

**РЕАКЦИЯ ВЫСОКОГОРНЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОГО ПАМИРА
НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ВАРШЕЗКУЛЬ
НИЖНЕЕ, ГОРНО-БАДАХШАНСКАЯ АВТОНОМНАЯ ОБЛАСТЬ,
ТАДЖИКИСТАН)**

© 2021 г. В. М. Кидяева¹, И. В. Крыленко¹, С. С. Черноморец^{1,*}, Е. А. Савернюк¹,
В. А. Куровская¹, Ю. Х. Раимбеков², Р. А. Бобов³, У. Р. Пирмамадов², Ф. О. Мародасейнов²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

² Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

³ Организация Ага Хана по развитию, Душанбе, Таджикистан

*E-mail: devdorak@gmail.com

Поступила в редакцию 08.06.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 09.04.2021 г.

Деградация оледенения Памира, рост площади озер, изменение стока рек, увеличение числа и риска опасных процессов преимущественно являются ответом на повышение летних температур. Показано влияние климатических изменений на рост потенциальной опасности возникновения прорывных паводков и селей в западном Памире, на примере типичного ледникового бассейна р. Варшездара, бассейн р. Гунт. Площадь ледниковых озер в бассейне р. Варшездара – Варшезкуль Верхнее, подпруженного скальными породами и Варшезкуль Нижнее, удерживаемого рыхлообломочной моренной перемычкой с ледяным ядром, – за последние 40 лет увеличилась в 3 раза (с 51.7 тыс. м² до 173 тыс. м²), а площадь ледника Варшез уменьшилась на 11% (с 7 млн м² до 6.2 млн м²). Детальные полевые исследования бассейна, включавшие батиметрическую съемку и аэросъемку, позволили выявить нестабильность водоудерживающей перемычки оз. Варшезкуль Нижнее, а в долине реки – наличие активного каменного глетчера с большим количеством материала, потенциально вовлекаемого в селевой поток. Измеренный объем оз. Варшезкуль Нижнее оценивается в 1.94 млн м³, а Варшезкуль Верхнее – в 3.57 млн м³. На основании соотношения обвальной массы и излитого объема воды предполагается, что при порыве одновременно двух озер опорожнится половина объема верхнего озера и полностью нижнее озеро, таким образом, объем прорывного паводка составит 3.725 млн м³. Максимальный расход прорывного паводка при таком объеме оценивается в 650 м³/с, что соответствует расходу селевого потока 1000 м³/с. По результатам математического моделирования получено, что скорость добегания такого потока до населенных пунктов составляет всего 0.1 ч, потоки затопят конус выноса, разрушат строения и автодорогу, расположенные на нем, на глубину до 3–4 м, при скоростях течения до 3 м/с. Полученные результаты можно принять во внимание при изучении других ледниковых бассейнов западного Памира, в которых расположены растущие ледниковые озера и существуют те же потенциально опасные обстановки.

Ключевые слова: ледниковые озера, опасные геоморфологические процессы, батиметрическая съемка, моделирование прорыва озера, FLO-2D, Агентство Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, озеро, подпруженное мореной

DOI: 10.31857/S0435428121030068

ВВЕДЕНИЕ

В результате таяния ледников увеличиваются площадь и число ледниковых озер [1–4], повышаются вероятность и интенсивность возникновения опасных геоморфологических явлений: оползней, обвалов [5, 6], селей, прорывов ледниковых озер [7, 8] и т.д. В результате рельеф речных долин в горных регионах может кардинальным

образом измениться. Например, в Горно-Бадахшанской автономной области (Таджикистан) в 2015 г. по долине руч. Барсемдара сошел разрушительный селевой поток, образовавший запрудное озеро и преобразивший долину р. Гунт [9].

Число опасных явлений в Средней Азии – суммарно гравитационных процессов, оползней и селей за последние 30 лет выросло (рассматри-

валось число явлений согласно базе данных [10]). Исследования Межправительственной комиссии по изменению климата [11] подтверждают, что геосфера входит в неравновесное состояние, при котором изменяется движение воздушных масс, растут температурные градиенты, появляется непредсказуемость погодных условий. При этом наибольшее влияние оказывается на наиболее геоморфологически динамичные горные районы [11].

В современных исследованиях подтверждается связь между изменением климата и усилением опасных гидрологических и геоморфологических явлений в разных частях Памира [12–18].

Исследования реакции среды на изменение климата на Памире необходимы для прогнозирования социально-экономического развития всей Средней Азии (Таджикистан, Киргизия, Узбекистан и Туркмения), так как в горных системах (Памир, Гиндукуш, Тянь-Шань) находятся истоки крупнейших рек Азии, значимых для хозяйственного использования. По долинам рек, подверженных геологическим опасностям в этом регионе, проходят основные транспортные артерии — Памирский тракт М-41, автотрасса Хорог-Ош и др., а в устьях рек и на конусах выноса чаще всего расположены горные населенные пункты [19–21].

В статье рассмотрены результаты исследований, проведенных совместно Агентством Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан и Географическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова в бассейне р. Варшездара, одном из селеопасных бассейнов ГБАО. Впервые описанные закономерности были исследованы локально на примере объекта, расположенного на западном Памире. Бассейн р. Варшездара (приток р. Гунт, бассейн р. Пяндж) является типичным для региона, он характеризуется наличием отступающего ледника, ледниковых озер и ледниковых форм рельефа, которые подвержены существенным изменениям под действием современного климата [13, 22]. Кроме того, в долине находится большое количество рыхлообломочного материала, достаточное для формирования селевых потоков катастрофической мощности. Особенность нашей работы — детальное полевое обследование данного бассейна, прямые измерения на ледниковом озере, крупномасштабная съемка ключевых участков долины, картографирование основных геологических опасностей в долине и моделирование возможных опасных процессов, с оценкой их влияния на населенные пункты.

Основная цель работы — оценка воздействия климатических изменений и, как следствие, деградации оледенения на рельеф, высокогорные озера и потенциальные природные опасности в бассейне р. Варшездара, основанная на детальных полевых данных. Были поставлены следующие

задачи — маршрутное обследование бассейна р. Варшездара и выявление геоморфологических особенностей долины и тенденций развития ледникового рельефа долины, проведение батиметрической съемки оз. Варшезкуль Нижнее, создание батиметрической карты озера, геоморфологическое описание водоудерживающей плотины и оценка ее устойчивости, математическое моделирование возможных сценариев прорыва озера. Важной задачей было создание карт затопления в пределах населенных пунктов, расположенных в устьевой части долины.

ДЕГРАДАЦИЯ ОЛЕДЕНЕНИЯ НА ПАМИРЕ

Большинство горных районов мира на современном климатическом этапе характеризуются повсеместной потерей массы и площади оледенения, а также увеличивающимися темпами деградации [23 и др.]. Площадь оледенения Памира составляет около 40×10^3 км² [24]. Площадь оледенения бассейна Гунта составляет 540 км² или 3.9% бассейна, общее количество ледников бассейна — 102 [25]. Исследуемый бассейн р. Варшездара расположен на северном склоне Шугнанского хребта, который характеризуется наличием крупных узлов оледенения площадью 150 км² [25].

Исследования по изменению площади оледенения проводились в отдельных районах Памира и на отдельных ледниках. Так, на восточном Памире у ледников выявлена тенденция к ускорению таяния с конца 1970-х годов до 2001 г., площадь ледников уменьшилась на 7.8% в течение 1978–1990 гг. и на 11.6% в 1990–2001 гг. [24, 26]. Изменения ледников восточного Памира преимущественно являются ответом на повышение летних температур [24, 14, 27]. Скорость отступления ледников на восточном Памире высока — до 5.3 м в год, по данным на 1990 г. [28].

В соседних горных регионах ледники также отступают, однако наблюдается большая региональная дифференциация. Так, в горах Памиро-Каракорума-Гималаев выявлено преимущественное отступление фронтов ледников с середины XIX века, кроме Каракорума [29, 23]. Небольшой прирост баланса массы ледников отмечался на западном Памире в 1999–2011 гг. [30]. Региональная дифференциация связана также с большим распространением сильно заморенных ледников, а также подвижек ледников [31]. В целом темпы деградации ледников Памиро-Каракорума-Гималаев в два-три раза меньше, чем глобальное среднее значение для ледников мира, исключая ледяные щиты Гренландии и Антарктики [30].

