



# Проблема Сарезского озера: Обеспечение долгосрочной безопасности

Александр Стром

## Аннотация

Описаны основные неоднозначности в отношении определения развития Усойской природной дамбы и Сарезского озера. Они обусловлены недостаточным знанием ее геологического строения дамбы и склонов низины и неопределенными сейсмологическими условиями региона. Без специальных технических мероприятий по снижению риска прорыва Усойской дамбы все эти неопределенности не позволяют гарантировать долгосрочную (на десятилетия-столетия) безопасность Сарезского озера. Эти трудоемкие и требующие много времени мероприятия можно было бы осуществить в период, пока ситуация остается еще стабильной.

## Ключевые слова:

Сарезское озеро • Усойский завал • Оползень • Сейсмичность

## Введение: Краткий обзор прошлых исследований

Сарезское озеро, образовавшееся в 1911 году в результате вызванного землетрясением Усойского оползня является самым глубоким в мире природным резервуаром, содержащим около 17 км<sup>3</sup> воды, и представляет потенциальную угрозу населению в Таджикистане, Афганистане, Узбекистане и Туркменистане.

В течение столетней истории исследований были представлены различные мнения по безопасности озера. Некоторые специалисты (Букинич, 1913; Родионов, 1931) предполагали, что Усойский завал относительно скоро (в течение нескольких десятилетий) будет или накрыт, или размыв поднимающимся по склону каньоном. В противоположность им, Шпилко (1914), Преображенский (1920), Ланге (1926, 1929), Селиванов и Андреев (1959) пришли к выводу, что закупорка озера является стабильной и длительной, которая сохранится даже в случае перелива воды через завал.

Помимо предположений, что завал может быть накрыт поднимающейся водой, существует еще одна угроза – это быстрый подъем эрозионного каньона по лицевой поверхности нижнего склона завала, питаемого просачивающейся водой и потоками обломков из грунтовых остатков ледниковой долины Усой-Дара. К счастью, в конце 40-х годов обрушение пород из вершинного

крутого утеса направило эти обломочные потоки к озеру (Парамонов, 1969). Позднее подъем уровня воды в озере и скорость движения эрозионного каньона в сторону вершины завала замедлились. Однако, в то же самое время возникла новая проблема: возможность крупномасштабного обрушения склона в водную массу, что могло создать волну, достаточно большую, чтобы разрушить вершину завала, стала основным беспокойством (Шеко, 1968; Шеко и Лехотинев, 1970; Федоренко, 1988). С 1967 года полевые исследования были сосредоточены на правом побережье озера, в 4-5 км вверх от Усойского завала, где идентифицирован так называемый «Правобережный оползень». Его объем оценивается от 300 млн. м<sup>3</sup> до 2 км<sup>3</sup>.

С этим утверждением не согласен Н.Ищук, который отрицает природу оползня не только этой части склона низины, но и во многих других местах вокруг Сарезского озера и в пределах всего Памира (Н.Ищук 2011а, б).

Недавно при поддержке Всемирного Банка (Стаки, 2001) была установлена система раннего предупреждения; ее цель – обнаруживать признаки приближающегося прорыва озера и предупреждать людей, живущих в долинах в речных низовьях, которым может принести ущерб выброс воды. Сейчас существует общее мнение, что Усойский завал в его настоящем состоянии можно считать стабильным и в ближайшем будущем его

катастрофическое обрушение не произойдет (Алфорд и Шустер, 2000).

Однако, что касается его долгосрочного развития с должным учетом процессов запруживания реки, их развития во всем мире и учитывая скудность наших знаний строения – это остается под вопросом.

### Основные неоднозначности оценки безопасности Сарезского озера

Вследствие огромного размера Усойского завала, отдаленности и трудных условий подъезда к месту его расположения, мы имеем до настоящего времени результатом то, что примерно через 100 лет после катастрофического события мы располагаем довольно ограниченными знаниями о внутренней структуре завала, его гранулометрическом составе, о структуре берегов озера и стабильности. Это предопределяет неопределенность сценариев развития озера, за исключением данных о медленном постепенном подъеме уровня воды с сезонными колебаниями, полученных долгосрочными гидрологическими измерениями (Biedermann и Attewill 2002).

