



## Risks of Glacial Lakes Under Climate Change

**Ibragimov B. T.**

*Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Engineering protection of the population and territories" Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Uzbekistan*

**Zhunsaliev D. M.**

*Senior Lecturer of the Department of "Engineering Protection of the Population and Territories" Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Uzbekistan*

**Abstract:** *Glacial lakes are characteristic landscape elements in mountains, comprising a variety of potential uses, but at the same time posing a potential risk to humans and infrastructure downstream. With the continued retreat of glaciers, new glacial lakes will form in glacierized mountain regions worldwide during the coming decades. A sustainable approach to deal with both the risks and opportunities provided by such lakes requires a long-term, integral planning, which considers besides geo-technical aspects also socio-economic factors and developments. This article discusses the impact of global climate change on the stability of mountain glaciers and lakes, the nature of natural hazards resulting from this change, as well as the relevance and prospects of studying mountain glaciers and lakes.*

**Keywords:** *risk, climate change, debris flows, ice dam break, mountain lakes, natural hazard.*

*Date of Submission: 25-4 -2022*

*Date of Acceptance: 28-5-2022*

**Введение.** В результате глобального отступления ледников в горных районах образовался много новых озёр. В мире насчитывается около 13.000 ледниковых озёр, с 1990 года их общий объем увеличился примерно вдвое и составил около 840 км<sup>3</sup>, при этом большая его часть распределяется на несколько очень крупных озер в малонаселенных районах Аляски и Канадской Арктике [12]. Горы Центральной Азии составляют порядка 20% ее территории и служат своеобразным хранилищем более 60% водных ресурсов в виде льда и снега и являются гарантом сохранения и восстановления ландшафтного и биологического разнообразия. На территории Центральной Азии насчитывается 5.600 озер общей площадью 12.197 км<sup>2</sup>, подавляющее большинство из которых расположены в горной части региона. Водные ресурсы средних и малых горных озер оцениваются в 51,1 км<sup>3</sup>, более 20 км<sup>3</sup> из которых – пресные [15]. Такие озера являются формообразующими элементами ландшафта, вызванные отступлением ледников, потеря привлекательности горных ландшафтов может компенсировать местами и следовательно, также представляют туристический интерес [1].

При соответствующих конструктивных мерах по плотинам и регулированию их также можно использовать для гидроэнергетики и водоснабжения в густонаселенных районах [3]. Когда речь идет о водоснабжении, основной проблемой является сезонная аккумулялирующая функция ледников: когда ледники отступают, уменьшает сток в период таяния -

вегетационный период в нижних государствах - и, таким образом, запас воды уменьшает в период максимального спроса, особенно в периоды засухи [6].

Ледниковые озера в высоких горах также могут извергаться, вызывая разрушительные приливные волны и селевые потоки. Прорывы ледниковых озер часто являются частью целой цепи процессов, которые часто начинаются с более крупных движений масс, например, в виде каменных или ледяных лавин. В крайних случаях, в зависимости от пускового процесса и объема вовлеченных масс обломка и воды, такие паводки могут достигать расстояния более 100 километров [2]. Таким образом, они представляют собой природную опасность в ледниковых регионах с большим радиусом действия, часто распространяясь на районы, относительно удаленные от ледниковых гор. Такие прорывы озер представляют опасность и риск для людей, и их инфраструктуры в пострадавших долинах [11].

Устойчивое управление озерами, образовавшимся в результате отступления ледников, требует раннего и целостного планирования, учитывающего все процессы, потребности и связанные с этим опасности [6].

Ледниковые озера могут быть классифицированы в зависимости от их расположения относительно ледника как окраинные, проледниковые, надледниковые или подледниковые озера. Они также часто классифицируются в зависимости от материала их дамб на моренные, каменные или ледяные озера (рис. 1).



