

Эволюция ледниково-озёрного комплекса Петрова (Тянь-Шань) и оценка риска его прорывоопасности

© 2013 г. И.А. Торгоев¹, Ю.Г. Алёшин¹, С.А. Ерохин²

¹Институт геомеханики и освоения недр Национальной Академии наук Киргизской Республики, Бишкек;

²Госгеолагентство Киргизской Республики, Бишкек

geopribor@mail.ru

Статья принята к печати 17 декабря 2012 г.

Ледник, ледниково-моренное озеро, прорыв ледникового озера.
Glacier, glacier lake, outburst flood.

Рассматривается ледниково-моренно-озёрный комплекс Петрова в верховье р. Нарын (Тянь-Шань, Киргизия). Из-за ощутимого потепления климата высокогорья и вызванного им отступления ледника существенно увеличиваются размер и объём оз. Петрова, что повышает риск прорыва ледниково-моренной плотины озера. Это весьма опасно для расположенных ниже объектов хвостохранилища рудника Кумтор. Вероятность прорыва оз. Петрова и его последствий основывается на многофакторном анализе для наиболее опасных сценариев – возникновения внутриморенного канала стока и трансформации волны прорыва в селевой поток.

Ледниково-моренно-озёрный комплекс Петрова

Ледниково-моренно-озёрный комплекс Петрова находится на северо-западном макросклоне ледникового массива Ак-Шыйрак в Центральном Тянь-Шане (рис. 1). Ледник Петрова – крупнейший в бассейне р. Нарын (Сырдарья). В настоящее время площадь ледника составляет 69,8 км², а длина превышает 23 км [2, 6]. Озеро у конца ледника Петрова привлекло к себе внимание в последнее десятилетие в связи с крупномасштабным техногенным освоением района, связанным с разработкой золоторудного месторождения Кумтор. Это внимание особенно усилилось в связи со строительством и эксплуатацией огромного по объёму ($V > 100$ млн м³) хвостохранилища, очистных сооружений, пульпопровода и других объектов инфраструктуры рудника, размещённых в долине р. Кумтор.

Оз. Петрова – самое крупное по площади и объёму воды моренно-ледниковое озеро Тянь-Шаня, которое служит главным источником водоснабжения высокогорного рудника Кумтор. В 1994 г. при разработке проекта эксплуатации этого золоторудного месторождения была выполнена батиметрическая съёмка акватории озера. Площадь озера составляла 2,784 км², максимальная измеренная глубина – 24 м, средняя глубина – 8,3 м, объём – 23,1 млн м³. Согласно историческим сведениям [5], озеро начало формироваться в конце XIX – начале XX вв. в обширной внутриморенной депрессии (котловине «выпахивания») в результате отрыва ледника Петрова от внутреннего края последней по возрасту морены и его последующего постепенного отступления. В 1990–2009 гг. средняя

скорость отступления ледника составляла 46 м/год. В табл. 1 приводятся данные об основных морфометрических и гидрологических характеристиках озера по основе геодезических и батиметрических измерений 2006 и 2009 гг. [3, 8], а также мониторинга, который ведёт «Кумтор Оперейтинг Компани» [10].

По результатам дешифрирования аэро- и космоснимков установлено, что с 1957 по 2009 г. площадь озера увеличилась более чем в 4 раза (с 0,96 до 4,033 км²). Вместе с ростом площади вырос и объём воды в озере, причём этот рост по темпам опережает увеличение площади акватории, что объясняется существенным ростом максимальной глубины озера в его северо-восточной части – 69,3 м [8]. Из табл. 1 следует, что за 2006–2009 гг. среднегодовой прирост объёма воды в озере составил 1,8 млн м³/год. На протяжении последних двух десятилетий повышаются как скорости роста площади, так и объёма воды в озере [6, 8]. Дальнейшее накопление воды приведёт к увеличению напора на путях её фильтрации (установлено геофизическими методами), что может вызвать повышение фильтрационных расходов, усиление протаивания путей фильтрации и окружающих мёрзлых грунтов и в результате – нарастание угрозы внутриморенного прорыва. Озеро питается талыми водами, стекающими с мощного сложно-долинного ледника Петрова (см. рис. 1). Объём стока с ледника составляет 119 млн м³/год, или 3,7 м³/с [6]. Отток воды, поступающей в озеро с ледника, обеспечивается за счёт поверхностного стока по руслу р. Кумтор (исток р. Большой Нарын), которая вытекает из северо-западной части озера. По данным наблюдений на гидрологическом посту