Дополнительная неоднозначность связана с неизбежной неопределенностью оценки сейсмической опасности в районе Сарезского озера, где исторические регистрационные записи опасных природных явлений имеются не более чем за 150-200 лет – период, который гораздо короче, чем интервал повторяемости крупных межконтинентальных землетрясений.

### Неоднозначность строения и развития Усойского завала

Недостаток данных о внутреннем строении и гранулометрическом составе тела завала препятствует сделать надежный прогноз его поведения как в "статических" условиях, так и особенно под сейсмической нагрузкой. Согласно качественным предположениям, предлагается несколько возможных эффектов. Первый – сейсмическое сотрясение может вызвать уплотнение завала, осадку его вершины и некоторую блокировку путей просачивания, что может привести к уменьшению надводного борта.

Другой сценарий предполагает деформацию лицевой поверхности нижней части завала – т.е. развитие вторичного оползня внутри его тела. Это кажется вполне реалистичным, поскольку поверхности потенциального скольжения

сформировались уже или во время столкновения обрушения с левым побережьем низины и боковым простираем тела завала (Стром, 2010а), или позже, но в любом случае в течение первых лет после образования запруды (Парамонов, 1969). Вторичное скольжение сформировало хорошо выраженные дугообразные уступы вдоль вершины завала, оказав воздействие не только на метаосадки самой верхней части завала, но также и на мраморные и гипсовые обломки его самой нижней ближайшей части (рис. 1).

Сравнение карты Усойского завала, составленной в 1915 году профессором Преображенским, с стереоскопическими аэрофотоснимками, снятыми в 1951 году (Парамонов, 1969), показывает, что основные деформации поверхности завала произошли на его самой нижней ближайшей части,



Рис. 1 Дугообразные уступы на лицевой стороне нижней части Усойского завала с маркировкой вторичных оползней (белые стрелки)

где от самой верхней центральной части блокировки простирается отчетливый

дугообразный уступ (см. рис.1). Эти подвижки можно связать с ростом эрозионного каньона или именно с некоторыми внутренними деформациями тела завала. Очевидно, что сильное(ые) землетрясение(я) может увеличить вероятность такого вторичного скольжения.

Активизация вторичного скольжения может оказать непредсказуемое влияние на фильтрацию. Блокировка путей просачивания может привести к подъему уровня воды в озере, в то время как растущая фильтрация может усилить эрозию, как поверхностную, так и внутреннюю. Последняя сильно зависит от гранулометрического состава тела Усойского завала. А этот параметр завала как раз неизвестен, поскольку там не пробурены еще скважины достаточной глубины, чтобы выяснить это.

Однако, детальные исследования большого числа размывов до большой глубины крупных обвальных дамб в различных частях мира (McSaveney и Davies, 2006; Briickl и Heuberger, 2001; Pollet и Schneider, 2004; Dunning и др., 2005; Poschinger и др., 2006; Hewitt, 2002; Стром, 1994, 2006; Абдрахматов и Стром, 2006) показывают, что

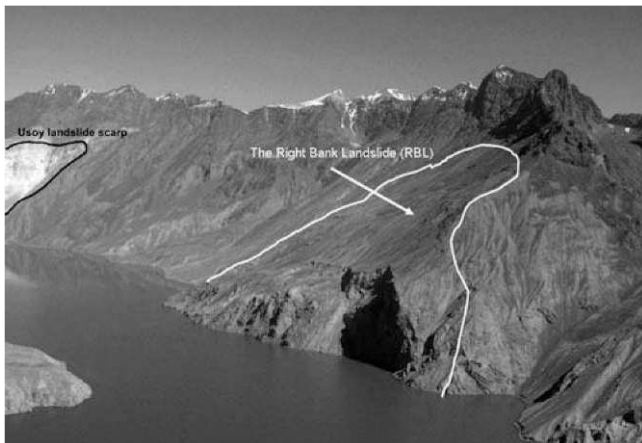


Рис. 2. Правобережный склон Сарезского озера с четким обозначением подмыва оползня. Фото любезно предоставлено А.Ищуком.

практически все из них характеризуются наличием панциря из крупных глыб, перекрывающего гигантское "внутреннее ядро", состоящее из сильно раздробленного и уплотненного материала.

Такая же внутренняя структура предполагается и для Усойской природной дамбы. Поскольку граница между глыбовой частью и частью из раздробленного материала может быть резкой (аналогично многим другим размывам до большой глубины завальным блокировкам), концентрированное просачивание воды через

пустоты в глыбовой части может увлечь за собой мелкозернистый грунтовый материал, вызывая внутреннюю эрозию и создание «водоотводов».

