-79 (in Russ.).
- [28] Medeu A. R., Baymoldaev A. T., Kirenskaya T. L. Mudflow phenomena in Southeastern Kazakhstan // Anthology of mudflow phenomena and their studies. Almaty, 2016. Vol. 4, part 1. 576 p. (in Russ.).
- [29] Osipova N. A., Kazannikov S. M. Assessment of the volume of loose debris material removal from the Kumbelsu River basin by the 1977 mudflow // Mudflows. Moscow, Hydrometeoizdat, 1982. No. 6. P. 81-83 (in Russ.).
- [30] Report of the Hydrometeorological Service of the Kazakh SSR. Overview of mudflow activity on the northern slope of the Zailiysky Alatau for 1955-1959. 1960. 186 p. (in Russ.).
- [31] Report of the Hydrometeorological Service of the Kazakh SSR. Hydrographic description of Issyk Lake/ 1963 (in Russ.).
- [32] Report of the Hydrometeorological Service of the Kazakh SSR. Results of reconnaissance ground survey of the Zharsay River. 1963 (in Russ.).
- [33] Report of the Hydrometeorological Service of the Kazakh SSR. Report on the survey of high-mountain and dammed lakes in the Zailiysky Alatau mountains for 1967-1969. Alma-Ata, 1969. 186 p. (in Russ.).
- [34] Report on the results of passportization of moraine lakes in the Zailiysky Alatau. Kazselezashchita under the Council of Ministers of the Kazakh SSR, Operational and Technical Communication Management. Alma-Ata, 1980. 66 p. (in Russ.).
- [35] Report of Kazselezashchita. Analysis of the condition of hazardous moraine lakes in the Zailiysky Alatau and proposals for their reclamation. Alma-Ata, 1983. 42 p. (in Russ.).
- [36] Report of Kazselezashchita. Breakthrough of moraine lake No. 16 and passage of the mudflow in the Kaskelen River basin on July 5, 1986. Alma-Ata, 1987. 14 p. (in Russ.).
- [37] Examination of traces of the mudflow on July 6, 1993, in the Talgar River basin: Technical report for 1993 of the Hydrometeorological Administration under the Cabinet of Ministers of the Republic of Kazakhstan, comprehensive hydrological expedition. Almaty, 1994. 69 p. (in Russ.).
- [38] Plekhanov P. A. Glacial mudflows of the Zailiysky Alatau and possibilities of their prediction. Dis. ... Candidate of Geographical Sciences. Alma-Ata, 1984 (in Russ.).
- [39] Plekhanov P. A., Sudakov P. A., Tokmagambetov G. A. Causes of formation and processes of development of the mudflow on the Malaya Almatinka River on July 15, 1973 // Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR. 1975. No. 4. P. 24-25 (in Russ.).
- [40] Plekhanov P. A. Glacial mudflow on August 19, 1975, in the Bolshaya Almatinka River basin // Snow Avalanches and Glaciers of Kazakhstan. Alma-Ata, 1977. P. 144-154 (in Russ.).
- [41] Popov V. I., Stepanov B. S., Mochalov V. P., Khonin R. V., Markov I. N., Golubovich V. A., Bekarevich V. E. Mudflow events from August 3 to 31, 1977, in the Bolshaya Almatinka River basin // Mudflows. Moscow: Hydrometeoizdat, 1980. No. 4. P.57-63 (in Russ.).
- [42] Popov N. V. Mudflow events from August 3 to 31, 1977, in the Bolshaya Almatinka River basin // XV All-Union Scientific and Technical Conference on Mudflow Protection Measures: Abstracts of Reports, September 27-28, 1978. Tashkent, 1978. Issue 1 (in Russ.).
- [43] Popov N. V. Quantitative assessment and causes of mudflow formation in the Zharsay River basin. Alma-Ata: Kazakhstan, 1981. P. 158-166 (in Russ.).

