

УДК
ББК
Ш

Рецензенты:

*доктор географических наук В.Л. Бабурин
кандидат географических наук Д.Н. Айбулатов*

Ш СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ, СЕЛИ И ОЦЕНКА РИСКА.
Сборник статей. Выпуск 4. / Под редакцией
А.Л. Шныпаркова. – М.: Издательство «Перо»,
2020. – 146 с.

ISBN 978-5-00171-

В сборник вошли труды сотрудников НИЛ снежных лавин и селей географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Статьи сборника охватывают научные направления исследований лаборатории, разрабатываемые в последние 5 лет по госбюджетной теме, различным федеральным программам, грантам.

Представляет интерес для специалистов в области изучения опасных природных процессов, природного и техногенного риска и устойчивого развития.

Печатается по решению Ученого совета географического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова.

ISBN 978-5-00171-

© Коллектив авторов, 2020

СЕЛИ ПРОРЫВНОГО ГЕНЕЗИСА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ШАХИМАРДАН (КЫРГЫЗСТАН, УЗБЕКИСТАН): СОБЫТИЯ ПРОШЛОГО И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Висхаджиева К.С.¹, Черноморец С.С.¹, Савернюк Е.А.¹,
Петраков Д.А.¹, Докукин М.Д.², Тутубалина О.В.¹,
Ерохин С.А.³, Глазырин Г.Е.⁴, Петров М.А.⁵, Штоффел М.⁶

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ²Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия; ³Институт водных проблем и гидроэнергетики НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан; ⁴Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан; ⁵Институт геологии и геофизики им. Х.М. Абдуллаева, г. Ташкент, Узбекистан; ⁶Институт наук об окружающей среде, Университет Женевы, г. Женева, Швейцария.

Аннотация. Деградация горного оледенения приводит к образованию и активной динамике ледниковых озер во многих регионах, включая Центральную Азию. Прорывы этих озер, зачастую приводящие к формированию мощных селей или селевых паводков, представляют угрозу для нижних частей речных долин, где находятся населенные пункты и объекты инфраструктуры. Самая большая по числу жертв (если рассматривать регион Центральной Азии с 1920-х гг.) селевая катастрофа прорывного генезиса произошла 8 июля 1998 г. в трансграничном бассейне р. Шахимардан, расположенном на территории двух государств: Кыргызстана (Баткенская область) и Узбекистана (Ферганская область). Погибло около 100 человек, были повреждены объекты инфраструктуры и несколько тысяч домохозяйств. Район катастрофы был кратко обследован после происшествия, но детальный научный анализ события не публиковался. В 2014 г. авторы провели полевую экспедицию, целью которой было исследование бассейна р. Шахимардан. После полевых работ был также проведен детальный анализ данных дистанционного зондирования, результатом которого стала реконструкция литодинамических зон события 1998 г., вы-

ПРОРЫВООПАСНЫЕ ОЗЕРА БАССЕЙНА РЕКИ ГУНТ (ГОРНО-БАДАХШАНСКАЯ АВТОНОМНАЯ ОБЛАСТЬ, ТАДЖИКИСТАН): ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОРЫВОВ

Кидяева В.М., Черноморец С.С., Савернюк Е.А.,
Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Висхаджиева К.С.,¹
Бобов Р.А., Мародасейнов Ф.О., Пирмамадов У.Р.,
Раимбеков Ю.Х., Шафиев Г.В.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия

²Агентство Ага Хана Хабитат, Таджикистан

Аннотация. В статье рассмотрены результаты исследования горных озер бассейна р. Гунт и прорывных паводков и селей, которые могут образоваться в результате прорыва наиболее потенциально опасных озер. Составлен каталог озер бассейна р. Гунт, в котором даются характеристики площади озер и их происхождение. Для наиболее крупных и опасных объектов предложены наиболее вероятные сценарии прорывов. Для долин была адаптирована двумерная модель движения водных и селевых потоков. На основе сценарных расчетов получены плановые распределения характеристик затопления (максимальная глубина, скорость течения). Выявлены объекты инфраструктуры и части населенных пунктов, находящиеся в наибольшей опасности затопления и подверженные возможному разрушению.

HAZARDOUS LAKES IN THE GUNT RIVER BASIN (GORNO-BADAKHSHAN AUTONOMOUS REGION, TAJIKISTAN): HAZARD ASSESSMENT AND OUTBURST MODELLING

Kidyayeva V.M., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Krylenko I.V.,
Krylenko I.N., Viskhadzhieva K.S.,¹ Bobov R.A., Marodaseynov F.O.,
Pirmamadov U.R., Raimbekov Y.K., Shafiev G.V.²

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia

²Aga Khan Agency for Habitat, Tajikistan

Abstract: The article discusses the results of a study of mountain lakes in the River basin Gunt and outburst floods and debris flows, which can result from the most potentially hazardous lakes. Compiled catalog of lakes of the River Gunt, in which the areas of the lakes are calculated and the origin of their basins is determined. For the largest and most hazardous objects, the most probable outburst scenarios were proposed. For the valleys, a two-dimensional model of the movement of water and mudflows was adapted. Based on the scenario calculations, the planned distributions of flooding characteristics (maximum depth, flow rate) are obtained. Identified infrastructure and parts of settlements that are in the greatest danger of flooding and susceptible to possible destruction.

Введение

Актуальность исследования горных озер связана с опасностью их прорывов и возникновением при этом катастрофических паводков и селей. Вероятность прорывов выше у ледниковых и завальных горных озер. Под прорывом озера будем понимать быстрое опорожнение озерной котловины, вызывающее значительное повышение расхода воды в долине реки ниже по течению. Термин GLOF (glacier lake outburst flood) используется при описании быстрого спуска ледникового озера (Dunster, 2011; Bishop et al, 2011). Также встречается понятие перелив (излив) озера, под которым понимается менее интенсивное опорожнение озерной котловины обычно без ее разрушения, вызывающее увеличение расхода воды в нижележащей долине.

В настоящее время имеется внушительный объем публикаций, касающихся прорывных паводков (как уже произошедших, так и потенциальных) в различных странах мира. Последствиями прорывов и переливов ледниковых и завальных озер становятся паводки (прорывные, гляциальные паводки), селевые паводки, наносоводные паводки и сели в нижележащих речных долинах, связанные с увеличением расходов и поднятием уровней воды в реках.