Согласно расчетам, основанным на разных климатических моделях [32], к 2050 г. в Таджики-

стане площадь оледенения уменьшится на 35–50% в бассейне р. Зеравшан и на 42–62% в бассейнах р. Варзоб и р. Фандарья. Максимальные оценки будущего подъема фирновой границы – 260–330 м [32].

В связи с климатическими изменениями меняется и режим водных объектов Памира. Например, по некоторым оценкам, к 2050 г. объем ледникового питания снизится до 49% в бассейне р. Варзоб и до 75% в бассейне р. Фандарья [32]. Исследования стока р. Гунт показали, что период 2011–2016 гг. характеризуется пониженной водностью, что связано с потерей объема талых ледниковых вод [33], при этом за период с 1940 по 2016 г. среднегодовой расход воды в реке снизился на $6.1 \text{ м}^3/\text{с}$, в половодье снизился на $21.3 \text{ м}^3/\text{с}$, а в межень повысился на $6.8 \text{ м}^3/\text{с}$ [33].

Согласно масштабным исследованиям озер в верховьях Аму-Дарьи [22], площадь ледниковых озер значительно увеличилась за период 1968–2009 гг. (всего 266 озер или 40.8% всех исследованных озер), в то время как площадь эрозионных и завальных озер осталась практически неизменной. Наибольший рост ледниковых озер наблюдается там, где отступающие языки ледников выходят на пологую поверхность.

Климатические изменения на Памире приводят к росту числа опасных геоморфологических явлений. Примерами могут служить катастрофические сели объемом около 1.2 млн м^3 в долине р. Дашт в 2002 г. [34–36], в долине р. Кофарендара в 2008 г. объемом около 200–300 тыс. м^3 , в 2015 г. по руч. Барсемдара объемом около 2 млн м^3 [9, 37].

В нашей работе рассматривается гипотеза о том, что, на примере одного из типичных бассейнов Памира – бассейна р. Варшездара, можно проследить указанные выше тенденции – деградация оледенения, рост площади озер, изменение стока рек, увеличение числа и риска опасных процессов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись высокогорные озера Варшезкуль Верхнее и Нижнее (рис. 1), участки долины р. Варшездара, пойменная часть реки и конус выноса. Верховья р. Варшездара располагаются на склонах Шугнанского хребта (максимальная высота – 5708 м над у. м.). Массив пика Скалистый – крупнейший современный узел оледенения Шугнанского хребта. С северо-восточного склона пика берет начало крупный ледник Варшез (длина более 6 км, площадь с притоками на начало 1980-х годов около 7.2 км^2), служащий основным источником водного питания Варшездары. Река впадает в р. Гунт в районе с. Варшез. Общая протяженность реки составляет

18 км [25], фактическая длина водотока от выхода воды из-под моренно-ледовой запруды оз. Варшезкуль Нижнее – 12.7 км. Площадь бассейна – 71.7 км^2 , долина имеет асимметричную форму, она вытянута с ЮЗ на СВ, длина долины около 17 км, максимальная ширина в средней части около 7 км. Нижняя часть долины используется для выпаса скота и сельскохозяйственных работ, в приустьевой части расположены кишлаки Варшез и Абуали Сино.

В ходе полевых исследований был пройден пеший маршрут по руслу и правому борту р. Варшездара, с помощью портативного GPS-приемника определены координаты всех потенциально возможных очагов зарождения опасных процессов, проведено геоморфологическое описание долины и водоудерживающей перемычки, отмечены каналы стока из озера, термокарстовые провалы, место высачивания озерных вод.

Батиметрическая съемка озера выполнялась с моторной надувной лодки с помощью эхолота Lowrance Hook 5. Промеры привязаны к уровню озера, зафиксированному на созданном и размеченном футштоке. Проведен обход контура озера с GPS-приемником, в ходе которого выявлялись возможные очаги неустойчивости берегов; измерен расход воды в р. Варшездара на выходе из оз. Варшезкуль.

Аэросъемка проводилась с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4 на трех участках долины – оз. Варшезкуль Нижнее, участок активного каменного глетчера из левого бокового распада в центральной части долины и конус выноса с расположенным на нем с. Варшез. По результатам съемки построены ортофотопланы высокого разрешения и цифровые модели местности с разрешением от 0.23 м до 1 м, которые использовались для построения продольных и поперечных профилей долины и для двумерного математического моделирования.

Двумерное математическое моделирование движения водных и селевых потоков было проведено с использованием программного комплекса FLO-2D PRO (автор J. O'Brien, США) по двум наиболее вероятным сценариям прорыва озера. Сценарии были описаны гидрографами, в которых учитывались возможный объем прорывных паводков, время излияния воды, объем вовлеченного селевого материала, наиболее вероятные параметры селевых потоков, полученные в предыдущих исследованиях [38], объемная концентрация наносов (33–35%).

В качестве базовых данных о рельефе территории использовалась цифровая модель рельефа PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) с разрешением 12.5 м. Для русла проводилась проверка корректности рельефа путем построения изолиний с использованием про-

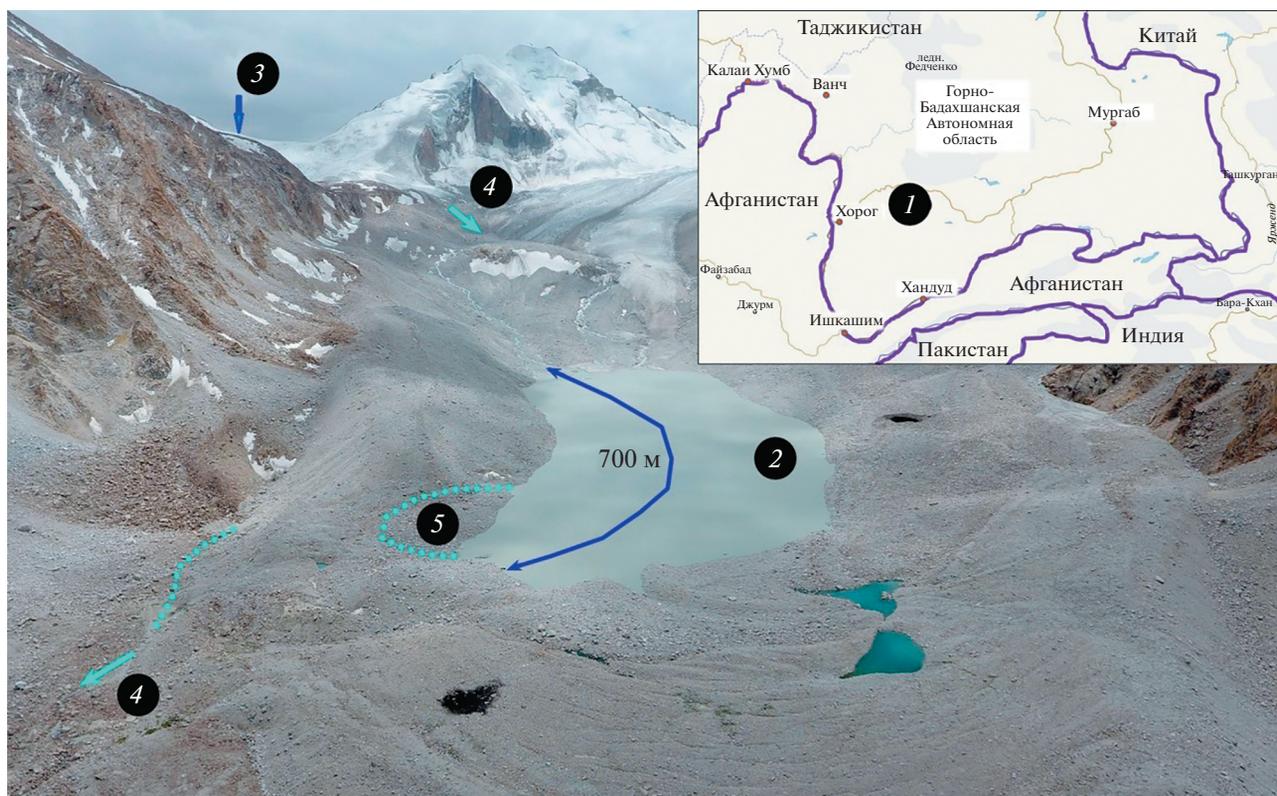


Рис. 1. Перемычка и исток из озера Варшезкуль Нижнее (фото с квадрокоптера).