Такой грунтовый состав может способствовать катастрофическому прорыву дамб: удаление панциря из крупнообломочного материала размывом или поднимающейся волной может вести к размыву раздробленного материала внутри дамбы мощным турбулентным потоком, как это случилось в 1963 году во время прорыва Иссыкской дамбы (Герасимов, 1965; Стром, 20106).

Заканчивая эту часть статьи, я хочу привести цитату из работы Гончарова и Скомаровского (2006): *"Столетняя практика гидравлических исследований доказала нерушимое утверждение – если что-то бесконтрольное происходит на лицевой поверхности в нижней части завала – эта структура обречена"*. Очевидно, что Усойский завал и особенно лицевая поверхность его нижней части подвержены таким бесконтрольным процессам – а именно: размыву и вторичному скольжению, которые могут усиливаться при сейсмическом сотрясении.

### Неоднозначность оценки стабильности берегов Сарезского озера

Возможность обрушения склонов вдоль берегов озера, которое может вызвать мощную волну, еще больше увеличивает неопределенность долгосрочной безопасности Сарезского озера. С моей точки зрения, ключевая проблема заключается не в том, что действительно ли существует так называемый "Правобережный оползень" (ПБО—рис. 2), а в том, что будет ли этот склон (и склоны также на других берегах озера) стабильным в долгосрочной перспективе, особенно в случае сильного землетрясения.

Сейсмически вызванные оползни могут случаться как на "подготовленных", так и на "неподготовленных" склонах (Федоренко, 1988). Учитывая событие 1911 года, можно спросить, был ли способен кто-нибудь, снабженный всем необходимым современным оборудованием и техникой, предсказать этот оползень несколько лет назад. Информация о состоянии этого склона до обрушения скудная, но если наблюдались любые аномальные явления, действительно указывающие на приближающееся обрушение (например, частые обрушения пород, странные звуки и др.), то выжившие люди из деревни Усой должны помнить их. Однако, ни об одном из этих



Рис. 3. Космический снимок водораздела рек Бартанг-Гунт. S – Сарезское озеро, Y – Яшкилкуль. Красные стрелки показывают активный разлом Патур-Немос. Местоположения, показанные на рис.3, обозначены желтыми стрелками.

признаков не сообщалось. Скорее всего, это обрушение было непрогнозируемым.

Таким же образом, последующее сильное землетрясение может вызвать еще один большой оползень, особенно там, где для склона, высотой более чем 1 км, существующий оползень опорой не служит (см. рис. 2). Было предложено несколько более или менее бедственных сценариев таких явлений, но опять же скудность информационных данных не позволяет нам сделать здравые выводы по их надежности.