- [44] Popov N. V. On hazardous glacial lakes in the Zailiysky Alatau // Problems of Mudflow Protection Measures. Alma-Ata: Kazakhstan, 1984. P. 96-105 (in Russ.)
- [45] Popov N. V. On the glacial mudflow of July 23, 1980, in the Kaskelen River basin of the Zailiysky Alatau // Problems of Mudflow Protection Measures. Alma-Ata: Kazakhstan, 1984. P. 222-230 (in Russ.)
- [46] Popov N. V. On methods of combating breakthrough-type glacial mudflows // Mudflow Protection Measures. Alma-Ata: Kazakhstan, 1986. P. 56-62 (in Russ.)
- [47] Popov N. V. Features of the morphometry of proglacial and moraine lakes in the Zailiysky Alatau // Mudflow Protection Measures. Alma-Ata: Kazakhstan, 1988. P. 31-37 (in Russ.)
- [48] Report on the passage of the mudflow in the Talgar River on July 6, 1993: Operational information of GDP PO "Kazselezashchita", Ministry of Transport and Construction of the Republic of Kazakhstan, 1993 (in Russ.)
- [49] Tikhomirov Yu. P., Shevyrtalov E. P. Some characteristics of the glacial mudflow that occurred in the Sarkan River basin // Mudflows. Moscow: Hydrometeoizdat, 1985. No. 9. P. 132-138 (in Russ.)
- [50] Tokmagambetov G. A. Glaciers of the Zailiysky Alatau. Alma-Ata: Nauka, 1976. 367 p. (in Russ.)
- [51] Tokmagambetov G. A., Sudakov P. A., Plekhanov P. A. Glacial mudflows of the Zailiysky Alatau and methods for their prediction // MGI: Discussion Chronicle. 1980. Issue 39. P. 97-101 (in Russ.)
- [52] Fleishman S. M., Mossakovskaya I. A., Perov V. F. The Almaty mudflow of July 15, 1973 // Bulletin of Moscow State University, Series V, Geography. 1974. No. 2. P. 35-39 (in Russ.)
- [53] Background forecast of glacial mudflows: methodological guide. Alma-Ata: Nauka, 1985. 61 p. (in Russ.)
- [54] Hegay A. Yu., Anishchenko A. P., Shusharin V. I. Mudflows in the Zailiysky and Dzhungarian Alatau (basins of the Issyk and Sarkan rivers) in 1982 // Problems of Mudflow Protection Measures. Alma-Ata: Kazakhstan, 1984. P. 231-236 (in Russ.)
- [55] Cherkasov P. A. Debris-mudflow in the Malaya Almatinka valley // Izvestiya of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR. Geological Series. Issue 16, No. 121. P. 118-120 (in Russ.)
- [56] Shatravin V. N., Stavitsky Ya. S. Methodological foundations for identifying mudflow-forming factors during detailed surveys of high-mountain lakes // Mudflows. No. 8. P. 83-92 (in Russ.)
- [57] Shusharin V. I., Popov N. V. Development of the mudflow in the Sredny Talgar River basin // Problems of Mudflow Protection Measures. Alma-Ata, 1981. P.153-157 (in Russ.)
- [58] Engels A. A., Beletsky A. Ya. Engineering-geological features of moraine lake No. 16 in the Kaskelen River basin // Mudflows. 1985. No. 9. P. 138-143 (in Russ.)
- [59] Akhmetkal R. Medeu, Nikolay V. Popov, Viktor P. Blagovechshenskiy, Maulken A. Askarova, Alikhan A. Medeu, Sandugash U. Ranova, Aidana Kamalbekova, Tobias Bolch. Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan // Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 229. 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev>

Н. В. Попов¹, С. У. Ранова², А. Н. Камалбекова^{*3}, Ү. Р. Алдаберген⁴, И. Б. Скоринцева⁵

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)

⁵ Г. ғ. д., бас ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; skorintseva@mail.ru)