1 – местоположение бассейна р. Варшездара; 2 – оз. Варшезкуль Нижнее; 3 – за перевалом расположено оз. Варшезкуль Верхнее; 4 – направление стока воды из озер; 5 – просадка берега озера.

граммы ArcGIS 10.2 и анализа продольного профиля. Вдоль русла отметки высот были проинтерполированы с более детальным шагом, а контур русла уточнялся по данным космических снимков и на основе топографических карт масштаба 1:50 000.

После корректировки все данные о рельефе для моделирования были проинтерполированы на расчетную сетку модели с шагом 12.5×12.5 м. Данные беспилотной съемки интерполировались на расчетную сетку с шагом 5×5 м. Коэффициент шероховатости задавался равным 0.04–0.05, согласно типичным для данных русел значений [39].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ледниковый рельеф долины р. Варшездара. Следы масштабного разновозрастного оледенения – примечательная черта бассейна р. Варшездара. Характерные морфодинамические участки долины р. Варшездара выделяются, в первую очередь, по их расположению в пределах разных возрастных генераций ледникового рельефа (рис. 2).

Конус выноса р. Варшездара (зона 1, рис. 2) выдвинут в днище широкой долины р. Гунт. В

привершинной части по обоим берегам сохранились фрагменты более древнего конуса выноса, в который на 10–15 м врезан современный (рис. 3а). Вдоль внешнего края конуса выноса одиночными островами над его относительно сглаженной и окультуренной поверхностью выступают бугристые холмы высотой 7–15 м, покрытые щебнем, без растительности. Предположительно, это останцы донной морены древнего долинного ледника Гунт. Река Варшездара, после выхода из сужения в вершине конуса выноса, расплывается по его поверхности, глубина руслового вреза незначительная и русло неустойчивое. На поверхности конуса выноса прослеживается множество бывших русловых ложбин, частично используемых под отвод воды арыками.

В низовьях долины р. Варшездара видны ярусы выработанных древними ледниками форм, в которые врезаны русла современных водотоков. Большая часть днища долины занята переработанными или слабо переработанными (покрытыми плащом пролювиально-флювиогляциальных наносов) бугристыми моренными отложениями древних ледников. Современное русло р. Варшездара находится в глубоком врезе, форма которого меняется от V-образного, до 20 м шириной по



Рис. 2. Схема бассейна р. Варшездара.

днищу перед выходом на конус выноса, до трапециевидного, шириной 40–50 м по днищу выше по течению. Глубина вреза убывает вверх по течению от 25–30 м перед выходом в долину Гунта до 12–17 м выше устья правого притока – р. Айрансу (рис. 36).

Выше устья Айрансу (зона 2 на рис. 2) моренные отложения непрерывной полосой занимают правую часть днища долины, здесь расположены многочисленные родники, и пояс блуждания р. Варшездара расширяется до 100–150 м (рис. 3в). На границе 2 и 3 зоны моренные отложения полностью перекрывают днище долины, уклоны возрастают, река течет в узком V-образном врезе с рыхлыми бортами. Предположительно здесь на-

ходится конечноморенный вал одной из стадий относительно недавнего (исторического) оледенения, ниже которого образовалось поле пролювиально-флювиогляциальных отложений (внутридолинный конус выноса). В пределах пологого участка днища долины аккумуляция части наносов, поступающих сверху, происходит и в настоящее время.

Облик средней части долины (зона 3 на рис. 2) сформирован в результате деятельности ледника Варшез в период исторической стадии оледенения (экзарация склонов и отложение морен), послеледниковых и современных процессов (в первую очередь обвальнo-осыпных и движения каменных глетчеров). Долина имеет типичный

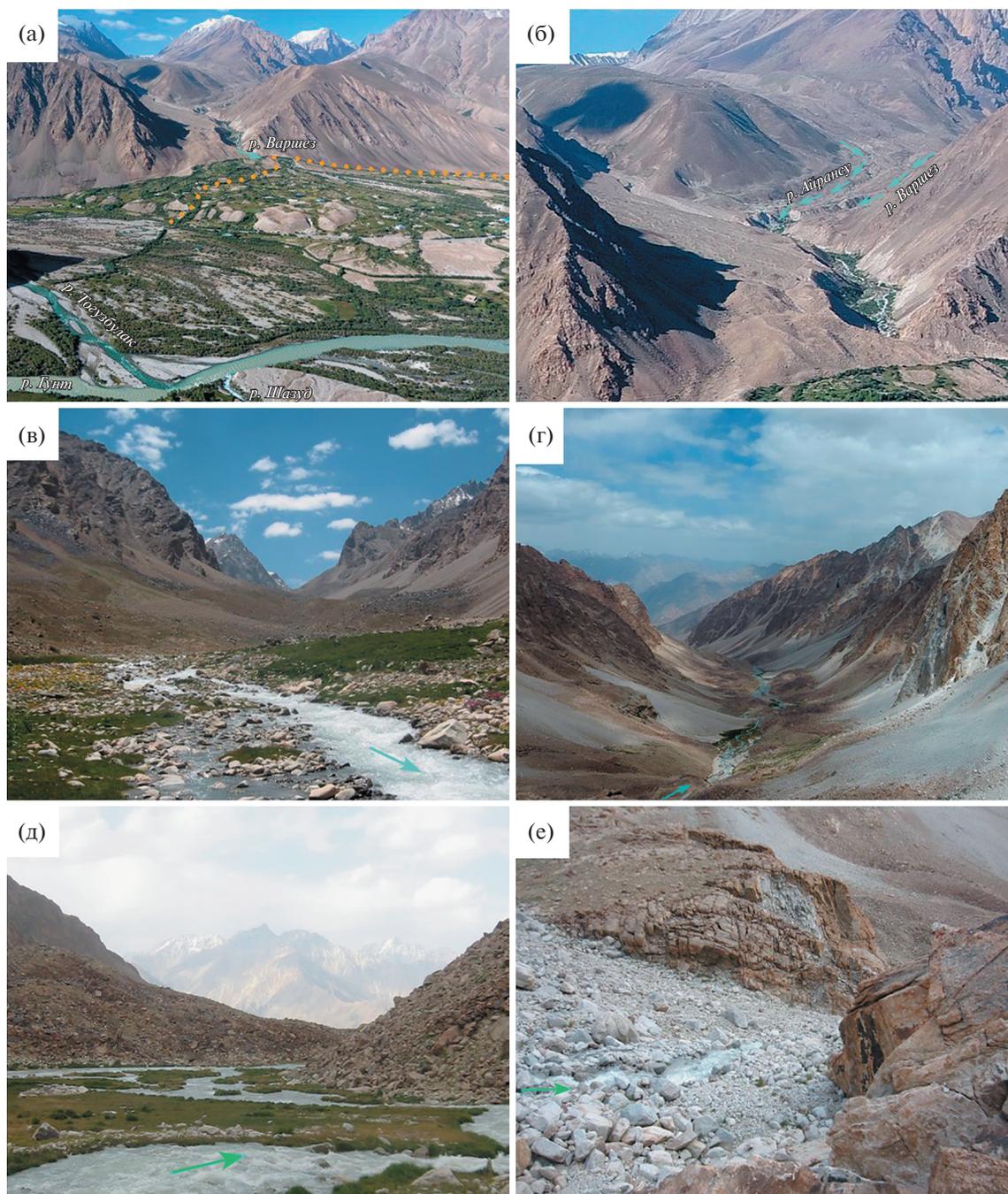


Рис. 3. Участки долины р. Варшездара: (а) – конус выноса (зона 1), (б) – впадение р. Айрансу, (в) – пояс блуждания р. Варшездара выше устья Айрансу (зона 2), (г) – средняя часть долины с U-образным поперечным профилем (зона 3), (д) – средняя часть долины выше каменного глетчера, (е) – скальный ригель на границе 3 и 4 зоны.