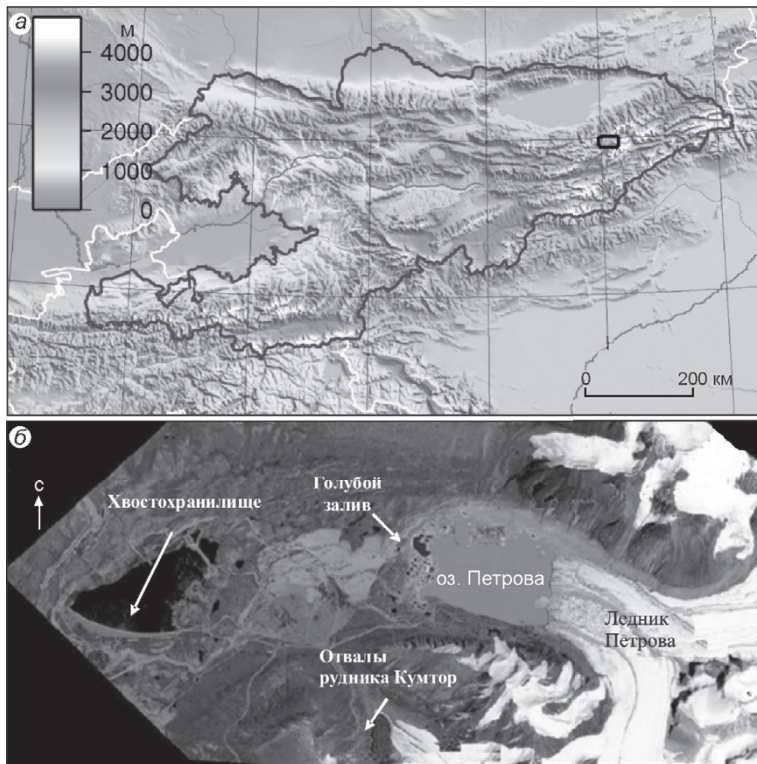


Рис. 1. Карта территории Кыргызстана (а) и космоснимок района ледниково-моренно-озёрного комплекса Петрова (б) с указанием местоположения основных объектов высокогорного рудника Кумтор
Fig. 1. Map of Kyrgyzstan (a) and satellite image area of glacial moraine-lake complex Petrova (b) showing the location of the main objects of alpine Kumtor gold mine

ГМС Тянь-Шань, наибольший расход р. Кумтор равен 66,2 м³/с (1943 г.), средние расходы с июня по сентябрь колеблются от 2,9 до 25,2 м³/с [6].

Характеристика рассматриваемого моренно-ледникового комплекса дана в монографии Л.Г. Бондарева [2], который ещё в 1963 г. показал, что естественная моренная

Таблица 1. Основные морфометрические и гидрологические характеристики оз. Петрова

Показатели	2006 г.	2009 г.
Высотная отметка уреза воды, м над ур. моря:		
	максимальная	3734,27
минимальная	3732,65	3732,40
Сезонная амплитуда колебаний уровней озера, м	1,62	1,36
Длина озера, м	2680	2885
Ширина, м	1880	1880
Длина береговой линии, м	17030	17950
Площадь зеркала, км ²	3,905	4,033
Объём воды, млн м ³	60,309	65,718
Средняя глубина, м	15,4	16,3
Максимальная измеренная глубина, м	24 (1996)	69,3
Годовое количество атмосферных осадков, мм	280	374
Максимальный расход воды в р. Кумтор – гидропост КОК, м ³ /с	27,5	11,23
Годовой сток р. Кумтор, млн м ³	Нет свед.	55
Рассчитанный общий приток воды в озеро, млн м ³	Нет свед.	44,98
Объём воды, забираемый для нужд рудника Кумтор, млн м ³	5,7	6,0

дуга (разновозрастная морена напора), подпруживающая оз. Петрова (рис. 2), состоит из мёрзлых моренных отложений с включениями валунов скальных пород, а также погребённого льда разных размеров и конфигурации. Именно присутствие в морене погребённого льда и интенсивное развитие термокарстовых и термопросадочных процессов определяют состояние и структуру моренной плотины, которые отличаются исклю-

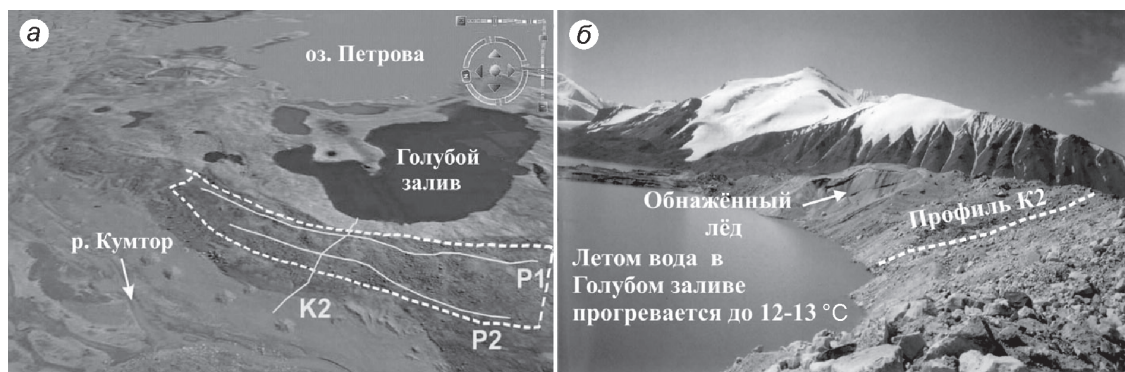


Рис. 2. Общий вид участка моренно-ледниковой плотины у Голубого залива с обозначением геофизических профилей на внешнем (а) и внутреннем (б) откосах
Fig. 2. General view of a moraine dam on the site of the Blue Bay with the indication of geophysical profiles at the outer (a) and internal (b) the slopes