На современном этапе данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют составлять актуальные региональные каталоги озер на большие территории, (Petrov et al.,

2017, Kapitsa et al., 2017, Quincey et al., 2007, Che et al., 2005, Bolch et al., 2008, Govindha et al., 2013), в том числе с применением методов автоматизированного дешифрирования (Huggel et al., 2002; Kääb et al., 2005; Strozzi et al., 2012). Активно проводились работы по оценке степени прорывоопасности озер (Huggel et al., 2004; Shrestha et al., 2007, 2010; Коновалов, 2009; Ives et al., 2010; Mergili et al. 2011; Mool, 2011; Emmer, Vilimek, 2013; Fujita et al., 2013). Большая часть этих работ основана на расчетах разного рода количественных характеристик (объемов озер, расходов паводков, гидрографов стока и т. д.). Однако важно отметить, что определение этих характеристик с высокой степенью точности представляется крайне сложной задачей, поскольку зачастую в распоряжении исследователя имеются лишь данные дистанционного зондирования, не всегда достаточно точные.

При изучении горных озер в Таджикистане возникают логистические трудности, связанные со сложной геополитической обстановкой и трансграничным положением горных территорий.

Горным озерам Таджикистана и их прорывам посвящены следующие работы (Долгушин, 1993; Ибодзода, 2008; Коновалов, 2009; Шнайдер, 2005; Яблоков, 2009; Mergili, Schneider, 2011; Пирмамадов, 2013; Шафиев, 2013; Gruber, Mergili, 2013; Mergili et al., 2013; Komatsu Watanabe, 2014; Коновалов, Рудаков, 2016 и др.).

Целью исследования является выявление наиболее опасных горных озер бассейна р. Гунт и определение возможных зон затопления на территории Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) в восточной части Таджикистана. Для достижения поставленной цели выполнены следующие задачи: проведены непосредственно полевые обследования и измерения, описаны котловины и долины, разработаны наиболее вероятные сценарии прорывов озер, проведено двумерное математическое моделирование. Объекты исследования представляют потенциальную опасность для густонаселенных поселений в долине р. Гунт и важных инфраструктур-

ных объектов, особенно Памирского шоссе, г. Хорога и двух гидроэлектростанций.

В Таджикистане насчитывается 1449 озер с общей площадью зеркала 716 км² (0,5% территории). В большей части они имеют площадь не более 1 км², 78% озер расположено в горных областях на высоте 3500-5000 м (Мухаббатов, 2016).

Материалы и методы

Дистанционное зондирование

На предварительном этапе исследования все горные озера долины р. Гунт были идентифицированы на космических снимках Sentinel 2A MSI (<https://sentinel.esa.int>) (таблица 1). Предварительная обработка снимков заключалась в классификации пикселей (SC) (облака, облачные тени, растительность, почвы / пустыни, вода, снег и т. д.) и атмосферной коррекции (S2AC) (преобразование коэффициента отражения TOA в коэффициент отражения BOA) (Richter, Schlöpfer, 2005; Mayer, Kylling, 2005). Обработка снимков Sentinel 2A проводилась в программе SNAP, а последующий анализ проводился в программе ArcMap 10.1. Водораздельная линия бассейна р. Гунт была выделена с использованием космических снимков и, дополнительно, топографических карт масштаба 1:100000 (даты съемки 1959, 1969, 1978, 1979 гг.).

Таблица 1.

Таблица использованных данных

Космические снимки Sentinel 2A
S2A_MSIL1C_20180730T054641_N0206_R048_T43SCB_20180730T083546
S2A_MSIL1C_20180918T054631_N0206_R048_T43SDB_20180918T085748
S2A_MSIL1C_20180819T054641_N0206_R048_T43SDB_20180819T090536
S2A_MSIL1C_20180901T055631_N0206_R091_T43SBC_20180901T081007
S2A_MSIL1C_20180901T055631_N0206_R091_T42SYG_20180901T081007
S2A_MSIL1C_20180918T054631_N0206_R048_T43SCC_20180918T085748
S2A_MSIL1C_20180911T055631_N0206_R091_T43SCC_20180911T090755
S2A_MSIL1C_20180928T054631_N0206_R048_T43SCC_20180929T141745
S2A_MSIL1C_20170718T055641_N0205_R091_T43SBB_20170718T060226

Для обнаружения водных объектов с помощью много-спектральных снимков широко используются следующие индексы: NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI, AWEI (Xu, 2006; Rokni et al, 2014; Катаев, Бекеров, 2017 и др.). Наиболее распространенным является индекс нормированной разности вод (NDWI) (McFeeters, 1996), который рассчитывается на основе канала ближнего инфракрасного диапазона (B03 Sentinel-2) и канала в коротковолновом инфракрасном (NIR или B08 Sentinel-2). Таким образом, разрешение полученного после классификации снимка сохранится равным 10 м. В статье (Du et al., 2016) предлагается использовать индекс MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) без потери разрешения снимка, с использованием каналов (B03 Sentinel-2) и (MIR или B11 Sentinel-2), путем преобразования снимка с каналом B11 до разрешения 10 м. Индекс AWEI (Automated Water Extraction Index) использует каналы B03, B11, B08 и SWIR, для которого можно использовать как канал B11, так и канал B12. Для исключения из классификации голых скал или грунтов и снега использовался индекс NDVI, который рассчитывается на основе каналов B08 и B04. Значения NDVI около 0 позволяют исключить данные объекты из классификации. Значения $NDVI < -0,2$ также, дополнительно, указывают на наличие водной поверхности.

Полевые исследования

Для выявленных на космических снимках озер была измерена площадь и определено происхождение их котловин. Детальные полевые исследования проводились на тех озерах, которые имели наибольшую площадь, были расположены достаточно близко к населенным пунктам и, согласно предварительным оценкам, оказались наиболее потенциально опасными.

Объектами детального исследования в полевых условиях стали следующие озера: оз. Барсемкуль, озера Чандинкуль, Дурумкуль и Зардивкуль в бассейне р. Шахдара, оз. Риваккуль, оз. Нимацкуль, оз. Турумтайкуль, оз. Упалы, ледниковые озера в верховьях р. Шорипдара, оз. Варшезкуль (нижнее), озера у ледника Шазуд, озера Куленкуль и Оккуль (Рис. 1).