троговой облик с U-образным поперечным профилем и шириной по днущу 300–450 м (рис. 3г). Днище долины заполнено фрагментами моренных отложений, в значительной степени перекрытых осыпными шлейфами. Продольный профиль р. Варшездара ступенчатый, с чередованием выполаживаний выше локальных препятствий-запруд и участков с высокими уклонами на пересечении преград. На пологом участке днища до-

лины происходит аккумуляция речных наносов, формируются зандры (до 100 м и более) с разветленно-блуждающим или разбросанным руслом. В запрудах из рыхлого материала река вырабатывает узкие V-образные щели с порожисто-водопадным руслом.

В средней части долины из левого бокового распадка выдвигается язык активного каменного глетчера (рис. 3д), который полностью выполняет

днище трога на протяжении более 1 км (рис. 2). Высота запруды составляет около 80 м, на участке пересечения река выработала себе прямолинейное порожищенное русло по контакту отложений каменно-ледового массива и осыпей с правого борта. Выше плотины находится пологий участок длиной около 100 м и шириной до 50 м.

Ниже границы 3 и 4 зон (рис. 2) расположена протяженная зандровая площадка длиной около 400 м и шириной 100 м с разбросанным руслом и признаками образования наледей в зимнее время. Граница зон представлена ригелем, скрытым толщей рыхлых отложений. Перепад высот от ригеля до зандровой площадки составляет около 200 м, при протяженности по руслу реки примерно 600 м, т.е. уклон до 33%.

Перегиб скального ригеля находится на отметках около 4460 м, речной поток пересекает его в узком трапециевидном врезе шириной по основанию 15–17 м (рис. 3е). Ниже перегиба углы наклона по руслу достигают 20–25° (локальный уклон более 45%).

Выше ригеля расположена верхняя часть долины (зона 4, рис. 2), где все особенности рельефа и протекающих рельефообразующих процессов связаны с деятельностью современного ледника Варшез. К ригелю сверху примыкает высокий, около 40 м, конечно-моренный вал ледника, сформированный в одну из предыдущих стадий современного оледенения. Поток р. Варшездара пересекает низовой откос вала в неглубоком врезе со слабовыработанным водопадным руслом, уклоны составляют 35–40%, на уступе вала глубина V-образного вреза оказывается около 4–6 м. Большая часть потока теряется в рыхлообломочных отложениях.

Выше перегиба поверхность конечно-моренного вала бугристо-западинная, маломощный поток р. Варшездара течет в неглубоком врезе с приспособленным руслом от подножия более молодого конечно-моренного вала, наложенного на нижний. У основания данного вала из широкой (примерно 150 м) полосы фильтрации через перемычку-плотину оз. Варшезкуль Нижнее, на отметках около 4520 м берет начало р. Варшездара.

Высокогорные озера долины р. Варшездара. По результатам работ создана батиметрическая карта оз. Варшезкуль Нижнее (рис. 4) и рассчитаны его морфометрические характеристики. Параметры озера по состоянию на 25 июля 2018 г.: длина 750 м, ширина в средней части 227 м, максимальная глубина 24.5 м, средняя глубина 11.4 м, площадь акватории в летний период 173 тыс. м², периметр 2290 м. Объем воды составил 1.94 млн м³ [40].

Озеро Варшезкуль Нижнее лежит в чаше, образованной мертвыми льдами языка ледника Варшез (на абс. отметке 4532.5 м).

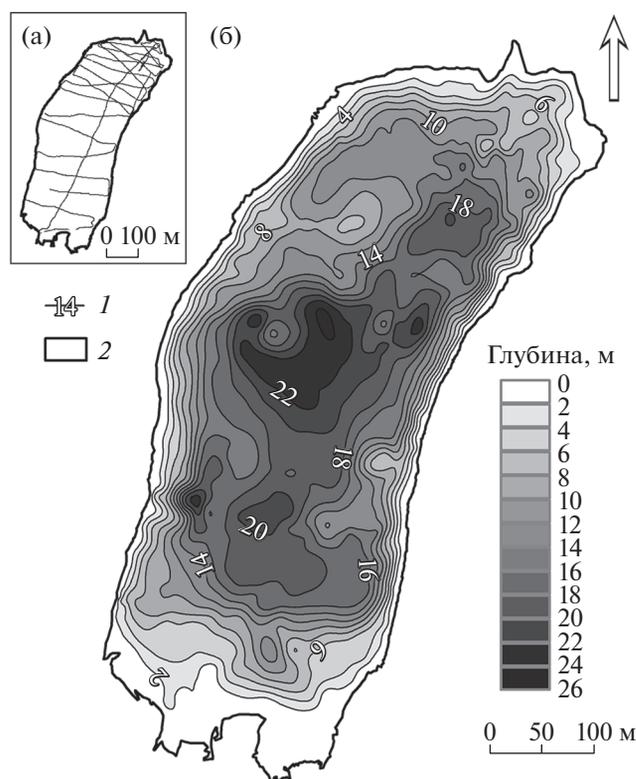


Рис. 4. Батиметрическая карта озера Варшезкуль Нижнее в долине р. Варшездара по состоянию на 25 июля 2018 г. [40]: (а) — промерные галсы, выполненные с моторной лодки, (б) — изобаты.

Расположение озера и его запруды в пределах деградирующего в современных климатических условиях ледово-моренного комплекса приводит к постоянной трансформации его ложа и берегов в результате таяния льдов. Так, в конце 1970-х годов, по данным топографических карт, площадь озера составляла 51.7 тыс. м², за 40 лет его площадь увеличилась более чем в 3 раза. По данным [22] площадь озера в 1968 г. составляла 23.3 тыс. м², в 1992 г. — 98.8 тыс. м², в 2002 г. — 147 тыс. м², в 2008 г. — 152.4 тыс. м². Площадь ледника Варшез в конце 1970-х годов достигала примерно 7 млн м², в 2018 г. она уменьшилась на 11% и составила около 6.2 млн м².

Современный активный язык ледника Варшез находится на южном берегу озера в 100–150 м от уреза воды. С запада и востока берега озера образуют высокие, по 15–25 м высотой, гряды мертвых льдов, покрытые рыхлообломочным плащом и круто обрывающиеся к озеру. Северный берег и водоудерживающую плотину оз. Варшезкуль Нижнее образует последний по времени образования конечно-моренный вал. Превышение его гребня над озером составляет от 5 до 25 м, низовой откос возвышается над поверхностью нижнего конечно-моренного вала на 20–30 м. Предпо-

жительно, большая часть вала все еще остается цельным ледовым телом, покрытым чехлом грубообломочной поверхностной морены.

Сток из озера подземный, следов перелива или поверхностного водотока не обнаружено. Вода просачивается непосредственно от уреза в пределах полукруглой просадки размером 80×80 м в пологом склоне перемычки и выходит на дневную поверхность у основания вала-запруды в виде родников в полосе шириной около 100 м. В склоне низового откоса запруды над родниками образовалась ниша. Расстояние от уреза воды в озере до полосы выхода воды из-под водоудерживающей плотины около 170 м. Родники находятся ниже уровня воды в озере на 12–15 м. Вода мутная, как и в озере, что указывает на преобладание свободного стока по подземным полостям. Отсутствие следов высокого стояния воды указывает на достаточно высокую в настоящее время пропускную способность подземных каналов стока.

Варшезкуль Верхнее лежит на высоте 4788.6 м в 15 км от устья р. Варшездара. Площадь акватории озера 357 тыс. м², длина – 1000 м, ширина – 300 м. Северный берег крутой скальный, западный и восточный – моренные, на южном к воде выходит два склоновых ледника с разделяющим их скальным гребнем. Прозрачный цвет воды в озере даже в середине периода активного таяния льда указывает на небольшой поверхностный сток в водоем, замедленный водообмен и, вероятно, значительные глубины. Используя исследованные географические аналоги – каровые озера Памира (оз. Нимацкуль, Чапдара), предполагаем, что средняя глубина озера – 10 м, таким образом, его объем оценивается в 3.57 млн м³.