чительной изменчивостью, обуславливая возможность прорыва оз. Петрова как поверхностным, так и подземным путём. Поверхностный прорыв озера вероятен за счёт пропиливания и углубления имеющегося в теле плотины прорана, через который из озера вытекает р. Кумтор. В 1998 г. мы смоделировали сценарий развития событий при поверхностном прорыве озера по существующему руслу р. Кумтор для случая с расходом прорывного паводка до $400 \text{ м}^3/\text{с}$. Оценка зоны поражения прилегающей к оз. Петрова территории рудника [6] показала, что прорывной поток будет паводковым и сосредоточится вдоль русла р. Кумтор, расширяясь (до 260 м) на отдельных участках выполаживания и сужаясь на узких участках днища долины. Расчёт характеристик паводкового поражения при существующей в то время геоморфологии участка показал, что прорывной поток не угрожает хвостохранилищу рудника Кумтор. В зону паводкового поражения попадают лишь автомобильный мост и акведук сбросного пульпопровода фабрики [6].

Таким образом, при поверхностном прорыве оз. Петрова катастрофических последствий воздействия волны прорыва на хвостохранилище не ожидается. Однако в будущем, при наращивании объёма селевых и терригенных отложений на конусе выноса ручьёв, стекающих с ледника Лысый, где сформированы отвалы горных пород, ситуация может измениться (см. рис. 1). В настоящее время наиболее опасный сценарий – вариант внутриморенного (подземного) внезапного прорыва оз. Петрова с трансформацией гидродинамической волны прорыва в разрушительный селевой поток. В этом отношении наиболее уязвимое звено моренной плотины – её самый узкий участок с западной стороны Голубого залива (см. рис. 2).

Результаты геофизического изучения прорывоопасного участка плотины оз. Петрова

В пределах водоудерживающей моренно-ледниковой плотины оз. Петрова активно протекают термокарстовые процессы. В 2009 г. на поверхности плотины насчитывалось 29 термокарстовых озёр, ослабляющих стабильность плотины. Самое большое из них – Голубой залив, который глубоко врежется в среднюю часть плотины (см. рис. 2), значительно снижая её фильтрационную и сейсмическую устойчивость. Сопоставление аэрофото- и космоснимков за 1947–2008 гг. показывает, что площадь залива увеличивалась при его слиянии с более мелкими термокарстовыми воронками. В 2009 г. объём воды в Голубом заливе составлял 750 тыс. м^3 , максимальная измеренная глубина – 22 м, средняя глубина – 8,6 м [8]. Особую озабоченность вызывает узкий участок водоудерживающей плотины в крайней западной

части залива (см. рис. 2, б). Здесь озеро от нижележащих участков зандрового поля удерживает лишь узкий (3–4 м по гребню) вал с крутыми ($30\text{--}35^\circ$) откосами. Особенной крутизной ($35\text{--}36^\circ$) отличается внутренний откос плотинной перемычки, спадающий в залив (см. рис. 2, б). Высота гребня плотинной перемычки на этом наиболее уязвимом участке плотины над урезом Голубого залива в 2006 г. составляла всего 11 м. В сентябре 2007 г. на внутреннем откосе, обращённом к заливу, примерно на 30-метровом участке вблизи профиля К2 обнаружен оползень. Мощность оползших мелко-обломочных отложений достигала 1,2–1,5 м. В результате оползания на нескольких участках обнажился погребённый лёд (см. рис. 2, б), что доказывает интенсификацию термокарстовых и деградационных процессов в теле плотины.

Для изучения внутреннего строения этого участка моренно-ледниковой плотины группа геофизиков из разных стран выполнила в 2005–2006 гг. большой комплекс исследований, который включал в себя вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), электропрофилирование (ЭП), метод естественного электрического поля (ЕП), георадиолокационное зондирование (георадар), методы дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) и гравиметрии [7, 8]. ВЭЗ применялось нами в варианте резистивной томографии (РТ). План-схема взаимного расположения продольных (P1, P2) и поперечного (K2) профилей ВЭЗ приведен на рис. 2. С помощью электроразведочных работ исследовалось внутреннее строение моренных отложений, включая оконтуривание границ погребённого льда и определение мощности активного сезонно-талого слоя (СТС).

На рис. 3 даны томограммы электрических сопротивлений вдоль взаимно пересекающихся профилей P1 и K2, полученные методом РТ и характеризующие геоэлектрический разрез моренных отложений на глубину до 50 м от поверхности. Результаты ВЭЗ подтвердили наличие погребённого льда в рассматриваемой части плотины, о чём свидетельствуют аномально высокие значения удельных электрических сопротивлений. Во многих случаях их значения оказались выше $100 \text{ кОм}\cdot\text{м}$, а величина кажущегося сопротивления часто превышала $500 \text{ кОм}\cdot\text{м}$. Большие значения удельных сопротивлений, полученные вдоль профиля P1 в верхней (пригребневой) части морены, указывают на наличие блоков с повышенным содержанием льда, мощностью до 20 м (см. рис. 3, а). Погребённый лёд перекрыт слоем скальных обломков и рыхлых флювиогляциальных отложений, мощностью от 2 до 5 м. По мнению Л.Г. Бондарева [2], наличие в пригребневой части плотины песчаных флювиогляциальных отложений связано с тем, что «мы имеем дело с мореной напора, возникшей при последнем наступлении