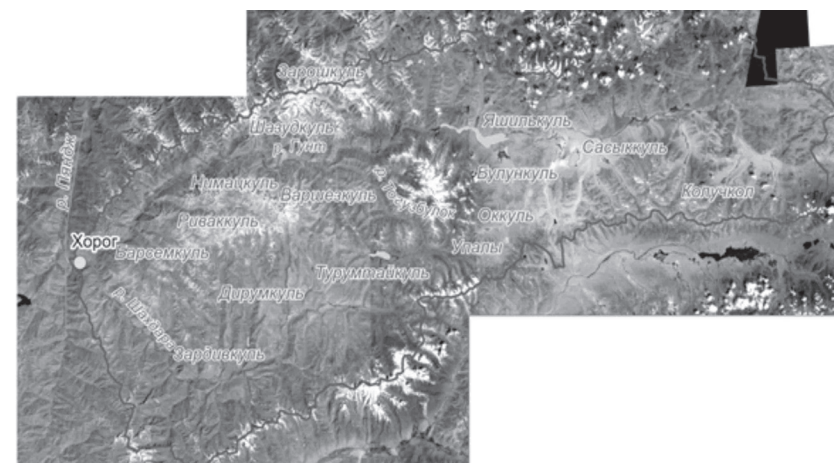


Рис. 1. Гидрографическая схема бассейна р. Гунт.

На ключевых участках горных долин проводились полевые обследования, которые заключались в обходе контуров озер с помощью GPS-приемников, описании их берегов. При описании оценивалась возможность схода обвалов и оползней и возникновения волн вытеснения. Полевые работы проводились в несколько этапов: на оз. Барсемкуль — август 2015 г., октябрь 2016 г., май 2017 г., на оз. Зардивкуль и Чандинкуль — июль 2017 г., Турумтайкуль, Упалыкуль, Нимацкуль, Риваккуль — сентябрь 2017 г., Варшезкуль, Шазудкуль, Шазудкуль, Куленкуль, Оккуль — июль, август 2018 г.

Батиметрические съемки озёр проводились с надувной лодки с помощью эхолотов Lowrance Hook и Lowrance Elite 5 с автоматической GPS-привязкой. Для расчетов объёмов и средних глубин была использована программа ArcMap 10.1-10.5. Для составления карты ставились дополнительные точки, по которым с помощью инструмента программы ArcGIS “ToroTo Raster” был построен растр глубин. С помощью инструмента “Contour” были построены изобаты.

При полевых работах в наиболее труднодоступных частях бассейнов дополнительно использовался беспилотный летательный аппарат DJI Phantom 4, который позволяет вы-

полнять аэрофотосъемку местности и создавать топографические планы масштаба 1:500-1:1000. Результаты съемки с БПЛА были преобразованы в цифровые модели местности, которые были использованы для получения морфометрических характеристик плотин и при дальнейшем двумерном математическом моделировании прорывных паводков и селей.

Оценка опасности и зоны затопления

После детальных полевых работ были предложены наиболее вероятные сценарии прорыва данных горных озер. Для озер, подпруженных льдом, легкоразмываемой мерзлой мореной или мореной с погребенным льдом, возможно два сценария прорыва — опорожнение через внутриледные/внутриморенные каналы стока, всплытие целиком или частично ледяной плотины, когда глубина озера превысит приблизительно 9/10 высоты ледяного барьера (Виноградов, 1977). При этом опорожняется до 100% объема озера. Для моренных или завальных озер прорыв возможен в результате переполнения чаши озера при длительно наблюдающихся экстремально высоких температурах воздуха и интенсивных ливневых осадках, при этом перелив сопровождается разрушением плотины путем оползания или эрозии.

Озера, подпруженные устойчивым скальным ригелем, или завальные озера с высокими плотинами могут прорываться в результате образования волн вытеснения при попадании в чашу лавин из снега и льда, оползней, обвалов, селей, камнепадов или во время землетрясений (Керемкулов, 1985). Горные озера очень восприимчивы к подобным воздействиям, потому что часто имеют крутые берега и узкие очертания котловин (Ерохин, Шатравин, 2001). Образование и объем волн вытеснения зависят от объема озера, высоты падения и скорости попадающей в озеро лавины или камнепада и селя, а также от характера склонов, примыкающих к озеру.

Сценарии прорыва озер были описаны с помощью гидрографов прорыва. Оценка максимальных расходов воды при прорыве озер проводилась на основе эмпирических формул

(Huggel et al., 2004 и др.). Кроме того, учитывались экспертные оценки, данные рекогносцировочных обследований и региональные закономерности.

Моделирование прорывных потоков является основой для определения зон их потенциального воздействия, поэтому зачастую оно выступает инструментом при оценке рисков, связанных с прорывами ледниковых озер (Bajracharya et al., 2007; Budhathoki et al., 2010; Worni et al., 2013, 2014; Schneider et al., 2014; Somos-Valenzuela, 2015 и др.). В данном исследовании применялось двумерное математическое моделирование движения водных и селевых потоков на основе программного комплекса FLO-2D PRO (O'Brien et al., 1993), которое позволило на завершающем этапе исследования получить характеристики затопления и выявить наиболее уязвимые объекты в нижележащих долинах (Кидяева и др., 2018).

Результаты

Горные озера бассейна р. Гунт

Всего по данным дистанционного зондирования в 2018 г. в бассейне р. Гунт было расположено 644 горных озер площадью более 500 м², что значительно превышает предыдущие оценки (Ресурсы..., 1971; Словарь..., 2005). По классификации озер мира П.В. Иванова (Мякишева, 2009), 602 озера в бассейне Гунта относятся к озеркам (площадь менее 0,1 км²), 31 озеро — очень малые (0,1-1 км²), 10 озер — малые (1,1-10 км²) и одно озеро — среднее (10,1-100 км²). Крупнейшими озерами бассейна являются Риваккуль, Колучкол, Тузкель, Дурумкуль, Оккуль, Булункуль, Чапдара, Зарошкуль, Сасыккуль, Турумтайкуль и Яшилькуль. Суммарная площадь водных объектов бассейна в 2018 г. составляла 89,4 км², причем более половины этой площади занимают два крупнейших озера — Турумтайкуль (9,0 км²) и Яшилькуль (37,3 км²). Таким образом, озерность бассейна в 2018 г. составила 0,65%.

Из идентифицированных водных объектов 368 (57%) имеют ледниковое происхождение, 153 (18%) — завальное, 4 озера — антропогенные, остальные имеют смешанное

происхождение котловин — моренное и завальное. Среди ледниковых озер выделяются приледниковые (76 объектов), моренные (248), каровые (19), карово-моренные (15) и наледниковые озера (10). Наледниковые озера эфемерные, и их количество может меняться в течение года. Крупнейшими ледниковыми озерами бассейна являются (более 50 тыс. м²): приледниковые — озера у ледника Шазуд, Рогкуль, Богчигир, Зарошкуль верхнее, моренные — озера в верховьях реки Ривакдара, Варшезкуль, Зарошкуль нижнее, Ортобогчигир, каровые — Варшезкуль верхнее, Нимацкуль, Чапдара, Гурумды (рис. 2). Указанные приледниковые и моренные озера представляют наибольшую потенциальную опасность прорыва и образования селевых потоков.