Рис. 1. Формы озёрных котловин моренных и ледниковых озёр (Дергачёва, 2019)

Озера с моренными плотинами перекрыты конечными моренами или боковыми моренами, отложенными ледниками, когда они расширяются с течением времени, или когда более мелкие надледниковые озера с талой водой сливаются в более крупные озера на плоских, покрытых обломками ледника. Озера с каменными плотинами образуются, когда эрозионные силы оставляют глубокие впадины в ложе ледника, которые заполняются водой по мере отступления ледника. Озера с ледяной запрудой могут образовываться на краю ледника или в результате перекрытия ручья или реки по мере продвижения ледника [8].

### **Ледниковые озера как природная опасность.**

В результате глобального повышения температуры в динамичной горной среде формируются ледниковые озёра, в котором различные процессы и явления реагируют на климатические изменения в различных временных масштабах. Это развитие кумулятивно, оно всегда выводит за пределы прошлых условий. Поэтому оценки опасностей и рисков не могут основываться исключительно на историческом опыте, а должны основываться на вероятных сценариях развития. Как правило, численно моделируются различные процессы и их взаимодействия с возможными будущими изменениями ситуации [4, 5].

Извержения ледниковых озёр происходят либо при прорыве плотины озёр, либо при переполнении плотины нагонной волной. Моренные плотины потенциально неустойчивы из-за неравномерного гранулометрического состава, часто узкого поперечного сечения и крутых склонов, в основном лишенных растительности, с уклонами, близкими к критическому углу естественного откоса. Также существует вероятность того, что внутри морены, находится заброшенный массив мёртвого льда или плотина промерзла круглый год (вечная мерзлота) [9].

Деграция подземных льдов ослабляет устойчивость мореной дамбы и повышает его проницаемость. При извержении озера в подступающей морене часто образуется глубокая брешь. Различные процессы могут иметь место и быть связаны друг с другом. В мореном, материале с его переменной проницаемостью образуют гидравлические градиенты, по которым вода течет с ускоренной скоростью и все больше вымывает мелкий материал. Такой само усиления эффект (обвязка) может ослабить мореную дамбу внутри и сделать ее проницаемой. Регрессивная эрозия снаружи или у подножия морены приводит к все более крутому до критического профиля поперечного сечения. Наконец, повышенный уровень озера из-за обильных постоянных осадков, извержения вышележащего озера или в результате массового таяния снега и льда может привести к повышенному стоку в отводящем канале мореной плотины. Таким образом, дренажный канал оттекающей воды может все глубже и глубже врезаться в морену из-за усиления эрозии, что, в свою очередь, увеличивает отток и еще больше усиливает эрозию [8]. В результате этого само укрепляющегося процесса канал постепенно углубляется в морену, все более крутые боковые стенки пролома разрушаются, а разрез в морене расширяется до заметного пролома. Этот процесс замедляется только тогда, когда крупные глыбы с обрушающихся боковых откосов концентрируются у русла канала и замедляют эрозию, если канал разрушился до основания или если уровень озера упал настолько, что процесс оттока останавливается. Образование прорыва необратимо повредит мореную дамбу. Таким образом, извержения озёр, подпруженных мореными запрудами, являются почти исключительно разовыми событиями, которые не могут повторяться в той же форме [11].

В крайнем случае, запруженных льдом озёр может произойти внезапный механический разрыв, что приводит к чрезвычайно резким значениям сброса. Особенно при сильно фрагментированных ледяных запрудах, например, отложения ледяных лавин или нагонов ледников, возможны механические разрушения дамб. Внезапные прорывы плотин вызывают резкие пики расхода, которые часто без предупреждения обрушиваются на долину в виде приливной волны. Озера, подпруженные массивным ледниковым льдом, обычно извергаются в результате прогрессирующих гидравлических процессов в дренажных каналах на ложе ледника. Такие каналы являются частью обычной дренажной системы ледников. Однако они не становятся открытыми для прорыва ледяной плотины до тех пор, пока уровень озера не поднимется выше уровня давления воды в каналах ледяной плотины. Это происходит самое позднее, когда давление воды в озере достигает плавающего равновесия льда (90% толщины льда) и поднимает ледяную запруду [5].