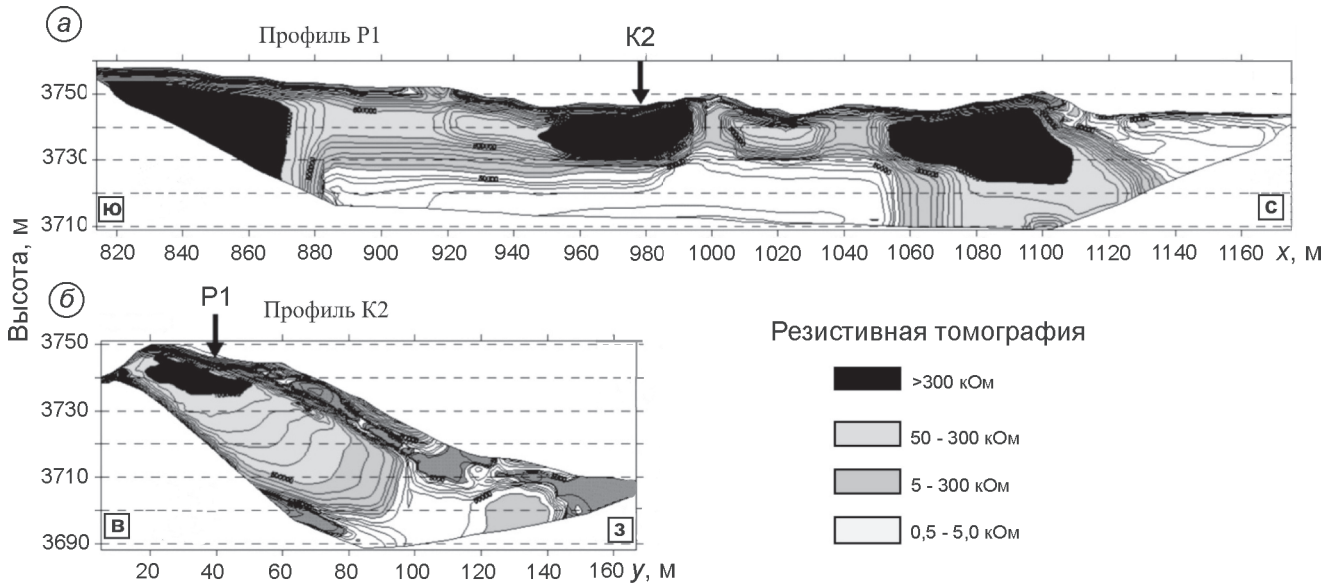


Рис. 3. Геоэлектрические томограммы прорывоопасного участка плотины у Голубого залива вдоль взаимно-пересекающихся профилей P1 (а) и K2 (б) демонстрируют наличие в морене включений погребённого ледникового льда (чёрный цвет) с очень высоким электрическим сопротивлением

Fig. 3. Geoelectric tomograms of narrow part of the moraine dam at the Blue Bay along the profiles P1 (a) and K2 (б) show the presence of inclusions buried in the moraine glacier ice (black) with a very high electrical resistance

ледника, который сдвинул флювиогляциальные отложения лежавшего перед ним зандрового поля и надвинул их на старую моренную дугу». Присутствие песчаных, мелкозёмистых и мелкообломочных отложений на участке возможного прорана может способствовать трансформации гидродинамической волны прорыва в селевой поток.

Погребённый лёд вдоль оси плотины неоднороден: в интервалах профиля 950–990 и 1055–1110 м, интерпретируемых как блоки со значительным содержанием льда, наблюдаются наиболее высокие значения сопротивлений – выше 300 кОм. На рис. 3, а видно, что эти блоки ледникового льда перемежаются с участками засорённого льда, которые характеризуются меньшим удельным сопротивлением (50–100 кОм). Наличие перемежающихся зон погребённого ледника с разным содержанием льда, скорее всего, связано с раздробленностью ледникового языка, свойственной конечным частям ледников этого района. Наиболее низкие содержания льда и многочисленные признаки нарушения сплошного ледяного ядра в гребневой части моренной плотины наблюдаются на самом узком участке, между отметками 1000–1060 м. О наличии нарушений (трещиноватости) ледяного ядра свидетельствуют локальные аномалии, полученные методом ДЭМП чешскими геофизиками на профиле P1 между отметками 1000–1045 м [8]. Участки засорённого льда, особенно на отрезках профилей 920–950 и 1010–1030 м, относятся к зонам активных деформаций и термопросадок. Все

эти особенности строения плотины показывают, что на отрезке 1000–1045 м сплошное строение погребённого ледника, имеющего меньшую мощность и пониженное содержание льда, вероятно, нарушено трещиной типа сквозного талика.