Завальные озера в бассейне подпружены обвалами и оползнями, лавинными и селевыми конусами выноса, каменными глетчерами. Крупнейшее завальное озеро — Яшилкуль, другими относительно большими являются Зардивкуль, Упалы, Риваккуль, Колучкол, Тузкель, Оккуль, Булункуль, Сасыккуль, Турумтайкуль и другие (см. рис. 2).

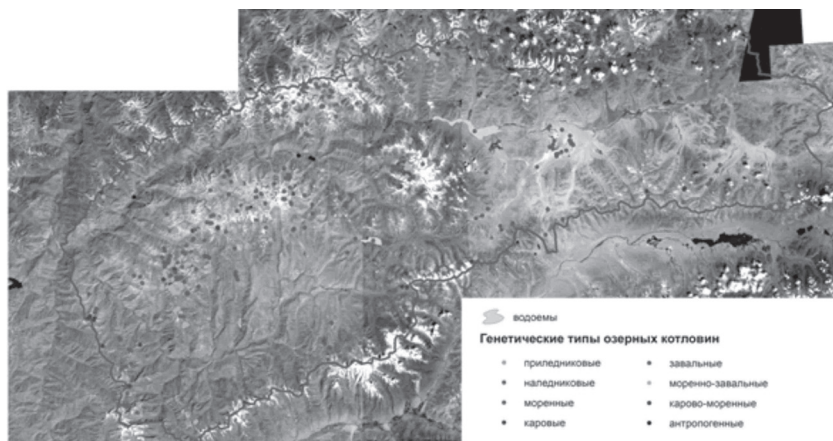


Рис. 2. Горные озера бассейна р. Гунт.

Результаты полевых исследований на 13 озерах бассейна р. Гунт представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты промеров горных озер в бассейне р. Гунт

№	Название озера	Площадь, млн м ²	Объем, млн м ³	Ср. глубина, м	Максимальная глубина, м	Высота, м н.у.м.	Ширина, м	Длина, м	Периметр, м	Тип плотины
1	Барсемкуль	0,286	1,88	6,5	20,0	2375,8	128	2226	5688	Завальное
2	Дурумкуль	1,673	52,62	31,4	72,2	3356	580	2880	7540	Моренно-завальное
3	Зардивкуль	0,573	1,80	3,1	11,4	3634	367	1560	4100	Завальное
4	Чандинкуль	0,380	4,0	10,5	20,0	3674	397	955	2966	Моренно-завальное
5	Риваккуль	1,143	7,77	6,8	16	3830	458	2495	5811	Завальное
6	Нимацкуль	0,482	11,34	23,5	54,6	4430	362	1330	3532	Каровое
7	Турумтай-куль	9,015	119,48	13,2	28,3	4208	1339	6730	16940	Моренное
8	Упалыкуль	0,809	0,66	0,81	1,56	4220	622	1300	4604	Моренно-завальное
9	Варшезкуль нижнее	0,17	1,94	11,4	24,5	4535	227	750	2290	Моренное
10	Шазудкуль – 1 (Якум)	0,066	0,41	6,2	14,3	4505	144	460	1833	Приледниковое
11	Шазудкуль – 2 (Дуюм)	0,057	0,45	7,9	19,3	4567	145	392	1320	Моренное
12	Куленкуль	0,64	8,26	12,7	27,4	4290	395	1620	4620	Моренно-завальное
13	Оккуль	1,87	29,48	15,8	38,7	4463	727	2570	6612	Завальное

Описание прорывоопасных озер и вероятные сценарии прорывов

В результате полевых исследований было выявлено, что озера Турумтайкуль и Упалыкуль не представляют угрозы прорыва. Выше озера Упалыкуль расположен каскад ледниковых озер, которые могут прорваться. Вход прорывного селя в озеро Упалыкуль, по нашей оценке, не приведет к его прорыву, однако в случае большого объема может заполнить котловину озера и пойти дальше вниз по долине. С другой

стороны, ниже точки перелива с левого борта возможны обвалы и лавины, которые повысят уровень плотины и могут привести к подъему уровня и увеличению объема воды до 2–2,3 млн м³, а затем прорыву. Третий возможный сценарий – непрорывной селя, начинающийся в долине Упалы ниже озера от устья правого притока. Ниже озера Турумтайкуль в долине р. Южный Тогузбулок возможно формирование селевых потоков. На участках р. Южный Тогузбулок и р. Упалы возможно прохождение селевых потоков с объемом водной составляющей 1 млн м³, максимальным расходом селя около 350 м³/с.

Ледниковые озера Варшезкуль и Шазудкуль

Долины Варшездара и Шазуддара врезаются в противоположные склоны долины р. Гунт с левого и правого берега. Озеро Варшезкуль нижнее лежит в чаше, образованной мертвыми льдами бывшего языка ледника Варшез (рис. 3). Современный активный язык ледника находится на южном берегу озера в 100–150 м от уреза воды. Запруду озера Варшезкуль нижнее образует последний по времени образования конечно-моренный вал. Превышение его гребня над озером составляет от 5 до 25 м. Предположительно, большая часть вала все еще остается цельным ледовым телом, покрытым чехлом грубообломочной поверхностной морены, что повышает вероятность прорыва озера в случае протаивания льда.

Сток из озера подземный, вода просачивается непосредственно от уреза в пределах полукруглой просадки размером 80*80 м в пологом склоне перемычки. Вода выходит на дневную поверхность у основания вала-запруды в виде родников в полосе шириной около 100 м в 170 м от уреза озера. Фронт просачивания находится ниже уровня воды в озере на 12–15 м. Вода мутная, что указывает на преобладание свободного стока по подземным полостям.

Наиболее вероятный сценарий прорыва нижнего озера — развитие внутриледникового канала стока и медленное опорожнение озера. Согласно модели Виноградова (Виноградов,



Рис. 3. Озеро Варшезкуль нижнее. Перспективное фото Черноморца С.С. с БПЛА DJI Phantom 4 (июль 2018 г.).

1976), гидрограф такого прорыва имеет длительный пологий подъем (процесс разработки внутриледникового канала стока) и резкий спад (опорожнение остаточного объема озера). Максимальный расход прорыва оценивается в 100 м³/с, продолжительность опорожнения озера оценена в 12 ч. Объем водной составляющей селевого потока равен объему озера — 1,94 млн м³, соответственно объем селя — 2,98 млн м³, максимальный расход селевого потока — 153,8 м³/с.