### Неоднозначность оценки сейсмической опасности

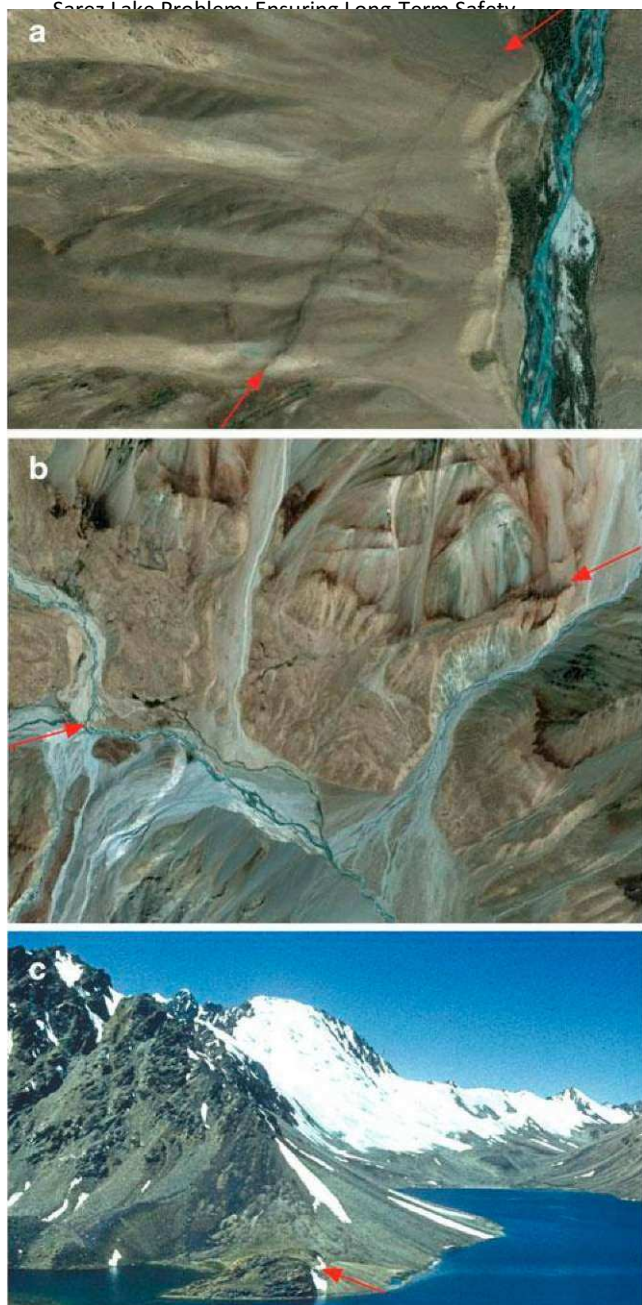
Все выше упомянутые неопределенности возрастают в значительной степени из-за высокой сейсмичности района Сарезского озера. Его сейсмическая опасность обусловлена частыми глубоко-фокусными землетрясениями от Памира — зоны Хинду Куш на глубине 100-300 км с высокими (до ~7.5-8.0) магнитудами и сильными землетрясениями земной коры, аналогичными землетрясению 1911 года, которое вызвало Усойский оползень, как и предполагалось специалистами Ambraseys и Vilham (2012).

Согласно данным PSHA, землетрясения с периодом повтора примерно в ~100 лет могут вызывать ускорение движения грунтовых частиц на вершинах завалов (PGA) в среднем 0.2 г, в то время как предполагаемое правдоподобное сильнейшее землетрясение в земной коре силой  $M = 7.9$  может вызвать среднее значение PGA в 0.213 г с периодом повтора более чем 130 лет

(Стаки, 2001; А. Ищук, 2011). Однако, утверждение, что «землетрясения с периодами повтора >100 лет и ускорением движения грунтовых частиц на вершинах >0.20 г вряд ли произойдут вблизи Сарезского озера» (Стаки, 2001; А. Ищук, 2011, стр. 428) и что такие «экстремальные» сейсмические эффекты можно игнорировать, является неверным. С моей точки зрения, такие оценки PGA кажутся слишком низкими, более того, учитывая, что период повтора сильных подвижек MCE и MDE, используемых при проектировании высоких плотин, гораздо длиннее, чем 100 лет (ICOLD 1989).

Согласно данным, приведенным в работе Ambraseys и Vilham (2012), источник землетрясения 1911 года магнитудой  $M_s = 7.7 \pm 0.3$  ( $M_w \ll 7.7$ ) с длиной разрыва около 50-80 км и средним смещением 6-10 м был связан с зоной разлома, проходящей, вероятнее всего, вдоль долины реки Бартанг примерно в 20 км северо-западнее от завала. Принимая во внимание типичный интервал повторяемости высоко-магнитудных землетрясений в земной коре, действительно маловероятно, что в той же самой очаговой зоне произойдет в следующие десятилетия сильное землетрясение.

Эта очаговая зона, однако, не единственная в окрестностях Сарезского озера, где могут произойти сильные землетрясения. Например, четкий активный разлом Патур-Немос, протяженностью более чем 100 км, проходит в 35 км к югу от Усойского завала (рис.3). Наличие последних разрывных нарушений (рис. 4)



**Рис. 4.** Разрывы поверхностей вдоль активного разлома Псатур-Немос, (а) на правом берегу долины реки Патур; (в) вдоль моренных отложений в верховьях реки Шазуд; (с) небольшой уступ на южном берегу озера Чапдара, показанный *стрелкой*, отражает самый поздний выступ, в то время как высокий крутой откос, покрытый снегом (на заднем плане) — совокупный эффект многократных смещений

показывает, что эта зона разрывов может быть способной для сильных землетрясений. Базируясь

на консервативном подходе, требуемом ICOLD (1989) для уникальных плотин, можно предположить, что такая зона разрывов может создавать землетрясения, силой до  $M 7.5$ . (Wells and Coppersmith 1994), интенсивность которых в районе Усойского завала может превышать по макросейсмической шкале 8 баллов и,

следовательно, значение PGA может превышать выше указанные величины, полученные расчетами PSHA.