На поперечном разрезе K2 (см. рис. 3, б) можно выделить два ядра с высоким содержанием льда. Первое ядро, мощностью около 20–30 м и шириной около 80 м (интервал 0–80 м на профиле K2), представляет собой погребённый лёд последней (третьей) осцилляции ледника Петрова и находится в гребневой части плотины. Кровля этого ледяного ядра практически обнажается на внутреннем откосе морены, на отрезке 7–20 м (см. рис. 3, б), у самого уреза воды Голубого залива (см. рис. 2, б). Отметим, что на данном участке происходит активное таяние льда, которое сопровождается оползанием покровных мелкообломочных и флювиогляциальных отложений (2007 г.) и постепенным сокращением ширины гребня плотины. Причины этих процессов – сильное отепляющее действие воды, которая в летнее время в Голубом заливе прогревается до 12–13 °С. Второе ядро обнаружено на внешнем откосе плотины, вблизи её подножия, в интервале 120–150 м (см. рис. 3, б). Мощность и ширина ледяного блока в данной зоне составляют около 30 м. С помощью комплекса геофизических методов ниже зон просадки и протаивания, в районе пересечения профилей K2 и P2, также чешскими геофизиками в результате режимных измерений в 2005–2006 гг.

Таблица 2. Эмпирическая система балльной оценки прорывоопасности ледниково-моренных озёр [10]

Критерии	Оценка, баллы			
	0	10	30	50
1. Тип плотины	Скальная	Морена без льда	Морена с включениями льда	Ледяная
2. Объём озера, млн м ³	< 0,1	1–10	10–50	< 50
3. Высота низшей точки плотины над урезом воды в озере, м	> 10	5–10	1–5	< 1
4. Отношение ширины плотины к её высоте	> 0,5	0,3–0,5	< 0,3	< 0,1
5. Характер стока через плотину	Сток по руслу с отмошкой	Сток по дренажной системе	Фильтрация через морену	Сток отсутствует
6. Риск откалывания ледника	Нет	Малый	Средний	Большой
7. Риск ледопадов или скальных оползней	Нет	Малый		

установлено снижение значений удельных электрических сопротивлений, что может быть признаком активного и ускоренного таяния льда, которое началось в 2006 г. и сопровождается формированием трасс инфильтрации воды [8].

Все перечисленные особенности строения плотины показывают, что рассматриваемый участок плотины характеризуется значительной неоднородностью, нарушением и таянием ледяного ядра, которые сопровождаются процессами деформации, термопросадками, зарождением трасс инфильтрации, уменьшением высоты и ширины гребня над урезом воды. В настоящее время это – самое нестабильное и прорывоопасное звено моренно-ледникового вала, подпруживающего оз. Петрова.

Оценка вероятности прорыва оз. Петрова

Одна из главных задач изучения и мониторинга ледниково-моренных озёр – их ранжирование по степени прорывной опасности. Для этого используется метод многофакторной балльной оценки, в котором вероятность прорыва каждого конкретного озера представляет собой функцию совокупности параметров устойчивости плотины и результата воздействия внешнего триггера или иными словами – спускового механизма прорыва [9]. Модифицированный, с учётом специфики Тянь-Шаня, алгоритм оценки вероятности прорыва по этому методу содержит ряд эмпирически выведенных критериев, влияющих на величину и вероятность прорыва (табл. 2). Так, согласно критериям табл. 2, озеро, плотина которого сложена скальными породами, будет иметь оценку в 0 баллов по параметру № 1, а если плотина представляет собой морену с включениями льда, как это имеет место для оз. Петрова, то оценка по этому параметру составит 30 баллов. Конкретные значения параметров для оз. Петрова, полученные с учётом результатов геофизических исследований и батиметрической съёмки, выделены в табл. 2 серым фоном. Аналогичным способом оценивает-

ся каждый параметр, а затем путём суммирования подсчитывается общая рейтинговая оценка. Чем выше сумма баллов, тем больше вероятность прорыва. Затем полученная сумма сравнивается со значениями эмпирической шкалы потенциальной опасности, приведёнными ниже [10] (звёздочкой отмечена вероятность прорыва в любое время).

Оценки, баллы	Вероятность прорыва
0	Нулевая
50	Минимальная
100	Средняя*
125	Высокая*
150 и более	Очень высокая*

Эти данные показывают, что если суммарная оценка составляет 100 баллов, как это имеет место в настоящее время для оз. Петрова, то вероятность прорыва оценивается как средняя. В случае более 100 баллов прорыв возможен в любое время. В рассмотренный алгоритм оценки вероятности прорыва авторы работ [4, 9] внесли усовершенствования, касающиеся учёта возможных триггерных механизмов прорыва. Внешними триггерами могут служить сильные землетрясения, аномальные атмосферные осадки, внезапные прорывы внутрiledниковых полостей ледника Петрова, волны от ледяных лавин и в результате откола крупных айсбергов, которые могут вызвать поверхностный перелив воды и размыв морены. С учётом всех перечисленных факторов и возможных триггерных механизмов вероятность самопроизвольного разрушения моренно-ледниковой плотины оз. Петрова пока (на конец 2012 г.) можно оценить как среднюю. Однако следует иметь в виду её постоянное возрастание, вызванное ростом объёма воды в озере и его соединением с Голубым заливом летом 2012 г. Одновременно с этим отмечаются термокарстовые просадки и активная деградация погребённого льда в теле плотины, которые зарегистрированы в процессе геофизического мониторинга по просадкам поверхности на участке плотинной перемычки. Всё это, при сохранении современных темпов потепления