В отличие от моренных и ледяных дамб каменные дамы ледниковых озёр можно считать устойчивыми (рис. 2). Тем не менее, опасные и далеко идущие приливные волны могут

возникать и в озерах, перекрытых скальным уступом, а именно, когда внезапный толчок вызывается падением большей массы, например, каменной или ледяной лавины, стремительного оползня или селевой поток с возвышенностей в озере вызывает нагонную волну. Весь водяной столб, вплоть до дна озера может прийти в движение, вызывая экстремальные набеги на берег, подобные цунами. Известны случаи, когда такие волны смещения накапливались в ледниковых озерах на контр склонах (например, склонах долин, моренах) высотой более 100 метров. Следовательно, в зависимости от высоты надводного борта, то есть разница высот между уровнем озера и гребень плотины, может произойти разлив родом из озера. Как правило, в таком случае водоем неоднократно плещется туда-сюда. В зависимости от ситуации плотина также может быть затоплена несколько раз подряд. Этот механизм извержения не ограничивается только озерами с каменными плотинами, но также наблюдался в озерах с мореными плотинами или ледяными дамбами [6].



Рис. 2. Формы озёрных котловин завальных озёр (Дергачёва, 2019)

Прорывы ледниковых озера могут вызвать разрушительные наводнения дальнего действия. Такие паводки состоят из смеси воды и материала от мелкозернистого до крупнозернистого, в котором можно перевозить даже блоки размером с дом. Состав зависит от объема сыпи, максимальный расход, наличие щебня и рыхлого материала, топография русла и, следовательно, скорость потока. В зависимости от ситуации извержению озера соответствует крупнозернистый или мелкозернистый селевой поток, поток грязи или внезапный паводок. В английском языке термин GLOF (Glacial Lake Outburst Flood) используется как собирательный термин для различных типов движения жидкой массы при прорывах озера. Как правило, прорыв озера нельзя отнести к какому-либо конкретному типу движения массы, скорее приливная волна подвергается постоянному преобразованию из одного типа потока в другой. Непосредственно у плотины в паводке обычно преобладают воды с большой транспортной емкостью. Много материала часто мобилизуется непосредственно под плотиной. Как только уклон русла и, следовательно, скорость потока уменьшаются, происходит отложение крупно глыбистого материала, а паводковая масса трансформируется в грязевой поток, который в основном транспортируется мелкозернистый материал. Там, где ниже по течению, уклон снова увеличивается, рыхлый материал снова подвергается эрозии,

и тип течения обнажения снова меняется. Высокие скорости течения, большие расстояния и зачастую огромное количество щебня придают озерным прорывам большую разрушительную силу. В дополнение к прямому механическому повреждению инфраструктуры в зоне затопления частым последствием является чрезмерное засыпание (наносы на русло) и, как следствие, потеря сельскохозяйственных угодий [4].

Глобальный анализ извержений морено-подпрудных ледниковых озер показал, что с 1930-х до середины 1970-х гг. наблюдался рост озерных извержений, после чего частота извержений морено-подпрудных озер вновь имела тенденцию к снижению. Увеличение числа извержений с 1930 года считается отсроченной реакцией на отступление ледников после окончания малого ледникового периода в середине XIX века. Причинами снижения частоты извержений в 1970-е гг. может быть то, что, во-первых, ряд озер необратимо осушались, во-вторых, по мере отступления ледника образовывалось меньше новых морено-подпрудных озер и, в-третьих, в населенных горных районах проводились успешные меры безопасности. В исследовании также предполагается, что прорывы ледниковых озер снова будут увеличиваться в XXI и XXII веках [8].