Моделирование прорывных паводков и селей. Проведенные полевые исследования подтвердили предположение о том, что долина р. Варшездара – одна из наиболее потенциально опасных в регионе для образования прорывных паводков и селей. Были рассмотрены два наиболее вероятных сценария возникновения прорывных потоков. Первый сценарий предполагает прорыв одновременно двух озер Варшезкуль. Верхнее озеро может перелиться только в результате падения обвала, так как подпружено скальными породами. На основании соотношения обвальной массы и излитого объема воды предполагаем, что опорожнится половина объема верхнего озера и полностью нижнее озеро, таким образом, объем прорывного паводка составит 3.725 млн м³. При объемной концентрации наносов 0.35, объем селевого потока может достичь 5.73 млн м³. Максимальный расход прорывного паводка при таком объеме оценивается в 650 м³/с, что соответствует расходу селевого потока 1000 м³/с. На основании анализа аналогичных событий [41, 42] предпола-

гается, что продолжительность прорыва составит 5 ч, гидрограф симметричный [43] (рис. 5а).

Второй сценарий предполагает прорыв только нижнего озера Варшезкуль. Наиболее вероятный сценарий прорыва – развитие внутриледникового канала стока и медленное опорожнение озера. Согласно модели Ю.Б. Виноградова [44], гидрограф такого прорыва имеет длительный пологий подъем (процесс разработки внутриледникового канала стока) и резкий спад (опорожнение остаточного объема озера). Для предварительной оценки был построен асимметричный гидрограф треугольной формы с максимальным расходом 100 м/с (рис. 5б). Продолжительность опорожнения озера оценена в 12 ч (по географическим аналогам [45]), пик прорывного паводка приходится на 10 ч. Объем водной составляющей селевого потока равен объему озера – 1.94 млн м³, максимальный расход селевого потока – 153.8 м³/с, соответственно, объем селя – 2.98 млн м³.

По результатам моделирования прорывных потоков было получено, что время добегающего до вершины конуса выноса составляет всего 0.1 ч (0.3 ч для второго сценария), а повышение расхода воды будет наблюдаться через 1.4 ч от начала прорыва (3.5–4 ч для второго сценария). Такое время добегающего обусловлено катастрофически высоким расходом селевого потока. Максимальный расход селевого потока в вершине конуса выноса составит порядка 982.8 м³/с (рис. 4а) для первого сценария и 151 м³/с (рис. 4б) для второго сценария. Форма гидрографа останется практически неизменной в обоих случаях.

Ниже селевой поток будет растекаться по конусу выноса, впадая в р. Гунт в нескольких местах. После впадения в р. Гунт на характеристики паводка повлияет режим самой реки, но незначительно. Селевой поток преодолеет конус выноса за 1.4 ч в первом сценарии и 2.1 ч во втором. Максимальный расход селевого потока с учетом воды р. Гунт (среднегодовой расход воды 65 м³/с) составляет 565 м³/с (первый сценарий) и 190 м³/с (второй сценарий) (рис. 5). Согласно расчетам, объемная концентрация потока в р. Гунт снизится до 0.19 (первый сценарий) и 0.12 (второй сценарий) [40].

Плановые характеристики глубины затопления при прохождении селевых потоков по конусу выноса р. Варшездара в районе с. Варшез и Абуали Сино представлены на рис. 6.

На конусе выноса р. Варшездара глубина потока достигнет 2–3 м в русле. Поток растечется широко по руслу, затапливая дома на правом и левом берегу. В районе моста через р. Варшездара глубина потока составит 3 м, дорога будет затоплена и, вероятно, разрушена. Скорости течения в русле реки на этом участке также достигнут 7–12 м/с

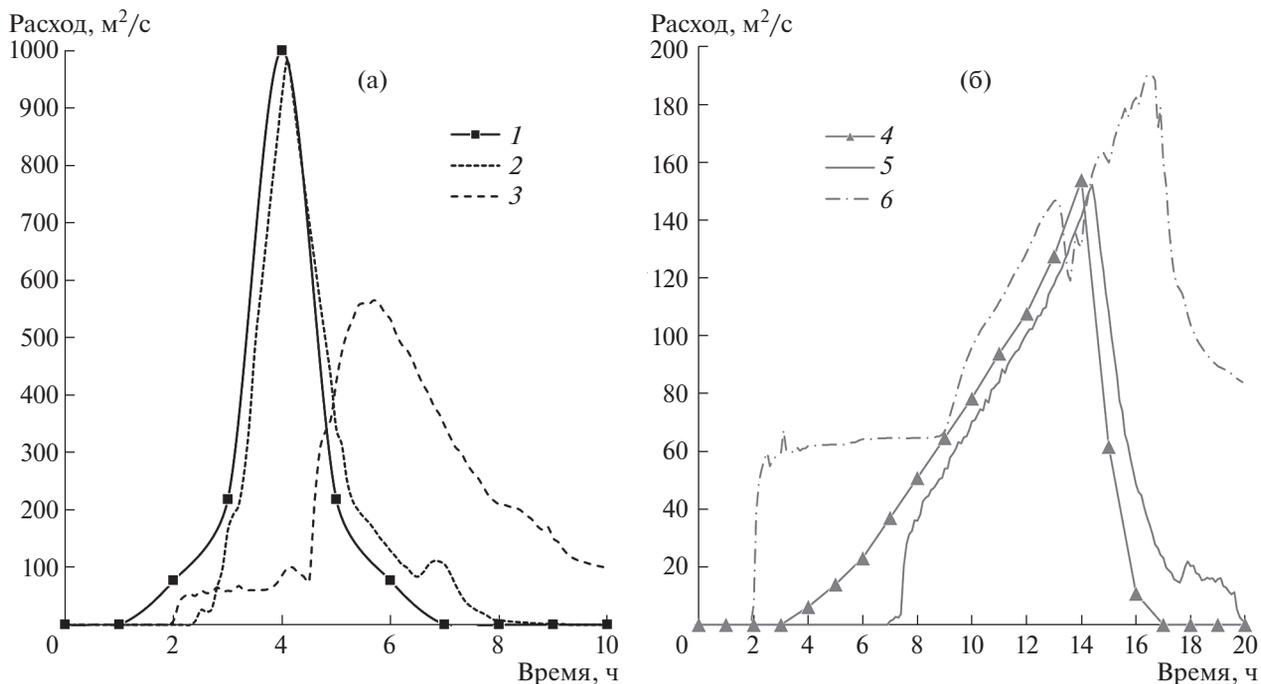


Рис. 5. Гидрографы прорывного потока, полученные по результатам моделирования на основе программного комплекса FLO-2D: (а) – сценарий 1, (б) – сценарий 2.

1, 4 – входные гидрографы селевого потока; рассчитанные гидрографы селевого потока: 2, 5 – на вершине конуса выноса, 3, 6 – в 6.6 км ниже впадения р. Варшездара в р. Гунт, с учетом р. Гунт.