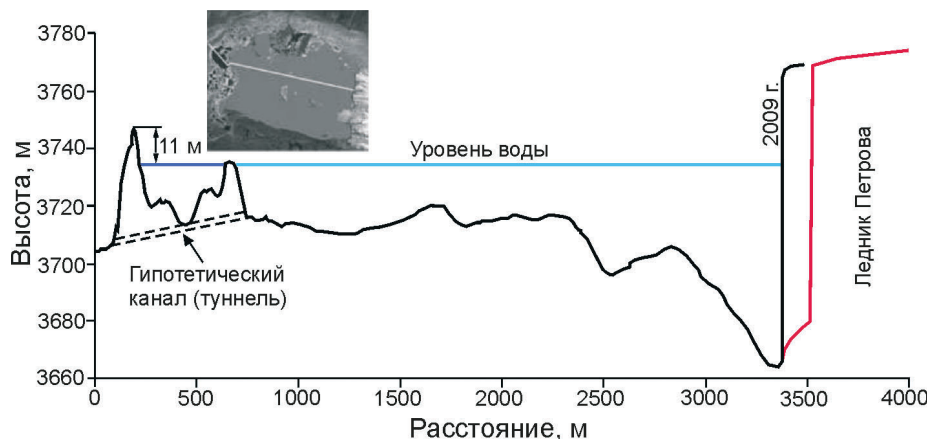


Рис. 4. Продольный профиль оз. Петрова и Голубого залива, построенный на основе результатов топогеодезической и батиметрической съёмок [9]
Fig. 4. Longitudinal profile of Petrov Lake and Blue Bay crated on the basis of geodetic and bathymetric survey [9]

климата, способствует росту вероятности прорыва оз. Петрова в недалёком будущем.

Оценка последствий прорыва озера

Прорывы ледниково-моренных озёр – одно из наиболее разрушительных стихийных бедствий в высокогорных районах, так как они могут вызвать прорывные паводки и селевые потоки, которые распространяются на десятки километров вниз по долинам, уничтожают инфраструктуру и уносят человеческие жизни. Как уже отмечалось, наиболее опасен прорыв озера по внутриморенному каналу стока (туннелю) на прорывоопасном участке плотины (рис. 4), который может сопровождаться трансформацией гидродинамической волны прорыва в разрушительный грязекаменный сель. Расчёты, выполненные по результатам батиметрической съёмки, показали, что максимальный прорывоопасный объём может достигнуть 39–40 млн м³. Высокая вероятность и катастрофические последствия такого сценария для оз. Петрова объясняются рядом факторов.

1. Наличием узкой горловины (критического участка) долины р. Кумтор при выходе её с территории зандрового поля (рис. 5); она образована в результате «пропила» рекой пограничной области между крутым юго-восточным склоном и прислонённой к нему древней боковой мореной ледника Петрова. Вал этой древней морены одновременно служит восточным бортом хвостохранилища. Ширина указанной горловины на уровне гребня древнего моренного вала изменяется от 400 до 500 м, а превышение гребня относительно тальвега русла р. Кумтор составляет 12 м. Важно также, что ось продольной дамбы хвостохранилища заложена вдоль линии поперечного сечения этой узкой горловины.

2. Зандровое поле на участке между плотиной оз. Петрова и древним моренным валом, ограждающим хвостохранилище, покрыто селевыми и галечниковыми отложениями, вынесенными на эту площадь водными потоками в период интенсивного

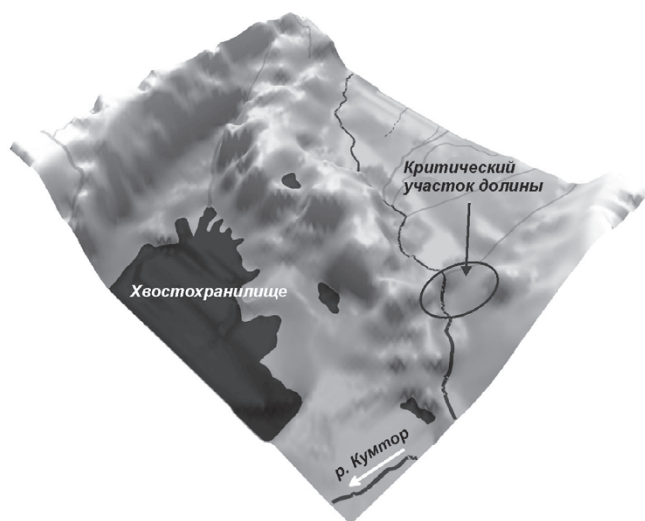


Рис 5. Трёхмерная модель рельефа долины р. Кумтор на участке движения прорывной волны с указанием критического участка – зоны закупорки
Fig. 5. The three-dimensional terrain model of the river valley to the Kumtor site traffic disruptive wave, indicating a critical area – the zone of blockage

таяния ледника Лысый (см. рис. 1). Для захоронения токсичных отходов рудника в долине р. Кумтор летом 2012 г. были проведены масштабные земляные работы, в результате которых образовались значительные объёмы мелкозёмистых отложений. Именно они и могут стать твёрдой компонентой селевого потока. Следы этих отложений отмечены вплоть до критического участка русла р. Кумтор (см. рис. 5).