Озеро Варшезкуль верхнее расположено в обособленном цирке на высоте 4788,6 м н.у.м., в правой части ледника Варшез. Озеро, вероятно, имеет небольшой поверхностный приток, замедленный водообмен и, вероятно, значительные глубины. Прорыв озера возможен в результате падения обвала. Его площадь по данным дистанционного зондирования 357 тыс. м², предполагаемая средняя глубина — 10 м, оценка объема — 3,57 млн м³. Предполагаем, что в случае падения обвала опорожнится половина его объема, т. е. 1,8 млн м³.

В результате прорыва верхнего озера нижнее прорвется полностью, т. е. к объему прорывного паводка добавится 1,94 млн м³. Таким образом, объем прорывного паводка составит 3,8 млн м³. Объем селевого потока может достичь 5,7 млн м³. Максимальный расход прорывного паводка при таком объеме оценивается в 650 м³/с, что соответствует расходу селевого потока 1000 м³/с. Предполагается, что продолжительность активного селевого процесса будет около 5 ч.

Каскад озер у ледника Шазуд (рис. 4) является одним из наиболее динамично развивающихся в бассейне р. Гунт. Все озера каскада окружены массивами льдов, лед находится и под дном озер, перекрытый тонким чехлом рыхлого материала. Крупных озер в каскаде три — Шазудкуль-Якум (нижнее), Шазудкуль-Дуюм (среднее), Шазудкуль-Сеюм, или озеро Рудого¹ (верхнее). За последние 10 лет появилось два новых приледниковых озера у краев языков ледника — озеро верхнее приледниковое и оз. Рудого, расположенное западнее оз. Шазудкуль-Дуюм, кроме того, в каскаде расположено еще несколько озер площадью около 500 м², в том числе наледниковых.

Самое верхнее озеро в каскаде наиболее молодое и, скорее всего, мелководное. Перемычка неустойчивая, наблюдается поверхностный сток, вероятность размыва в случае резкого увеличения стока с ледника высокая. Объем озера небольшой, но его прорыв может стать толчком к образованию прорывного паводка в нижележащих озерах.

Берега относительно пологие, образованы поверхностной мореной. Из озера наблюдается сток по поверхности моренной перемычки, в средней части которой образовывается

¹ Озеро Шазудкуль Сеюм (37°49'30.55» с.ш., 72°18'33.19» в.д.) образовалось не ранее 2008 г. Было обнаружено и исследовано экспедицией МГУ и Агентства Ага Хана по Хабитат в 2018 г. Официального названия не имеет. Предполагается обратиться в Государственный комитет по землеустройству и геодезии Республики Таджикистан с предложением о присвоении этому озеру названия «озеро Рудого» в память о выдающемся исследователе-географе, участнике экспедиции, профессоре А.Н. Рудом (1952–2018).

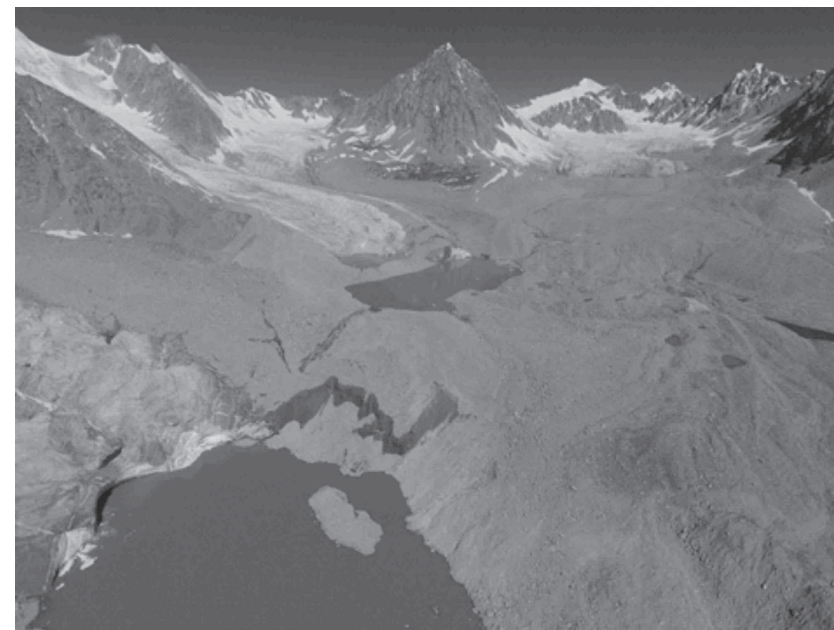


Рис. 4. Каскад ледниковых озер в долине р. Шазуддара. Перспективное фото Черноморца С.С. с БПЛА DJI Phantom 4 (июль 2018 г.).

врез, а в нижней — широкий конус выноса. У промоины есть потенциал регрессивного роста в сторону озера, особенно в случае прохождения паводка. В этом случае не исключено вскрытие в ложе погребенного льда с последующим резким врезанием в него.

Озеро Шазудкуль-Дуюм (среднее) является вторым крупным водоемом в каскаде. Озеро испытывает значительные трансформации в последнее десятилетие, что видно по космическим снимкам и по характерным процессам в береговой зоне.

Северо-западный берег озера образован языком ледника высотой до 15 м, остальные берега покрыты рыхлой поверхностной мореной, под которой находится ледовая толща, берега относительно пологие. Озеро Рудого на момент обследования было отделено от оз. Шазудкуль-Дуюм ледово-моренной перемычкой шириной 50–60 м и высотой 10–15 м. Плотина озера Шазудкуль-Дуюм представляет собой

гребень, сложенный ледовым массивом, перекрытый сверху крупнообломочными отложениями. В нижней части перемычке находится грот, сквозь который фильтруется вода из озера. Перепад высот от перелива до входа в грот составляет примерно 30 м. Вероятность разрушения перемычки высокая, причиной могут стать прорывной паводок сверху каскада, аномально высокое таяние и приток воды, падение в озеро крупных ледовых глыб или деградация льда в перемычке.

Озеро Шазудкуль-Якум (нижнее) находится в котловине между отступившим краем активного льда ледника Шазуд и его конечно-моренным валом. Западный и северный берега образуют открытые ледовые стены. Сток из озера проходит по слабовыработанному руслу с небольшими уклонами и расположен в юго-восточной части.