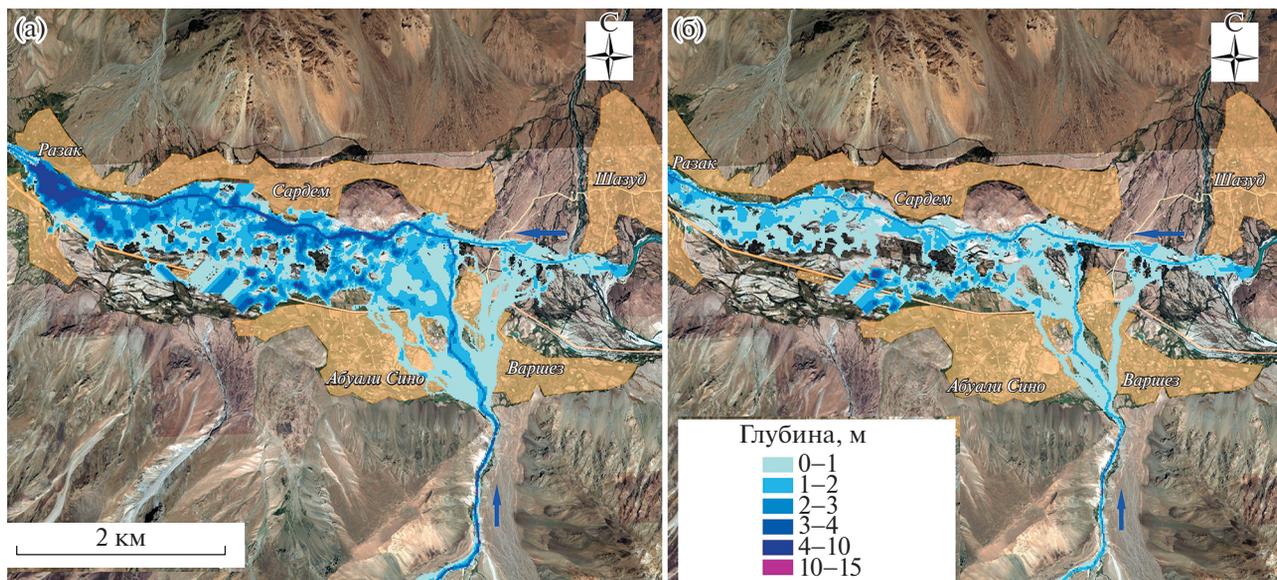


Рис. 6. Плановое распределение глубин затопления при прорывных потоках из озера Варшезкуль по результатам моделирования на основе программного комплекса FLO-2D: (а) – сценарий 1, (б) – сценарий 2.

(первый сценарий) или 1.5–4 м/с (второй сценарий). Глубины затопления на р. Гунт не превысят в среднем 3–5 м по фарватеру и достигнут 10 м перед сужением у с. Разак (первый сценарий) или 4 м (второй сценарий). Скорости течения – 4–

7 м/с по фарватеру и 1.5–3 м/с на расширениях. В зоне затопления по р. Гунт находятся дома в пос. Сардем на правом берегу реки и почти весь левый берег. Ниже с. Разак селевой поток затопливает пос. Мийоншахр, Окмамад, Чарсем, Тан-

гиф, могут оказаться затоплены дома и дорога на левом берегу реки. На всех участках моделирования опасность селевого потока и наносоводного паводка средняя и максимальная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долина р. Варшездара в настоящее время представляется самой проблемной в бассейне р. Гунт и отличается повышенной опасностью возможного прорыва оз. Варшезкуль Нижнее и его потенциальных последствий. Озеро Варшезкуль Нижнее непрерывно на протяжении 40 лет увеличивается по площади и объемам, подпружено рыхлообломочным материалом с ледяным ядром внутри, и буквально “нависает” над нижележащей долиной. Запруда озера нестабильна — имеются просадки, сбросы, котловины эфемерных озер, возможно раскрытие новых трещин при локальных подвижках. Озеро имеет значительный объем — 1.94 млн м³, что делает его самым крупным ледниковым озером региона, размеры которого продолжают расти.

Все эти факторы являются показателями высокой потенциальной опасности возникновения прорыва озера и формирования селевого потока разрушительной мощности. Обследование долины выявило участки с очень высокими уклонами и неограниченными запасами рыхлообломочного материала для формирования селя. Размеры промежуточных пологих участков днища и ступеней по долине недостаточны для распластывания паводка и осадения наносов. Уклоны в средней и нижней частях долины позволяют селевому потоку быстро нарастить объемы по пути его движения. Перед выходом на конус выноса, где расположены населенные пункты, поток увеличит свою разрушительную силу за счет возрастания скорости при прохождении узкой приустьевой ступени и большого количества дополнительного рыхлого материала из древних морен.

Результаты геоморфологического обследования долины были подтверждены математическим моделированием. Максимальные глубины при катастрофическом селевом потоке по первому сценарию достигают 10 м, скорости течения — 12 м/с. В наиболее широких частях речной долины глубина потока — до 3 м, скорости течения — до 3 м/с. При моделировании по обоим сценариям (спуск озер Варшезкуль Нижнее и Варшезкуль Верхнее, либо только Нижнего) потоки затапливают конус выноса с глубинами до 3–4 м, скоростями течения до 3 м/с. Время добега сценарных потоков до конуса выноса составляет всего 0.1–0.3 ч. Моделирование показало, что затоплены будут все населенные пункты на конусе выноса (Варшез и Абуали Сино), а также частично дома в пос. Разак и Сардем. Ниже по р. Гунт паводок

затапливает частично дома и автомобильную дорогу на левом берегу реки.

Результаты исследования показывают, что следствием климатических изменений в регионе стало повышение потенциальной опасности в горном бассейне реки Варшездара. Очевидно, что за последние 40 лет в связи со стремительным ростом объема ледникового озера и отступанием ледника Варшез вероятность прорыва и возникновения катастрофического селевого потока, а также его потенциальная мощность значительно увеличились. В связи с этим, строения на конусе выноса долины, построенные в последние десятилетия на ранее безопасных участках, теперь находятся в зоне риска, селезащитная стенка выше пос. Абуали Сино не рассчитана на масштабы огромного прорывного паводка и не окажет на его распространение никакого влияния (скорее всего, будет захоронена под селевыми наносами), существующие мостовые переходы автотрассы Хорог-Ош также не пропустят предполагаемые объемы селя и будут разрушены.

С большой долей вероятности ситуацию можно проецировать на другие высокогорные долины, расположенные на Памире и имеющие деградирующие ледники и ледниковые озера, например, долины рек Шазуддара, Хавраздара, Дузахдара и Кулендара, Патхур и Чапдара, Джизевдара, Пишдара, Чарсемдара, Кофарендара, Шорипдара и другие.

Собранные данные были переданы в государственные структуры и местным органам управления с целью привлечь их внимание к возможным прорывам высокогорных озер и подготовленности населения к опасным природным процессам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Филиала Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан и в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова по теме I.7 АААА-А16-116032810093-2 “Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов”. Статья подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-00520.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bajracharya S.R., Mool P.K., and Shrestha B.R.* Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes: case studies on GLOF and associated hazards in Nepal and Bhutan // International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 2007.
2. *Wang X., Siegert F., Zhou A. G., and Franke J.* Glacier and glacial lake changes and their relationship in the context of climate change, Central Tibetan Plateau