3. Древняя боковая морена ледника Петрова, как и все морены северо-западного ледяного обрамления массива Ак-Шыйрак, содержит погребённые глыбы ледника, высокольдистые и мелкодисперсные грунты морены. Таяние погребённого льда в этой морене вызывает просадки поверхности древнего моренного вала с образованием мелких термокарстовых озёр. Процесс деградации, сопровождающийся

понижением высотных отметок гребня морены, усугубляется отепляющим влиянием пульпы (хвостов), температура которых может достигать $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Объём хвостов, содержащих цианиды, на конец 2012 г. превысил 60 млн м^3 , или 100 млн т.

При внутриморенном прорыве плотины оз. Петрова высока вероятность, что прорывная волна с максимальным расходом около $Q_{\text{max}} = 3000\text{ м}^3/\text{с}$ вовлечёт в движение валуны и обломки скальных пород размером до 1 м в поперечнике, а также глыбы льда, мелкообломочные и флювиогляциальные отложения плотины оз. Петрова, т.е. начнёт формироваться селевой поток. На участке зандрового поля этот поток обогатится галечниковыми и мелкозёмистыми отложениями, а при достижении потоком критического участка (см. рис. 5) узкая горловина в большей части её сечения закупорится ледово-селевой массой, которая в дальнейшем перельётся через древний моренный вал, затопит чашу хвостохранилища водно-селевыми массами и размоет восточный участок удерживающей дамбы.

Необходимо учитывать, что в настоящее время дамба хвостохранилища неустойчива, поскольку её возвели на грунтах, которые начали оттаивать при наполнении чаши хвостохранилища. На основании данных геотехнического мониторинга с апреля 1999 г. фиксировалось смещение дамбы в сторону нижнего бьефа по кровле оттаявших суглинков [1]. Стабилизация дамбы стала крупной проблемой для рудника. В 2006 г. началась реализация проекта по строительству расширенного клина у низового откоса ограждающей дамбы. В результате скорость смещения дамбы снизилась с 3,6–6,6 мм/мес. до 0,9 мм/мес. [6]. Окончательное заключение об эффективности принятого решения специалисты смогут дать лишь через некоторое время, поскольку есть опасения, что принятые меры лишь снизили скорость смещения дамбы.

В случае разрушения селевым потоком восточного фланга дамбы, которое возможно при прорыве оз. Петрова, не исключён выброс цианосодержащих отходов в бассейн рек Кумтор–Тарагай–Нарын, т.е. возможна трансформация гидродинамической волны прорыва в экологическую катастрофу регионального масштаба. Вероятность реализации подобного сценария существенно возрастёт, а последствия будут более катастрофические, если к моменту прорыва плотины оз. Петрова зандровое поле будет покрыто «свежими» селевыми накоплениями, принесёнными водными потоками, которые берут своё начало из-под ледника Лысый, и отвалами, размещёнными на нём. На техногенных массивах типа отвалов, резко отличающихся от естественных массивов горных пород по механическому составу и состоянию, пористости и другим физико-механическим характеристикам, в условиях сурового климата могут развиваться так называемые «техно-

генные каменные глетчеры и сели». Подобные каменные глетчеры зарождаются, как правило, на периферии отвалов и склонов. Иногда такие техногенные отложения движутся по склонам и откосам в виде оплывин, переходящих в грязекаменный селевой поток [6]. При образовании техногенного селя на отвалах ледника Лысый селевые массы отложатся на конусе выноса ручья Лысый. Это приведёт к значительному уменьшению перепада высот между тальвегом долины р. Кумтор и гребнем древнего моренного вала, ограждающего хвостохранилище, что ещё сильнее повысит вероятность затопления хвостохранилища и вызовет неблагоприятные последствия при нарушении его целостности.

Заключение и рекомендации

Результаты комплексных (геофизических, батиметрических, гидрологических) исследований и мониторинга моренно-ледникового комплекса оз. Петрова показывают, что наиболее узкий участок плотины у Голубого залива, характеризующийся сильной неоднородностью, нарушением и таянием ледяного ядра, которые сопровождаются процессами деформации, термоприсадками, зарождением трасс инфильтрации, уменьшением высоты и ширины гребня над урезом воды, в настоящее время считается самым нестабильным и прорывоопасным звеном моренно-ледникового вала, подпруживающего оз. Петрова. На конец 2012 г. вероятность самопроизвольного разрушения моренно-ледниковой плотины оз. Петрова на рассматриваемом участке можно оценить как среднюю, но следует иметь в виду стремительный рост вероятности, вызванный постоянным увеличением объёма воды в озере, усилением фильтрации воды из озера, а также возможным проявлением триггерных механизмов. В настоящее время наиболее опасный сценарий – внутриморенный (подземный) внезапный прорыв оз. Петрова с трансформацией гидродинамической волны прорыва в разрушительный селевой поток, угрожающий затоплением хвостохранилища и размывом его удерживающей дамбы с катастрофическими экологическими последствиями регионального масштаба.