### **Ледниковые озера как фактор риска в горах**

Для оценки и снижения рисков от прорывов ледниковых озер анализируются компоненты потенциальной опасности, подверженности и уязвимости людей и инфраструктуры (Рис. 3). Ледниковые озера, образующиеся в результате отступления ледников, представляют собой принципиально новые возможные источники опасности и зачастую значительно увеличивают локальный и региональный потенциал риска. Где и когда новые озера, какого размера и на каком расстоянии от опасных склонов могут возникнуть в будущем, теперь можно реалистично смоделировать, хотя и с уточнением неопределенностей [10]. Предрасположенность озера к извержению должна оцениваться при комплексном анализе всей системы. Он зависит не только от различных свойств озера, таких как тип плотины (геометрия, состав) и надводный борт, но также зависит от условий и процессов в окрестностях озера, таких как контакт с ледниками, устойчивость ледовых и горных массивов над озером, геологические и термические условия подземной части озера, а также влияние рельефа [2]. Моделирование сложных цепочек процессов, запускаемых нагонными волнами и приливными волнами, для пространственной оценки потенциальной опасности в последние годы достигло больших успехов. Используются интерактивно управляемые цепочки моделей [4]. Участвующие объемы и вероятности возникновения не могут быть точно определены эмпирически, особенно в случае разовых процессов, таких как камнепады, и поэтому должны учитываться с помощью анализа чувствительности с вероятными сценариями.

Пространственно смоделированные опасные зоны от потенциальных прорывов ледниковых озер можно использовать для оценки того, находятся ли люди, инфраструктура, природные ресурсы и другие средства к существованию в потенциально пострадавших районах. Задействованные объемы и вероятность возникновения особенно в случае разовых процессов, такие как камнепады, не могут быть точно определены эмпирически и, следовательно, должны использовать анализы чувствительности учитываются возможные сценарии [7]. Использование пространственно смоделированных опасных зон потенциальные извержения ледниковых озер могут быть оценены, будь то люди, инфраструктура, природные ресурсы и другие средства к существованию расположены в потенциально пострадавших районах (воздействие), и насколько они (уязвимы) устойчивы в физическом, экономическом, социальном, политическом или институциональном плане. Во многих горных регионах мира воздействие увеличилось в 20-м и 21-м веках из-за увеличения заселения горных районов и связанного с этим развития и расширения инфраструктуры, такой как транспортные магистрали, линии электропередач, туристические объекты, электростанции и, вероятно, продолжать увеличиваться. В развивающихся странах горные

районы часто страдают от бедности выше среднего, часто также имеют слабую в экономическом и политическом отношении структуру и, соответственно, уязвимы для стихийных бедствий, таких как прорывы ледниковых озер [9].

Опасность, незащищенность и уязвимость также принимаются во внимание для разработки эффективных стратегий по снижению риска и максимальному предотвращению ущерба и гибели людей и имущества в случае морских вспышек (Рис. 3). Соответствующие меры также могут быть классифицированы в соответствии с этими тремя элементами и часто сочетаются с преимуществами в конкретных случаях [1].