- 1972–2010 // *Global and Planetary Change*. 2013. Vol. III. P. 246–257.
3. *Rasul G., Chaudhry Q.Z., Mahmood A., Hyder K.W., and Dahe Q.* Glaciers and glacial lakes under changing climate in Pakistan // *Pakistan Journal of Meteorology*. 2011. Vol. 8. No. 15. P. 1–8.
 4. *Paul F., Kääb A., and Haeblerli W.* Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies // *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 56. No. 1–2. P. 111–122.
 5. *Soldati M., Corsini A., and Pasuto A.* Landslides and climate change in the Italian Dolomites since the Late glacial // *Catena*. 2004. Vol. 55. No. 2. P. 141–161.
 6. *Huggel C., Clague J.J., and Korup O.* Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012. Vol. 37. No. 1. P. 77–91.
 7. *Aggarwal S., Rai S.C., Thakur P.K., and Emmer A.* Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya // *Geomorphology*. 2017. Vol. 295. P. 39–54.
 8. *Kumar B. and Murugesh Prabhu T.S.* Impacts of climate change: Glacial lake outburst floods (GLOFs) // *Climate Change in Sikkim Patterns, Impacts and Initiatives*. Information and Public Relations Department, Government of Sikkim, Gangtok. 2012.
 9. *Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Запорожченко Э.В., Бобов Р., Пирмамадов У.* Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе // *Геориск*. 2019. Т. 13. № 1. С. 26–36.
 10. EM-DAT | The international disasters database [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.emdat.be/> (дата обращения: 31.03.2020).
 11. IPCC, 2019: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* / P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, and J. Malley [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRC-CL-Full-Report-Compiled-191128.pdf> (дата обращения: 25.02.2021).
 12. *Mergili M. and 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. Vol. II. No. 5. P. 1447–1462.
 13. *Gruber F.E. and 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. Vol. 13. No. 11. P. 2779–2796.
 14. *Shangguan D., Liu S., Ding Y., Ding L., Xiong L., Cai D., Li G., Lu A., Zhang S., and Zhang Y.* Monitoring the glacier changes in the Muztag Ata and Konggur mountains, east Pamirs, based on Chinese Glacier Inventory and recent satellite imagery // *Annals of Glaciology*. 2006. Vol. 43. P. 79–85.
 15. *Pohl E., Gloaguen R., and Seiler R.* Remote sensing-based assessment of the variability of winter and summer precipitation in the Pamirs and their effects on hydrology and hazards using harmonic time series analysis // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No. 8. P. 9727–9752.
 16. *Mergili M., Schneider D., Worni R., and Schneider J.* Glacial lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: challenges in prediction and modelling // *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. 2011. P. 973–982.
 17. *Komatsu T. and Watanabe T.* Glacier-Related Hazards and Their Assessment in the Tajik Pamir: A Short Review // *Geographical Studies*. 2014. Vol. 88. No. 2. P. 117–131.
 18. *Xenarios S., Gafuro, A., Schmidt-Vogt D., Sehring J., Manandhar S., Hergarten C., Shigaeva J., and Foggin M.* Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints // *Regional Environmental Change*. 2019. Vol. 19. No. 5. P. 1339–1352.
 19. *Винниченко С.М., Бахтдавлатов Р.Д., Шафиев Г.В.* Снижение степени риска при катастрофических последствиях геологических процессов на горных сейсмоактивных территориях // Мат-лы междунар. конф. по организации мониторинга за оползнями в Центральной Азии. Ташкент. 2003. С. 58–60.
 20. *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 // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии / Сб. докл. междунар. науч. Конф. памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. СПб. 2018. С. 897–902.
 21. *Раимбеков Ю.Х.* Исследование геологических угроз Горного Бадахшана Республика Таджикистан // *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*. 2012. № 1. С. 96–100.
 22. *Mergili M., Müller J.P., and 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. Vol. 107. P. 13–24.
 23. *Bolch T., Kulkarni A., Kääb A., Huggel C., Paul F., Cogley J.G., Frey H., Kargel J.S., Fujita K., Scheel M., Bajracharya S., and Stoffel M.* The state and fate of Himalayan glaciers // *Science*. 2012. Vol. 336. No. 6079. P. 310–314.
 24. *Khromova T.E., Osipov G.B., Tsvetkov D.G., Dyurgerov M.B., and Barry R.G.* Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 102. No. 1–2. P. 24–32.
 25. *Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Бассейн р. Амударья / Под ред. В.М. Федотовой. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.*

26. *Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S., Muraviev A., and Chernova L.* Glacier area changes in Northern Eurasia // *Environmental Research Letters*. 2014. Vol. 9. No. 1. P. 015003.
27. *Коновалов В.Г., Вильямс М.В.* Многолетние колебания оледенения и стока рек Центральной Азии в современных климатических условиях // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 9. С. 69–83.
28. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ананичева М.Д., Глазовский А.Ф., Десинов Л.В., Казанский А.Б., Китаев Л.М., Коновалов В.Г., Кононов Ю.М., Кренке А.Н., Кузузов С.С., Лебедева И.М., Мачерет Ю.Я., Михаленко В.Н., Муравьев А.Я., Носенко Г.А., Осипова Г.Б., Попова В.В., Рототаева О.В., Тарасова Л.Н., Турков Д.В., и Хмелевской И.Ф. М.: Институт географии РАН, 2006. 482 с.
29. *Bhambri R., Bolch T., and Chaujar R.K.* Frontal recession of Gangotri Glacier, Garhwal Himalayas, from 1965 to 2006, measured through high-resolution remote sensing data // *Current Science*. 2012. Vol. 102. No. 3. P. 489–494.
30. *Kääb A., Berthier E., Nuth C., Gardelle J., and Arnaud Y.* Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas // *Nature*. 2012. Vol. 488. No. 7412. P. 495–498.
31. *Yde J.C. and Paasche Ø.* Reconstructing climate change: not all glaciers suitable // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2010. Vol. 91. No. 21. P. 189–190.
32. *Финаев А.Ф.* Природные условия формирования водных ресурсов // *Доклады АН Респ. Таджикистан*. 2003. Т. 46. № 11–12.
33. *Ниязов Д.Б., Калашикова О.Ю., Мирзохонова С.О.* Влияние климатических изменений на сток реки Гунт (приток реки Пяндж, бассейн реки Амударья, Таджикистан) за период 1940–2016 гг. // *Изв. АН Респ. Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук*. 2019. № 3. С. 84–91.
34. *Докукин М.Д., Шагин С.И.* Особенности динамики ледниковых озер с подземными каналами стока (анализ разновременной аэрокосмической информации) // *Криосфера Земли*. 2014. Т. 18. № 2. С. 47–56.
35. *Яблоков А.А.* Сели Таджикистана. Душанбе: Мир путешествий, 2009. 15 с.
36. Устойчивость горных озер Центральной Азии. Риски воздействия и принятие мер. Оценочный доклад. Душанбе. 2008. 51 с.
37. *Раимбеков Ю.Х., Мародасейнов Ф.О.* Опасные природные процессы и явления на малых водосборах в бассейне реки Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, республика Таджикистан) // *Геориск*. 2019. № 2. С. 52–62.
38. *Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., and Seynova I.B.* Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 61. No. 3. P. 1293–1316.
39. *Барышников Н.Б.* Гидравлические сопротивления речных русел. СПб: Изд-во РГГМУ, 2003. 147 с.
40. *Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Рудой А.Н., Висхаджиева К.С., Аршинова М.А., Куровская В.А.* Батиметрическая съемка озер Куленкуль (Дузахдара), Варшезкуль, Патхур (Чапдара), Джизев, Хавраздара и моделирование возможных прорывов. М.: Геофак МГУ, 2018. 278 с.
41. *Somos-Valenzuela M.A., McKinney D.C., Byers A.C., Rounce D.R., Portocarrero C., and Lamsal D.* Assessing downstream flood impacts due to a potential GLOF from Imja Tsho in Nepal // *Hydrology & Earth System Sciences*. 2015. Vol. 19. No. 3. P. 1401–1412.
42. *Shrestha A.B., Eriksson M., Mool P., Ghimire P., Mishra B., and Khanal N.R.* Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2010. Vol. 1. No. 2. P. 157–169.
43. *Huggel C., Haeblerli W., Kääb A., Bieri D., and Richardson S.* An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps // *Can. Geotech. J.* 2004. Vol. 41. P. 1068–1083.
44. *Виноградов Ю.Б.* Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // *Селевые потоки*. 1976. № 1. С. 138–153.
45. *Виноградов Ю.Б.* Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 154 с.

The responds of the Western Pamirs alpine lakes to climate change (Lake Lower Varshedzkul case study, Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan)

V. M. Kidyayeva^a, I. V. Krylenko^a, S. S. Chernomorets^{a,*}, E. A. Savernyuk^a, V. A. Kurovskaia^a,
Yu. N. Raimbekov^b, R. A. Bobov^c, U. R. Pirmamadov^b, and F. O. Marodaseinov^b

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^b *Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan*

^c *Aga Khan Development Network, Dushanbe, Tajikistan*

^{*} *E-mail: devdorak@gmail.com*

Glacial degradation of Pamir, growth of alpine lakes area, of stream discharges, frequency and risk of natural disasters are all results of increasing summer temperatures. The influence of climate change on the growth of

the potential risk of outburst floods and debris flows in the Western Pamirs has been proved, using the example of a typical glacial basin of the Varshedzara River (the Gunt River tributary). Detailed field studies of the basin, including bathymetric and aerial surveys, revealed the instability of the unconsolidated moraine impounding Lake Lower Varshedzkul, the presence of an ice core in it, and the presence of active rock stream, a large amount of material potentially involved in debris flow, in the river valley. Estimated volume of water contained in lakes Lower Varshezkul and Higher Varshezkul are 1.94 million m³ and 3.57 million m³ respectively. The area of glacial lakes in the Varshedzara river basin has increased 3 times over the past 40 years (from 51.7 tsd m² to 173 tsd m²), and the area of the Varshedz glacier has decreased by 11% (from 7 mln m² to 6.2 mln m²). The maximum volume of a debris flow in the valley was estimated at 5.73 mln m³, the debris flow discharge was 1000 m³/s. If both lakes are to breach simultaneously, an estimated discharge would reach 3.725 mln m³. That includes half of the volume of Higher Varshezkul and the entire volume of Lower Varshezkul lakes. According to the results of mathematical modeling, it was found that the lag time for the stream reaching the settlements is only 0.1 h, the buildings and the highway located on the debris cone will be inundated up to 3–4 meters with flow velocity of 3 m/sec. and destroyed. The results can be interpolated to other glacial basins of the western Pamirs, in which growing glacial lakes are located, and the potential hazard will increase.