Кроме того, в районе Памира с неровной поверхностью параметры сильных подвижек могут значительно отличаться от средних оценок PGA. Реальное увеличение интенсивности на вершине завалов и на подозрительных склонах не известно, что увеличивает неопределенность возможных сейсмических эффектов на завале и берегах озера.

## Обсуждение

Большинство всех природных дамб обрушились (Costa and Schuster 1988), многие из них катастрофически, а некоторые через столетия или даже через тысячелетия "безопасного" существования (Strom 2010b; Hermanns et al. 2011; Hewitt 2011; Weidinger 2011). Уникальность изучения каждого примера исследований требует тщательного анализа скорее всего комплекса влияющих факторов, чем формальной вероятностной оценки опасности прорывов, основанной на статистическом анализе случаев запрудов рек в мире.

Завальные дамбы, которые выдерживают перелив воды без каких-либо катастрофических последствий, таких, как например, у Яшилкульской дамбы, высотой 50 м и шириной 3.5 км (вдоль течения) на Памире (см. рис.3), характеризуются совокупностью профиля с низким уклоном и крупно-глыбовым панцирем. В таких условиях перелив или просачивание воды недостаточно сильное, чтобы удалить ли размыть панцирь.

Другая совокупность факторов, поддерживающих долгосрочную стабильность завальных дамб и их постепенный прорыв после превышения уровня воды, - это положение самой нижней части вершины дамб относительно локальной топографии размытой до коренных пород долины. Если отток происходит вдоль отдаленной от центра крутого откоса завала или вдоль топографического понижения вне тела оползня, то есть хороший шанс, что эрозия скоро дойдет до коренной породы. Более высокое сопротивление коренной породы эрозии привело бы к постепенному снижению уровня воды в запруженном озере, как это случилось, например, на Бешкиольском оползне в долине реки Нарын (Когур и др., 2006).

В противоположность этому, оползневые дамбы с выраженным примыкающим к ним понижением, как это имеет место на Усойской дамбе, более склонны к катастрофическому прорыву в случае превышения уровня воды, поскольку эрозия, начинающаяся в этой части вершины дамб, проникает через рыхлый грунтовый материал до значимой глубины. Более того, понижение, ближайшее к вершине дамб, часто заполняется осыпающимися грунтовыми обломками, которые могут быть менее плотными, чем основной слагающий материал оползня, и, следовательно, более эродуруемы.

Примером может быть завальная дамба Аксу, сравнимая по размеру с Усойским завалом, которая прорвалась вскоре после запруживания (Стром, 2010b) из-за отсутствия течения отложений озера вверх по дамбе, хотя она заблокировала маленькую реку и должна была считаться стабильной благодаря низкому значению Безразмерного Индекса Блокировки (DBI) (Ermini and Casagli 2003) (Таблица 1). Вероятно, то же самое произошло с дамбой Рио Лая, высотой 800 м, в Аргентине (Hermanns et al. 2011). Я предполагаю, что критическим фактором, определяющим такое поведение, является крутизна ненапорной стороны плотных плотин, которые значительно увеличивают эрозионную силу перетекающей или просачивающейся воды (Стром, 2010b).

Следует подчеркнуть, что даже столетнее существование некоторых озер, запруженных оползнями, не могут гарантировать, что они навсегда останутся безопасными, если

значение DBI, будучи, таким образом, «стабильными». Тем не менее, прорыв каждой из этих дамб был экстремальным событием после нескольких столетий безопасного существования.

Кажется, что такой «запоздалый» прорыв более типичен для запруженных оползнем озер, расположенных в зоне аридного климата, чем для озер в зонах с влажным (дождливым) климатом с большим годовым пиковым расходом воды. Прорывы таких озер происходят довольно скоро после паводков, как показывают катастрофические события 1841 года в Индусе, 1858 года в Хунзе, 1894 года в Гоне, 1985 года в Байрамане или 1993 года в Ла Жосефине (Evans et al. 2011; King et al. 1989; Delaney and Evans 2011).