Расположение больших резервуаров с водой на поверхности деградирующего моренно-ледового массива предопределяет неустойчивость озерных плотин, нестабильность берегов и ложа водоемов. Наиболее вероятен прорыв среднего озера в каскаде. Предполагается, что в результате прорыва неустойчивая перемычка нижнего озера также размоется и весь объем вовлечется в поток. Объем прорывного паводка составит 860 тыс. м³ (410 тыс. м³ + 450 тыс. м³), максимальный расход воды — 200 м³/с. Приледниковые озера могут прорываться в течение относительно небольшого периода времени (Carrivick, Tweed, 2013), в данном случае предполагается — около 3 часов. В результате прорыва образуется селевой поток объемом 1323 тыс. м³ и максимальным расходом 307,7 м³/с. В случае если прорыв нижнего озера произойдет сам по себе, среднее озеро вероятнее всего прорвется следом из-за нарушения устойчивости подпруживающей его ледовой стенки. При таком сценарии процесс может развиваться более длительно, но объем прорывного паводка будет иметь схожие объемные характеристики.

В случае если разрушатся перемычки верхнего озера, произойдет прорыв всего каскада. Объем прорывного паводка в таком случае оценивается в 1200 тыс. м³, максимальный

расход прорывного паводка — 300 м³/с. В результате прорыва образуется селевой поток объемом 1846 тыс. м³ с объемной концентрацией наносов 0,35 и максимальным расходом 461,5 м³/с. Полевые исследования каскада озер Шазудкуль, анализ космических снимков и съемки с БПЛА показали, что вероятно увеличение объема озер в ближайшее десятилетие. При увеличении на 20% объем прорывного паводка может достичь 2000 тыс. м³, максимальный расход — 450 м³/с. В результате прорыва образуется селевой поток объемом 3077 тыс. м³ с объемной концентрацией наносов 0,35 и максимальным расходом 692,3 м³/с.

Озеро Риваккуль

Озеро Риваккуль расположено в средней части долины р. Ривакдара, левого притока р. Гунт. Озеро подпружено обвалом, сошедшим с левого борта долины. Высота обвала над урезом воды — около 20 м, ширина пониженной части плотины, по которой возможен перелив, — около 500 м, длина продольного профиля плотины — 500-750 м. Выше озера в многочисленных долинах-притоках и у ледников расположено 22 озера, из них 4 приледниковых. Два моренных озера в верховьях имеют относительно большую площадь (95 тыс. и 114 тыс. м²) и могут прорваться. В случае их прорыва и схода селевых потоков в озеро Риваккуль, а также в случае падения обвала в озеро возможно образование волны перелива, которая не разрушит подпруживающую перемычку. По наши оценкам, объем воды, перелившейся в долину, может составлять до 25 тыс. м³.

В случае прорыва оз. Риваккуль и полного разрушения плотины объем излившейся воды оценивается в 7,7 млн м³, максимальный расход прорывного потока может составить 454 м³/с (Коновалов и Рудаков, 2016). Поток трансформируется в сель, в который будет вовлечен материал плотины и дополнительный материал в долине, максимальный расход — около 700 м³/с. По нашим оценкам, подобный сценарий может развиваться в течение длительного периода времени — до 8–12 часов.

Озеро Нимацкуль

Озеро Нимацкуль расположено в обширном каре, в верховьях которого сохранилось несколько небольших ледников. Озеро подпружено достаточно устойчивой плотиной, ее разрушение маловероятно, из озера наблюдается сток воды. Ниже плотины долина сложена рыхлыми осыпными отложениями. Прорывной паводок возможен в случае землетрясения и падения в озеро крупного обвала с правого берега озера. Объем обвала может быть до 1500 тыс. м³. Волна перелива может быть высокой благодаря фактическому отсутствию превышения перемычки озера над урезом воды. Ширина пониженной части плотины, по которой возможен перелив, достигает 300 м. По нашим оценкам, объем воды, перелившейся в долину, может составлять около 250 тыс. м³. Волна пройдет гребень плотины за несколько секунд, но у подножья плотины трансформируется в паводок продолжительностью около 1,5 часов. Максимальный расход воды паводка будет составлять 100 м³/с. Паводочная волна может набрать материал на плотине и ниже по долине до 250 тыс. м³. Максимальный расход селя составит 200 м³/с.

Барсемкуль

Озеро Барсемкуль образовалось в июле 2015 г. в русле р. Гунт после схода серии селевых потоков по правому боковому притоку — ручью Барсемдара. Селевой процесс продолжался больше недели, в результате были разрушены и затоплены десятки зданий в селениях Барсем и Колхозобод, более 2 км автодороги, мосты, сельхозугодия и другие объекты инфраструктуры. Объем селевых отложений на конусе выноса составил 4,2 млн м³ (Keiler et al, 2018), площадь зоны аккумуляции — около 400 тыс. м² (Докукин и др., 2019). Максимальная площадь озера после его образования составила 378 тыс. м², а объем — 2,93 млн м³ (Черноморец и др., 2015). В результате прокладки канала на конусе выноса площадь озера Барсемкуль уменьшилась до 300 тыс. м² (Докукин и др., 2019).

Объем прорывного паводка из оз. Барсемкуль (при незначительном понижении отметки прорана на 2 м) может составить 800 тыс. м³, максимальный расход излива оценивается в 200 м³/с.

Возможен повторный сход селя по реке Барсемдара, которая признана селеопасной с активными селевыми очагами. В этом случае высота селевого конуса выноса в районе селения Барсем увеличится на 5–10 м, следовательно, уровень оз. Барсемкуль поднимется. Объем вырастет на 1,6–3 млн м³ и может быть вовлечен в образование нового прорывного паводка и селя. Максимальный расход может достичь 400 м³/с, а при наложении на пик летних паводков — до 620 м³/с. Объем селя оценивается в 4,5 млн м³, максимальный расход селевого потока составит 770 м³/с.

Влияние на устойчивость плотины оз. Барсемкуль может оказать его левый приток, р. Шарипдара, в верховьях которой расположен каскад ледниковых озер. В верховьях р. Шарипдара может образоваться катастрофический сел, аналогичный Барсемскому, объемом до 4 млн м³.

Завальные озера в бассейне р. Шахдары

Опасность для г. Хорога могут оказать процессы, происходящие в долине р. Шарипдара, где расположено 182 озера (по данным на 2017–2018 г.). Наиболее крупные озера (более 50 тыс. м²) — Дурумкуль, Зардивкуль, Чандинкуль (Ойкуль), два озера на правом притоке р. Чандиндара и оз. Шавившкуль.

По результатам полевых обследований обнаружено, что оз. Дурумкуль моренно-завального типа — вероятно, обвал с левого борта долины наложился на древнюю моренную грядку. В теле обвала имеется проран, по которому идет сток из озера. Падение высоты от уреза озера до подножья плотины составляет около 100 м на 1250 м по руслу реки, вытекающей из озера. Высота подпруживающей озеро плотины в наиболее высоком месте составляет 60 м над уровнем озера, ширина плотины — от 400 до 1000 м. Прорыв озера возмо-

жен при падении обвала объемом около 600 тыс. м³ с левого берега озера, при этом образуется волна вытеснения, но плотина озера должна устоять. Объем паводка может быть около 300–350 тыс. м³, а максимальный расход оценивается в 60 м³/с. Объем селевого потока может достигнуть 450–500 тыс. м³. Максимальный расход селевого потока достигнет 100 м³/с. Основной объем селевого потока сойдет за два часа или меньшее время, учитывая молниеносный характер похождения волн вытеснения.