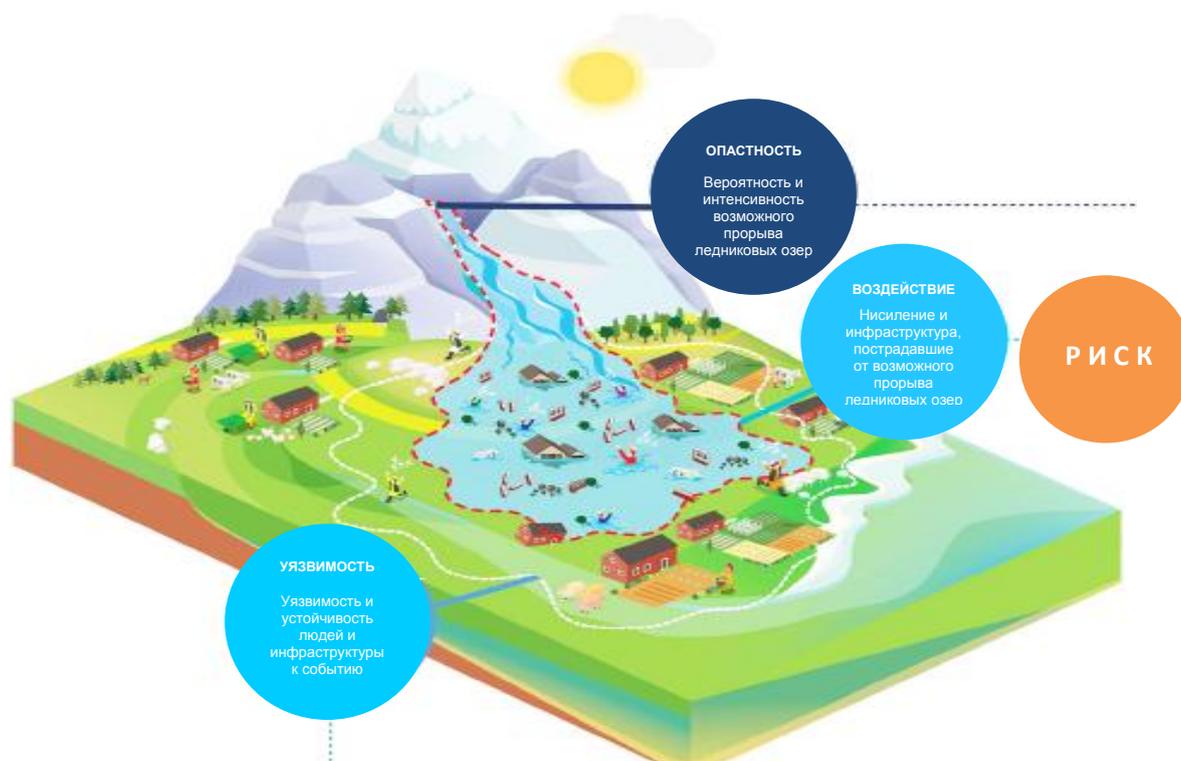


Рис. 3. Составляющие риска на примере извержения ледниковых озер (Allen, 2018)

### Будущие перспективы

Из-за изменения климата высокогорные ландшафты коренным образом и необратимо изменятся для многих будущих поколений в ближайшие десятилетия. Наиболее очевидным является продолжающееся отступление и потеря ледников. В Тянь-Шань, например, даже при оптимистичных сценариях осталось чуть более трети объема ледника, который существует до сих пор [13]. Даже больших долинных ледников, какими мы их знаем сегодня, в конце 21 века больше не будет.

С исчезновением ледников в холодных горах сформируются многочисленные более мелкие и более крупные ледниковые озера. Устойчивая стратегия борьбы с этим явлением должна быть направлена на максимально возможное сочетание и оптимизацию защиты и использования. С точки зрения использования различные цели, такие как водоснабжение, производство энергии или туризм, должны быть согласованы и адаптированы к требованиям защиты от наводнений [10].

При этом необходимо предвидеть и понимать очень сложные сетевые системы в природе, которые изменяются далеко за пределами историко-эмпирической базы знаний и в долгосрочной перспективе удаляются от равновесных состояний. Например, темпы потери льда на постоянно промерзших и недавно ускорившихся осыпных склонах и каменных глетчерах примерно в 10-100 раз меньше, чем у ледникового льда, подвергающегося непосредственному воздействию нагревающейся атмосферы. Таким образом, термически

сильно нарушенная, медленно тающая вечная мерзлота будет существовать на многих горных склонах в непосредственной близости от новых озер еще долго после того, как исчезнут ледники. Возможно, самой большой научной, практической и политической проблемой является растущий потенциал для больших и быстрых массовых перемещений с образованием слайней и приливных волн в новых озерах непосредственно у подножия ледяных обрывов [7]. В результате глобального потепления в XX веке тепловые аномалии (инверсия теплового потока) уже проникли более чем на 50 м вглубь вечной мерзлоты и, согласно законам распространения тепла под землей, будут медленно, но неумолимо продолжать нарастать и проникнуть внутрь гор. Особенно отрицательно сказывается на устойчивости крутых откосов при наступлении воды в ранее мерзлых участках горных пород. В том же направлении действует сброс давления на боковых склонах долины за счет отступления ледников [6].