Вековое выживание Сарезского озера, несмотря на высокое значение DBI Усойского завала (3.55, см. таблицу 1), согласно которому его можно классифицировать как нестабильный объект (Ermini and Casagli 2003), является геоморфологической и гидрологической аномалией, возможно из-за удачного баланса между притоком воды в озеро и фильтрацией через дамбу, сохранение которого зависит от многочисленных факторов, едва ли предсказуемых в долгосрочной перспективе.

**Таблица 1.** Основные параметры Усойской дамбы и некоторых прорвавшихся дамб из аридных регионов Центральной Азии (Стром, 2010а, б) и Аргентины (Hermanns et al., 2011)

Название дамб и объем (м <sup>3</sup> )	Высота дамб (м)	Площадь водосбора (км <sup>2</sup> )	DBI
Усойская: 2,200 x 10 <sup>6</sup>	550	14,166	3.55
Аксу: 1,500 x 10 <sup>6</sup>	400	329	1.94
Иссык: 25 x 10 <sup>6</sup>	100	189	2.87
Яшилкуль: 25 x 10 <sup>6</sup>	100	107	2.63
Рио Барранкас: 1,300 x 10 <sup>6</sup>	160	1,923	2.37
Рио Лая: 1,000 x 10 <sup>6</sup>	800	106	1.98

совокупность их морфологических и структурных особенностей способствуют прорыву дамб. Это можно проиллюстрировать катастрофическим прорывом паводков из озера Иссык в 1963 году, из озера Яшинкуль в 1966 году [оба в Кыргызстане; см. Стром (2010b)] и катастрофой в Рио Барранкасе

в 1914 году в Аргентине (Hermanns и др., 2011).

Я хочу подчеркнуть, что все прорвавшиеся дамбы, перечисленные в таблице 1, имели низкое

## Выводы

Сравнение Усойского завала с другими природными дамбами показывает, что многие из его морфологических и структурных особенностей благоприятны для обрушения, а именно: огромная высота и относительная уплотненность, которые увеличивают эрозионный потенциал воды, текущей по ненапорной стороне завала; заметное понижение в его ближайшей части, сложенной наиболее размываемым грунтовым материалом; явная очевидность деформаций ненапорной стороны завала, соединенной с глубоким эрозионным каньоном. Эти факторы характеризуются высоким уровнем неопределенности, обусловленной неадекватным знанием внутренней структуры и состава тела завала, а также стабильности берегов озера; двусмысленная ситуация обостряется неопределенностью оценки сильных подвижек. Все это не позволяет нам без технических мероприятий, направленных на снижение риска прорыва дамбы, гарантировать долгосрочную безопасность Сарезского озера.

Я не хотел бы обсуждать здесь различные технические решения в деталях, но хотел бы упомянуть, что те предлагаемые меры, которые могли бы повлиять на фильтрацию через дамбу и/или эрозию на ее ненапорной стороне (см., например, Папырин, 1989), могли привести к неконтролируемым эффектам и, следовательно, не могут быть приняты.

Однако, в любом случае такие меры являются трудоемкими и требующими много времени и, в случае если при их реализации будут обнаружены какие-либо изменения, указывающие на возможность прорыва дамбы, то уже не будет достаточно времени для проведения адекватных строительных работ. Таким образом, чтобы гарантировать постоянную безопасность Сарезского озера и устойчивое развитие долин рек Бартанг-Пянж – Аму-Дарьи, нужно проводить меры, пока ситуация еще остается стабильной.

**Признательность.** Я хочу поблагодарить Ганса-Балдера Хавенита за полезные обсуждения и Анатолия Ищука за любезное разрешение использовать его фотографии правого берега озера.