Прорыв оз. Петрова может привести не только к разрушению объектов, размещённых в долине р. Кумтор, но и к серьёзным проблемам с водообеспечением рудника, вплоть до потери основного и практически единственного источника водоснабжения, так как эксплуатация и водозабор из скважин в условиях многолетней мерзлоты и глубокого залегания (120 м) подземных (подмерзлотных) вод сопряжены со значительными расходами и техническими проблемами. Проектировщики гидроэлектростанций Верхненарынского каскада высказывали опасения по поводу разрушительного воз-

действия волны прорыва на плотины станций этого каскада ещё на стадии строительства. Однако, если иметь в виду, что насыпная плотина верхней — Акбулунской ГЭС этого каскада расположена на расстоянии более 150 км от оз. Петрова, то риск её разрушения можно считать чисто гипотетическим.

В целях предотвращения или снижения риска прорыва озера рекомендуется выполнить мероприятия по регулируемому снижению уровня воды в оз. Петрова до безопасного уровня. Для заблаговременного распознавания стадии повышенной вероятности прорыва, наряду с контролем уровня воды в озере, проводятся геодезический и термометрический мониторинги прорывоопасного участка плотины и перемычки между заливом и оз. Петрова. За период с января по август 2012 г. вертикальная просадка на гребне плотинной перемычки в результате оттаивания ледяного ядра составила 10 см. Это в сочетании с произошедшим летом 2012 г. соединением акваторий Голубого залива и самого оз. Петрова ещё более повысило вероятность прорыва плотинной перемычки из-за усиления волновой абразии и эрозии её внутреннего откоса в верхнем бьефе водоёма.

Литература

1. *Айтматов И.Т., Чукин Б.А., Ким Э.А.* К вопросу устойчивости дамб хвостохранилищ, эксплуатируемых в условиях высокогорья // Развитие инженерных методов в геомеханике: оценка, прогноз, контроль. Бишкек: Илим, 2005. С. 149–158.
2. *Бондарев Л.Г.* Очерки по оледенению массива Ак-Шийрак. Фрунзе: изд. АН КиргССР, 1963. 203 с.
3. *Ерохин С.А., Эрменбаев Б.О.* Скорости линейного отступления и факторы регресса горно-долинных ледников Тянь-Шаня // Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Бишкек: изд. МЧС Кыргызской Республики, 2012. С. 627–636.
4. *Петраков Д. А.* Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита // Тр. Междунар. конф. Пятигорск, Россия, 22–29 сентября 2008 г. / Отв. ред. С.С. Черноморец. Пятигорск: изд. Института «Севкавгипроводхоз», 2008. С. 309–312.
5. *Севастьянов Д.В., Фунтиков А.Б.* Новые данные об эволюции высокогорного озера у конца ледника Петрова (Тянь-Шань) // Изв. ВГО. 1981. Т. 113. Вып. 5. С. 430–435.
6. *Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г.* Геоэкология и отходы горно-промышленного комплекса Кыргызстана. Бишкек: Илим, 2009. С. 139–147.
7. *Aleshin Y.G., Torgoev I.A., Ashirov G.E., Abirov K.* Geophysical study experience and Tien Shan glacial lakes dyke breach danger assessment // Mitigation of Natural Hazards in Mountain Areas Materials of Intern. Confer., Bishkek 15–18 Sept. 2009. P. 15–23.
8. *Jansky B., Engel Z., Sobr M., Benes V., Spacek K., Erokhin S.* The evolution of Petrov lake and moraine dam rupture risk (Tien Shan, Kyrgyzstan) // Natural Hazards. 2009. Т. 50. № 1. P. 83–96.
9. Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment / Ed. J.M. Reynolds. Report № R7816, Reynolds Geo-Sciences LTD, UK, 2003. P. 36.
10. <http://www.kumtor.kg>. Кумтор Оперейтинг Компани. Годовой отчёт по охране окружающей среды 2011.

Summary

Global climate warming causes an intensive melting and retreat of glaciers in the Tien Shan mountains. Melting water of glaciers causes overfilling of high mountain lakes. The increase of the surface and volume of the Petrov Lake accompanied with the decrease of stability of the dam represents an extremely dangerous situation that can produce a natural disaster. Failure can happen due to erosion, a buildup of water pressure, an earthquake or if a large enough portion of a glacier breaks off and massively displaces the waters in a glacial lake at its base. In case of the lake dam rupture, flooding of a disposal site of highly toxic tailing from the gold mine Kumtor is a threat. If this happens, the toxic waste containing cyanides would contaminate a large area in the Naryn (Syrdarya) river basin. Even if the flooding of the disposal site does not occur, the damage after lake dam fracture will be immense due to the glacial lake outburst flood may be a devastating mudslide. In order to prevent or reduce the risk of this event we recommend performing engineering surveys for the development and implementation of the project for the controlled reduction of water level in the Blue Bay of the Petrov Lake to a safe volume.

Подписано в печать 14.05.2013 г. Выход в свет 10.06.2013 г. Формат 60 × 88^{1/8}
 Цифровая печать Усл.печ.л. 18.0 Усл.кр.-отт. 11.3 тыс. Уч.-издл. 18.2 Бумл. 9.0
 Тираж 355 экз. Зак. 1604 Цена свободная

Учредители: Институт географии РАН, Издательство «Наука»

Издатель: Российская академия наук. Издательство «Наука», 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
 Отпечатано в ППП «Типография «Наука», 121099 Москва, Шубинский пер., 6