**Заключения.** Возникновение серьезных событий с большим ущербом для людей и имущества, вероятно, является лишь вопросом времени без целенаправленных мер. Перспективные проекты могут быть такие, как многоцелевые удерживающие дамбы, сочетающие аспекты гидроэнергетики, водоснабжения и защиты от наводнений. Однако такие проекты обходятся дорого не только с точки зрения логистики и финансов, но и с точки зрения их общественного признания и воздействия на ландшафт. Раннее, интегративное и совместное планирование является повесткой дня.

#### **Литературы:**

1. ALLEN, S. K., J. BALLESTEROS-CANOVAS, S. S. RANDHAWA et al. (2018): Translating the concept of climate risk into an assessment framework to inform adaptation planning: Insights from a pilot study of flood risk in Himachal Pradesh, Northern India. *Environmental Science & Policy* 87: 1-10. doi: 10.1016/j.envsci.2018.05.013.
2. EMMER, A. & V. VILÍMEK (2014): New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 3461–3479. doi:10.5194/hess-18-3461-2014.
3. FARINOTTI, D., V. ROUND, M. HUSS et al. (2019): Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature* 75, 341-344. doi.org/10.1038/s41586-019-1740-z.
4. FREY, H., C. HUGGEL, R. E. CHISOLM et al. (2018): Multi-source glacial lake outburst flood hazard assessment and mapping for Huaraz, Cordillera Blanca, Peru. *Frontiers in Earth Science* 6: doi:10.3389/feart.2018.00210.
5. GAPHAZ (2017): Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions – Technical Guidance Document. Prepared by Allen, S., H. Frey, C. Huggel et al. Standing Group on Glacier and Permafrost Hazards in Mountains (GAPHAZ) of the International Association of Cryospheric Sciences (IACS) and the International Permafrost Association (IPA). Zurich, Switzerland/Lima, Peru, 72 pp. [http://gaphaz.org/files/Assessment\\_Glacier\\_Permafrost\\_Hazards\\_Mountain\\_Regions.pdf](http://gaphaz.org/files/Assessment_Glacier_Permafrost_Hazards_Mountain_Regions.pdf) (Zugriff Februar 2020).
6. HAEBERLI, W., M. BUETLER, C. HUGGEL et al. (2016): New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. *Climatic Change*. doi: 10.1007/s10584-016-1771-5.
7. HAEBERLI, W., Y. SCHAUB & C. HUGGEL (2017): Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in deglaciating mountain ranges. *Geomorphology* 293: 405-417. doi 10.1016/j.geomorph.2016.02.009.

8. HARRISON, S., J. S. KARGEL, C. HUGGEL et al. (2018): Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere* 12 : 1195-1209. doi: 10.5194/tc-12-1195-2018-supplement.
9. IPCC (2019): Summary for Policymakers. In: Pörtner, H.- O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte et al. (eds.). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
10. MAGNIN, F., W. HAEBERLI, A. LINSBAUER et al. (2020): Estimating glacier-bed overdeepenings as possible sites of future lakes in the de-glaciating Mont Blanc massif (Western European Alps). *Geomorphology* 350 : 106913. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106913.
11. PORTOCARRERO, C. (2014): The Glacial Lake Handbook – Reducing Risk from Dangerous Glacial Lakes in the Cordillera Blanca, Peru. USAID, Washington D.C.
12. SHUGAR, D., A. BURR, U. HARITASHYA et al. (2019): Where are the world’s glacial lakes and how big are they? *Geophysical Research Abstracts* 21: EGU2019-6153.
13. ZEKOLLARI, H., M. HUSS & D. FARINOTTI (2019): Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere* 13, 1125–1146. doi.org/10.5194/tc- 13-1125-2019.
14. Дергачёва И.В. (2019): Прорывоопасные озера Узбекистана: генезис, морфометрия и территориальное распространение. Научно-исследовательском гидрометеорологическом институт. Ташкент, с. 80-83.
15. Бузруков Д.Д., Ботуров К.Б. (2006): Оценочные доклады по приоритетным экологическим проблемам в Центральной Азии, Международный фонд спасение Арала. Ашхабад, с. 55-56.