## References

- Abdrakhmatov K, Strom A (2006) Dissected rockslide and rock avalanche deposits; Tien Shan Kyrgyzstan. In: Evans SG, Scarascia Mugnozza G, Strom A, Hermanns RL (eds) Landslides from massive rock slope failure. NATO science series: IV: earth and environmental sciences, vol 49. Springer, Heidelberg, pp 551-572
- Alford D, Schuster RL (eds) (2000) Usoi landslide dam and Lake Sarez: an assessment of hazard and risk in the Pamir Mountains, Tajikistan, United Nations. ISDR Prevention Series No. 1, 113p
- Ambraseys N, Bilham R (2012) The Saiez-Pamir earthquake and landslide of 18 February 1911. *Seismol Res Lett* 83(2):294-314
- Biedermann P, Attewill L (2002) Evolution of seepage through landslide dams: the case of Usoi Dam in Tajikistan. Paper presented at IAHR Symposium, St. Petersburg, 8 p
- Briickl J, Heuberger H (2001) Present structure and prefailure topography of the giant rockslide of Kofels. *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie* 37:49-79
- Bukinich DD (1913) Usoi earthquake and its consequences. *Russian records*, No. 187, Wednesday, August 14, 1913 (in Russian)
- Costa JE, Schuster RL (1988) The formation and failure of natural dams. *Geol Soc Am Bull* 100:1054-1068
- Delaney KB, Evans SG (2011) Rockslide dams in the Northwest Himalayas (Pakistan, India) and the adjacent Pamir Mountains (Afghanistan, Tajikistan), Central Asia. In: Evans SG, Hermanns R, Strom AL, Scarascia-Mugnozza G (eds) Natural and artificial rockslide dams, vol 133, Lecture notes in earth sciences. Springer, Heidelberg, pp 205-242
- Dunning SA, Petley DN, Rosser NJ, Strom AL (2005) The morphology and sedimentology of valley confined rock-avalanche deposits and their effect on potential dam hazard. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) *Landslide risk management*. Balkema, Amsterdam, pp 691-704
- Ermini L, Casagli N (2003) Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. *Earth Surf Proc Land* 28:31-47
- Evans SG, Delaney KB, Hermanns RL, Strom AL, Scarascia-Mugnozza G (2011) The formation and behaviour of natural and artificial rockslide dams; Implications for engineering performance and hazard management. In: Evans SG, Hermanns R, Strom AL, Scarascia-Mugnozza G (eds) Natural and artificial rockslide dams, vol 133, Lecture Notes in Earth Sciences. Springer, Heidelberg, pp 1-75
- Fedorenko VS (1988) Rockslides and rock falls and their forecast. Moscow State University Publishing House, Moscow (in Russian)
- Gerasimov V (1965) The Issyk catastrophe in 1963 and its effects on geomorphology of the Issyk River Valley. *Trans All-Union Geogr Soc* 97(6):541-547 (in Russian)
- Goncharov VS, Skomarovskiy AN (2006) Study of the filtration through the Usoi blockage. Unpublished report, <http://www.sarezsite.eu.pn> (in Russian)
- Hermanns RL, Folguera A, Penna I, Fauque L, Niedermann S (2011) Landslide dams in the Central Andes of Argentina (Northern Patagonia and the Argentine Northwest). In: Evans SG, Hermanns R, Strom AL, Scarascia-Mugnozza G (eds) Natural and artificial rockslide dams, vol 133, Lecture Notes in Earth Sciences. Springer, Heidelberg, pp 147-176
- Hewitt K (2002) Styles of rock avalanche depositional complexes conditioned by very rugged terrain, Karakoram