Озеро Зардивкуль подпружено обвалом высотой более 50 м, шириной около 600 м, длиной вдоль русла около 1000 м. Несмотря на то, что на топографических картах 1976–1980 гг. из озера изображен сток воды, полевые обследования показали, что стока нет, и нет даже следов русловых потоков по плотине. Потеря устойчивости плотины теоретически возможна, но вероятность этого невелика. Объем прорывного паводка в случае разрушения плотины может составить 300 тыс. м³, максимальный расход излива из озера — 65 м³/с.

Озеро Чандинкуль (Ойкуль) по происхождению похоже на оз. Дурумкуль, т. к. оно подпружено обвалом, возможно, перекрывшим древнюю морену. Обвал сошел с левого борта реки Чандиндара, однако в нем образовался треугольный врез, по которому сейчас осуществляется сток из озера. Глубина вреза — 55–60 м. Длина обвала вдоль русла — около 1100 м, ширина обвала — 1100 м. Высота обвала — до 100 м. Прорыв озера возможен при дальнейшем врезе реки в рыхлое отложение обвала. При прорыве оз. Чандинкуль максимальный объем излива воды оценивается в 2 млн м³, максимальный расход — 420 м³/с, время излива — 2 ч.

Подверженные зоне затопления территории

С помощью двумерного математического моделирования предложенных сценариев прорывов озер были выявлены зоны затопления нижележащих территорий и оценена потенциальная опасность. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты моделирования вероятных сценариев прорывов горных озер

Долина реки	Прорыво-опасное озеро	Населенные пункты в зоне затопления	Минимальное время добегания до населенных пунктов, ч	Максимальные скорости селевого потока, м/с	Глубины затопления, м
Шазуддара	Каскад Шазудкуль	п. Шазуд	1,5	до 5	3
Варшездара	Варшезкуль	п. Варшез	2	5-7	2-3
Ривакдара	Риваккуль	п. Ривак, частично п. Сижд и автомобильная дорога на левом берегу р. Гунт, ГЭС Памир-1	1,8		до 5
Нимацдара	Нимацкуль	Шитам, Нимац, автомобильная дорога на левом берегу р. Гунт и ниже по р. Гунт	1	4-5, до 10	2-3
Гунт	Барсемкуль	Часть автомобильной дороги, п. Бердикобод, Манем, Питодашт, Богев, Даштак, Сангов, Бидурд, отдельные строения в восточной части г. Хорог	2	до 7	до 2
Дирумдара – Шахдара	Дурумкуль	Строения и пастбища в пойме р. Шахдара, п. Сежд г. Хорог	2	3-5	1
Зардивдара – Шахдара	Зардивкуль		2,2	до 2	1
Чандиндара – Шахдара	Чандинкуль		7,5	до 2	до 1

Заключение

Для малоисследованной территории Таджикистана особенно актуально составление каталога горных озер для выявления в дальнейшем наиболее опасных объектов и селевых очагов. С использованием многоспектральных снимков в бассейне р. Гунт обнаружено более 600 горных озер, большая часть из которых образовалась в последние десятилетия. Составлен каталог горных озер бассейна р. Гунт, в котором рассчитаны их площади и генетический тип озерных котловин. Не более десятка озер были описаны в советский период, в связи с чем появилась необходимость провести детальные полевые исследования и батиметрические измерения на новых ледниковых озерах и на наиболее опасных завальных озерах. В исследовании дана гидрологическая и геоморфологическая характеристики некоторых озер бассейна р. Гунт и выявлены характеристики для оценки потенциальной опасности их прорыва. Предложены наиболее вероятные сценарии их прорывов, характеристики прорывных паводков и селей. С помощью двумерного математического моделирования в долинах, расположенных ниже прорывоопасных озер, рассчитаны скорости движения селевых потоков, площади затопления, время добегания, глубины затопления и перечислены населенные пункты, нуждающиеся в защите.

Работа выполнена по теме I.7 AAAA-A16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (ГЗ).

Список литературы:

1. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. — Л.: Гидрометеиздат. — 1977. — 156 с.
2. Долгушин Л.Д. Пульсирующие ледники. — /В кн.: Оледенение Памиро-Алая. — М.: «Наука» — 1993. — с. 219–226.
3. Ибодзода Х. Улучшение управления наводнениями в Республике Таджикистан. — /В сб.: Центральная Азия: сокращение стихийных бедствий, связанных с водой.

Сборник докладов. Посвящается Международной конференции по сокращению стихийных бедствий, связанных с водой. — Душанбе: 2008. с. 52–55.

4. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУРа. — 2017. — Т. 20. — № 4. — С. 105–108.
5. Керемкулов В.А. Морфометрические характеристики и классификация моренных озер. // Селевые потоки. 1985. С. 36–47.
6. Ерохин С.А., Шатравин В.И. Гляциальные озера как гидроэкологические объекты и факторы их прорывоопасности // Вода и устойчивое развитие Центральной Азии. Фонд «Сорос — Кыргызстан». — 2001. — С. 93–98.
7. Кидяева В.М., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.Н., Докукин М.Д., Висхаджиева К.С., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О., Раимбеков Ю.Х., Курбонмамадов Д.А. Моделирование прорывов горных озер и селевых потоков в Горно-Бадахшанской автономной области, Таджикистан. // Международная научно-практическая конференция «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова» (28–30 марта 2018 г., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия). Санкт-Петербург: — 2018. — с. 897–902.
8. Коновалов В.Г. Дистанционный мониторинг прорывоопасных озер на Памире // Криосфера Земли. 2009. — № 4. — с. 80–89.
9. Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Дистанционное определение резервного объема прорывоопасных высокогорных озер // Лед и Снег. — 2016. — т. 56. — № 2. — 235–245.
10. Мухаббатов Х.М. Водные ресурсы Таджикистана и проблемы водопользования в Центральной Азии // Проблемы постсоветского пространства. — 2016. — № 3. — С. 29–45.
11. Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. — СПб: Изд. РГГМУ. — 2009. — 106 с.