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ СЕРПІНДІ ГЛЯЦИАЛДЫ СЕЛДЕРДІҢ ЗЕРТТЕУЛЕРІНЕ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ

Аннотация. Өткен ғасырдың екінші жартысында қазіргі мұзданудың деградациялануы нәтижесінде, Қазақстандағы гляциалды селдердің жандануы ғалымдардың назарын осы табиғи құбылысқа аударды. Сел апаттарының іздері бойынша жүргізілген көптеген зерттеулер осы қауіпті табиғи құбылыстардың көпшілігінің себебі мұздық көлдердің жарылуы екенін көрсетті. Осы шолудың негізгі мақсаты серпінді гляциалды сел зерттеулерінің антологиясын құру, ретроспективті, ситуациялық және объектілік талдаулар жүргізу болып табылады. Ситуациялық талдау хронологиялық тәртіпте құрылған апатты гляциалды сел түзілуіне әкелетін нақты жағдайларды қарастыруды қамтыды. Объектілік талдау әртүрлі зерттеу бағыттары бойынша жүргізілді, онда объектілер мұздық көлдердің генезисіне, олардың су режиміне, көл бөгеттерінің құрылымына, мұздық көлдердің серпілу механизмдеріне, болжамдарға және қоныстануға қарсы профилактикалық іс-шараларға тікелей қатысты зерттеу нәтижелерінің ғылыми жарияланымдары болды. Жер туралы ғылымдардың осы нақты саласындағы білімді қалыптастыруға және тереңдетуге түбегейлі әсер еткен зерттеулердің маңызды рөлі көрсетілген.

Түйінді сөздер: серпінді гляциалды сел, мұздық көлдер, мұзданудың деградациясы, қазіргі морена, зерттеулер, басылымдар.

N. V. Popov¹, S. U. Ranova², A. N. Kamalbekova^{*3}, U. R. Aldabergen⁴, I. B. Skorintseva⁵

¹ Candidate of geographical sciences, Chief Researcher (JSC "Institute of Geography and Water Security", Almaty, Kazakhstan; *popovn@mail.ru*)

² Candidate of geographical sciences, Head of the Laboratory of Natural Hazards (JSC "Institute of Geography and Water Security", Almaty, Kazakhstan; *sandu2004@mail.ru*)

^{3*} PhD student, junior researcher (Al-Farabi Kazakh national university, JSC "Institute of Geography and Water Security", Almaty, Kazakhstan; *aidana.kamalbekova@gmail.com*)

⁴ PhD student, junior researcher (Al-Farabi Kazakh national university, JSC "Institute of Geography and Water Security", Almaty, Kazakhstan; *aldabergen_u@mail.ru*)

⁵ Doctor of geographical sciences, Chief Researcher (JSC "Institute of Geography and Water Security", Almaty, Kazakhstan; *skorintseva@mail.ru*)

ANALYTICAL REVIEW OF RESEARCH ON GLACIAL LAKE OUTBURST FLOODS IN KAZAKHSTAN

Abstract. The intensification of glacial lake outburst floods (GLOFs) in Kazakhstan during the second half of the last century, against the backdrop of modern glacier degradation, has drawn significant attention from researchers to this natural phenomenon. Numerous surveys conducted in the aftermath of debris flow disasters have shown that the majority of these hazardous natural events were caused by the outbursts of glacial lakes. The primary aim of this review is to create an anthology of research on GLOFs through retrospective, situational and object-based analyses. The situational analysis considered specific events that led to catastrophic GLOFs, arranged in chronological order. The object-based analysis was carried out in various research directions, with the focus on scientific publications that directly addressed the genesis of glacial lakes, their water regimes, the structure of lake dams, the mechanisms of glacial lake outbursts, as well as forecasts and preventive measures against debris flows. The review highlights the significant role of research that has fundamentally contributed to the development and deepening of knowledge in this specific field of Earth sciences.

Keywords: glacial lake outburst floods (GLOFs), glacial lakes, glacier degradation, modern moraine, research, publications.