- Himalaya, Pakistan. In: Evans SG, DeGraff JV (eds) Catastrophic landslides: effects, occurrence, and mechanisms, reviews in engineering geology, vol XV. Geological Society of America, Boulder, CO, pp 345-377
- Hewitt K (2011) Rock avalanche dams on the Trans Himalayan Upper Indus streams: a survey of late quaternary events and hazard-related characteristics. In: Evans SG, Hermanns R, Strom AL, Scarascia-Mugnozza G (eds) Natural and artificial rockslide dams, vol 133, Lecture notes in earth sciences. Springer, Heidelberg, pp 177-204
- ICOLD (1989) Selecting seismic parameters for large dams. Guidelines, Bulletin 72, Paris, 78p.
- Ischuk AR (2011) Usoi Rockslide Dam and Lake Sarez, Pamir Mountains, Tajikistan. In: Evans SG, Scarascia Mugnozza G, Strom A, Hermanns RL (eds) Landslides from massive rock slope failure NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 49. Springer, Dordrecht, pp 423-440
- Ischuk NR (2011a) The origin of the mountain river closures in Tajikistan. Abstract book of the Second World Landslide Forum, Rome, p. 393
- Ischuk NR (2011b) The role of glacial deposits in forming modern mountain lake dams in the Pamirs. Georisk (1): 16-29 (in Russian) King J, Loveday I, Schuster RL (1989) The 1985 Bairaman landslide dam and resulting debris flow Papua New Guinea. Q J Eng Geol 22:257-270
- Korup O, Strom AL, Weidinger JT (2006) Fluvial response to large rock-slope failures—examples from the Himalayas, the Tien Shan and the New Zealand Southern Alps. Geomorphology 78:3-21
- Lange OK (1926) Expedition on the Usoi blockage and the Sarez Lake survey. Natl Econ Central Asia (10): 76-79 (in Russian)
- Lange OK (1929) Present-day state of the Usoi blockage, vol XIX. Transactions of the Central-Asian Geographical Society, Tashkent (in Russian)
- McSaveney MJ, Davies TRH (2006) Rapid rock-mass flow with dynamic fragmentation: inferences from the morphology and internal structure of rockslides and rock avalanches. In: Evans SG, Scarascia Mugnozza G, Strom A, Hermanns RL (eds) Landslides from massive rock slope failure, vol 49, NATO science series: IV: Earth and environmental sciences. Springer, Dordrecht, pp 285-304
- Papyryn LP (1989) Method of the Sarez Lake water level lowering. Express-Information of TadjikNUNTI, Dushanbe (in Russian)
- Paramonov BA (1969) Formation of the Usoi blockage relief. Rep Moscow Univ (5): 110-112 (in Russian)
- Pollet N, Schneider J-L (2004) Dynamic disintegration processes accompanying transport of the Holocene Flims sturzstrom (Swiss Alps). Earth Planet Sci Lett 221:433-448
- Poschinger A, Wassmer P, Maisch M (2006) The flims rockslide: history of interpretation and new insights. In: Evans SG, Scarascia Mugnozza G, Strom A, Hermanns RL (eds) Landslides from massive rock slope failure, vol 49, NATO science series: IV: Earth and environmental sciences. Springer, Dordrecht, pp 329-356
- Preobrajensky IA (1920) The Usoi landslide. Geol Commun. Papers on Applied Geol 14: 21p (in Russian)
- Rodionov NE (1931) Hydrology of the Usoi blockage, vol LXIII Transactions of the Stage Geographical Society, Moscow (in Russian)
- Selivanov PI, Andieev VI (1959) About water level behaviour and possible evolution of the Sarez Lake. Meteorol Hydrol (3) (in Russian)
- Sheko AI (1968) The Usoi blockage stability and the Lake Sarez breach assessment. Bull Moscow Nat Invest Soc Geol Sect (4) (in Russian)
- Sheko AI, Lehatinov AI (1970) The Usoi blockage stability assessment, Tajikglavgeologia unpublished report (in Russian)
- Shpilko GA (1914) The 1911 earthquake in Pamirs and its effects. Proc Russian Geogr Soc 3:69-94 (in Russian)
- Strom AL (1994) Mechanism of stratification and abnormal crushing of rockslide deposits. In: Proceedings of 7th international IAEG congress, vol 3. Balkema, Rotterdam, pp. 1287-1295
- Strom AL (2006) Morphology and internal structure of rockslides and rock avalanches: grounds and constraints for their modelling. In: Evans SG, Scarascia Mugnozza G, Strom A, Hermanns RL (eds) Landslides from massive rock slope failure. NATO science series: IV: Earth and environmental sciences, vol 49. Springer, Dordrecht, pp 305-328
- Strom AL (2010a) Evidence of momentum transfer during large-scale rockslides' motion. In: Williams AL, Pinches GM, Chin CY, McMorran TG, Massei CI (eds) Geologically active. Proceedings of the 11th IAEG congress, Auckland, New Zealand, 5-10 September 2010. Taylor & Francis Group, London, pp 73-86
- Strom AL (2010b) Landslide dams in Central Asia region. Landslides J Jpn Landslide Soc 47(6):309-324
- Stucky Consulting Engineers (2001) Design report - monitoring and early warning systems/studies on long term solutions: Lake Sarez risk mitigation project. Renens, Switzerland
- Weidinger JT (2011) Stability and life span of landslide dams in the Himalayas (India, Nepal) and the Qin Ling mountains (China). In: Evans SG, Hermanns R, Strom AL, Scarascia-Mugnozza G (eds) Natural and artificial rockslide dams. Lecture notes in earth sciences, vol 133. Springer, Heidelberg, pp 243-277
- Wells DL, Coppersmith KJ (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull Seism Soc Am 1994(84):974-1002