12. Пирмамадов У. Селевые потоки в результате прорывов высокогорных гляциальных озер на территории Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана (из опыта работ международной организации «Фокус Гуманитарная помощь»). //Геориск. — 2013. — с. 20–23.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Бассейн р. Амударьи. — 1971. — 472 с.
14. Словарь современных географических названий / Рус. геогр. об-во. Моск. центр; /Под общ. ред. акад. В. М. Котлякова. Институт географии РАН. — Екатеринбург: У-Фактория, 2006.
15. Теоретические вопросы классификации озер /Под ред. Н.П. Смирнова. - СПб. — 1993. — 186 с.
16. Черноморец С., Савернюк Е., Бобов Р., Асмаев Н., Мавлоназаров О., Мирмамадов Д., Пирмамадов У., Шафиев Г. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). //Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии. //Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова. — Санкт-Петербург. — 2015. — с. 261–264.
17. Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Бобов Р., Асмаев Н., Мавлоназаров О., Мирмамадов Д., Пирмамадов У., Шафиев Г. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // Международная научно-практическая конференция «Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии». — Санкт-Петербург. — 2015. — с. 261–264.
18. Шафиев Г.В. Особенности проявлений селевых процессов и опыт международной организации «Фокус Гуманитарная помощь» в разработке современных методов защиты от них в условиях Горного Бадахшана (Таджикистан). //Геориск. — 2013. — № 1. — С. 53–59.
19. Шнайдер Ж. Удаленные геологические угрозы на Юго-Западном Памире, ГБАО, Таджикистан // Краткий отчет, составленный Швейцарским управлением по развитию и сотрудничеству (ШУРС) для МЧС Республики Таджикистан. — М.: Гмендел, 2005. — 139 с.
20. Яблоков А.А. Сели Таджикистана. — Сборник научных трудов (ОАО «Севкавгипроводхоз»). — Пятигорск: — 2009. — Вып. 18. — С. 88–102.
21. Bajracharya B., Shrestha A.B., Rajbhandari, L. Glacial lake outburst floods in the Sagarmatha region: hazard assessment using GIS and hydrodynamic modeling. Mountain Research and Development, 2007, V. 27(4), pp. 336-344.
22. Bishop M.P., Björnsson H., Haeberli W., Oerlemans J., Shroder J.F., Tranter M. 2011. Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Springer Science & Business Media.
23. Bolch T., Buchroithner M. F., Peters J., Baessler M., Bajracharya S. Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/Nepal using space borne imagery// Natural Hazards and Earth System Science. 2008. №6. pp. 1329-1340.
24. Budhathoki K.P., Bajracharya O.R., Pokharel B.K. Assessment of Imja Glacier Lake outburst flood (GLOF) risk in Dudh Koshi River Basin using remote sensing techniques. Journal of Hydrology and Meteorology, 2010, V. 7(1), 75-91.
25. Carrivick J.L., Tweed F.S. Proglacial lakes: character, behavior and geological importance //Quaternary Science Reviews. — 2013. — V. 78. — pp. 34-52.
26. Che T., Li X., Mool P. K., Xu J. Monitoring glaciers and associated glacial lakes on the east slopes of Mount Xixabangma from remote sensing images// Journal of Glaciology and Geocryology. 2005. №. 6. pp. 801-805.
27. Du Y., Zhang, Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band // Remote Sensing. — 2016. — V. 8. — №. 4. — p. 354.
28. Dunster K. Dictionary of natural resource management. — UBC Press, 2011. — 380 p.

29. Emmer A., Vilimek V. Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: an example from the Cordillera Blanca (Peru) // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. №13. pp. 1551–1565.
30. Fujita K., Sakai A., Takenaka S., Nuimura T., Surazakov A.B., Sawagaki T., Yamanokuchi T. Potential flood volume of Himalayan glacial lakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. №13. pp. 1827–1839.
31. Govindha Raj K.B., Remya S.N., Vinod Kumar K. Remote sensing-based hazard assessment of glacial lakes in Sikkim Himalaya // *Current science*. 2013. №3. pp. 359-364.
32. Gruber, F. E., & Mergili, M. Regional-scale analysis of high-mountain multi-hazard and risk indicators in the Pamir (Tajikistan) with GRASS GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, V. 13(11), p. 2779.
33. Huggel C., Haeberli W., Kääb A., Bieri D., Richardson S. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps // *Can. Geotech. J.*, Vol. 41, 2004: pp. 1068-1083.
34. Huggel C., Kääb A., Haeberli W., Teyssere P., & Paul, F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2002. – V. 39. – №. 2. – p. 316-330.
35. Ives J.D., Shrestha R.B., Mool P.K Formation of glacial lakes and GLOF risk assessment in the Hindu Kush–Himalayas [Электронный ресурс]: Kathmandu: ICIMOD. 2010.
36. Kääb A., Vollmer M. Surface geometry, thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2000. – V. 11. – №. 4. – p. 315-326.
37. Kapitsa V., Shahgedanova M., Machguth H., Severskiy I., Medeu A. Assessment of evolution and risks of glacier lake outbursts in the Djungarskiy Alatau, Central Asia, using Landsat imagery and glacier bed topography modelling, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1837-1856, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1837-2017>, 2017.
38. Keiler M., Zimmermann M., Bigler S., Fuchs S. Assessing a large-scale debris flow in Barsem, Tajikistan: exceptional size, duration and process chain. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2018. Vol. 20, p. 5405.
39. Komatsu T., Watanabe T. Glacier-Related Hazards and Their Assessment in the Tajik Pamir: A Short Review // *Geographical Studies*. – 2014. – V. 88. – №. 2. – P. 117-131.
40. Mayer B., Kylling A. The libRadtran software package for radiative transfer calculations-description and examples of use // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2005. – V. 5. – №. 7. – P. 1855-1877.
41. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International journal of remote sensing*. – 1996. – V. 17. – №. 7. – P. 1425-1432.
42. Mergili M., Schneider D., Worni R., Schneider J.F. Glacial lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: challenges in prediction and modelling // *5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Padua, Italy - 14-17 June 2011.
43. Mergili, M., & Schneider, J. F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, V. 11 (5), P. 1447.
44. Mergili M., Kopf C., Müllebner B., Schneider J.F. Changes of the cryosphere and related geohazards in the high-mountain areas of Tajikistan and Austria: a comparison. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2012, V. 94(1), pp.79-96.
45. Mergili M., Müller J.P., Schneider J.F. Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia). *Global and planetary change*, 2013, V. 107, pp. 13-24.
46. Mool P.K. Glaciers, glacial lakes and GLOF mapping and monitoring in Hindu Kush-Himalayas/ *Summer School «Natural Hazards and Disaster Risk Management in Mountains»*. 2011.
47. O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation // *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119 (2), 1993: 244-259.