Keywords: glacial lakes, hazardous geological processes, bathymetric survey, simulation of the lake outburst, FLO-2D, Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, moraine impounding lake

ACKNOWLEDGEMENTS

Study was supported by the Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan and by Lomonosov Moscow State University (grant I.7 AAAA-A16-116032810093-2 “Mapping, modeling and risk assessment of dangerous natural processes”). This paper was prepared with the support of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-05-00520.

REFERENCES

1. Bajracharya S.R., Mool P.K., and Shrestha B.R. Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes: case studies on GLOF and associated hazards in Nepal and Bhutan. *International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD)*, 2007.
2. Wang X., Siegert F., Zhou A.G., and Franke J. Glacier and glacial lake changes and their relationship in the context of climate change, Central Tibetan Plateau 1972–2010. *Global and Planetary Change*. 2013. Vol. 111. P. 246–257.
3. Rasul G., Chaudhry Q.Z., Mahmood A., Hyder K.W., and Dahe Q. Glaciers and glacial lakes under changing climate in Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*. 2011. Vol. 8. No. 15. P. 1–8.
4. Paul F., Kääb A., and Haerberli W. Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies. *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 56. No. 1–2. P. 111–122.
5. Soldati M., Corsini A., and Pasuto A. Landslides and climate change in the Italian Dolomites since the Late glacial. *Catena*. 2004. Vol. 55. No. 2. P. 141–161.
6. Huggel C., Clague J.J., and Korup O. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012. Vol. 37. No. 1. P. 77–91.
7. Aggarwal S., Rai S.C., Thakur P.K., and Emmer A. Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya. *Geomorphology*. 2017. Vol. 295. P. 39–54.
8. Kumar B. and Murugesh Prabhu T.S. Impacts of climate change: Glacial lake outburst floods (GLOFs). *Climate Change in Sikkim Patterns, Impacts and Initiatives*. Information and Public Relations Department, Government of Sikkim, Gangtok, 2012.
9. Dokukin M.D., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Zaporozhchenko E.V., Bobov R., Pirmamadov U. *Barsemskaya selevaya katastrofa na Pamire v 2015 godu i ee analogi na Tsentral'nom Kavkaze* (Barsem debris flow disaster in the Pamirs in 2015 and its analogues in the Central Caucasus). *Georisk*. 2019. Vol. 13. No. 1. P. 26–36. (in Russ.)
10. EM-DAT | The international disasters database [Electronic data]. Access way: <https://www.emdat.be/> (access date: 31.03.2020).
11. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, and J. Malley (Eds.). [Electronic data]. Access way: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRC-CL-Full-Report-Compiled-191128.pdf> (access date: 25.02.2021).
12. Mergili M. and 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. Vol. 11. No. 5. P. 1447–1462.
13. Gruber F.E. and 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. Vol. 13. No. 11. P. 2779–2796.
14. Shangguan D., Liu S., Ding Y., Ding L., Xiong L., Cai D., Li G., Lu A., Zhang S., and Zhang Y. Monitoring the glacier changes in the Muztag Ata and Konggur

- mountains, east Pamirs, based on Chinese Glacier Inventory and recent satellite imagery. *Annals of Glaciology*. 2006. Vol. 43. P. 79–85.
15. Pohl E., Gloaguen R., and Seiler R. Remote sensing-based assessment of the variability of winter and summer precipitation in the Pamirs and their effects on hydrology and hazards using harmonic time series analysis. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No. 8. P. 9727–9752.
 16. Mergili M., Schneider D., Worni R., and Schneider J. Glacial lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: challenges in prediction and modelling. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. 2011. P. 973–982.
 17. Komatsu T. and Watanabe T. Glacier-Related Hazards and Their Assessment in the Tajik Pamir: A Short Review. *Geographical Studies*. 2014. Vol. 88. No. 2. P. 117–131.
 18. Xenarios S., Gafuro, A., Schmidt-Vogt D., Sehring J., Manandhar S., Hergarten C., Shigaeva J., and Foggin M. Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints. *Regional Environmental Change*. 2019. Vol. 19. No. 5. P. 1339–1352.
 19. Vinnichenko S.M., Bakhtdavlatov R.D., Shafiev G.V. *Snizhenie stepeni riska pri katastroficheskikh posledstviyakh geologicheskikh protsessov na gornyykh seismoaktivnykh territoriyakh. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii po organizatsii monitoringa za opolznyami v tsentral'noi Azii* (Risk reduction during catastrophic consequences of geological processes in mountainous seismically active territories. In: Materials of Intern. conf. on the organization of monitoring for landslides in Central Asia). Tashkent. 2003. P. 58–60. (in Russ.)
 20. Kidyayeva V.M., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Krylenko I.N., Dokukin M.D., Viskhadzhiyeva K.S., Bobov R.A., Pirmamadov U.R., Marodaseinov F.O., Raimbekov Yu.Kh., Kurbonmamadov D.A. *Modelirovaniye proryvov gornyykh ozer i selevykh potokov v Gorno-Badakhshanskoj avtonomnoj oblasti, Tadjikistan* (Modelling of mountain lakes outbursts and debris flows in the Gorno-Badakhshan autonomous region, Tajikistan). *Tret'i Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo gidrologa Yu.B. Vinogradova* (Third Vinogradov Readings. Facets of hydrology. In: Coll. report international scientific. Conf. in memory of the outstanding Russian hydrologist Yu.B. Vinogradov). Sankt-Peterburg. 2018. P. 897–902. (in Russ.)
 21. Raimbekov Y.Kh. *Issledovanie geologicheskikh ugroz Gornogo Badakhshana Respublika Tadjikistan* (The study of geological hazard in Gorno-Badakhshan of Republic of Tajikistan). *Vestnik RUDN Ser. Inzhenernyye issledovaniya* (RUDN journal of engineering researches). 2012. No. 1. P. 96–100. (in Russ.)
 22. Mergili M., Müller J.P., and 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. Vol. 107. P. 13–24.
 23. Bolch T., Kulkarni A., Kääh A., Huggel C., Paul F., Cogley J.G., Frey H., Kargel J.S., Fujita K., Scheel M., Bajracharya S., and Stoffel M. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*. 2012. Vol. 336. No. 6079. P. 310–314.
 24. Khromova T.E., Osipov G.B., Tsvetkov D.G., Dyurgerov M.B., and Barry R.G. Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 102. No. 1–2. P. 24–32.
 25. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 14. Srednyaya Aziya. Vypusk 3. Bassein r. Amudar'i*, (Surface water resources of the USSR Vol. 14. Central Asia. Issue 3. The basin of the river Amu Darya). V.M. Fedotova (Ed.). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1971. 472 p. (in Russ.)
 26. Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S., Muraviev A., and Chernova L. Glacier area changes in Northern Eurasia. *Environmental Research Letters*. 2014. Vol. 9. No. 1. P. 015003.
 27. Konovalov V.G. and Vil'yams M.V. *Mnogoletnie kolebaniya oledeniya i stoka rek Tsentral'noi Azii v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh* (Long-term fluctuations of glaciation and runoff of Central Asian rivers in modern climatic conditions). *Meteorologiya i gidrologiya*. 2005. No. 9. P. 69–83. (in Russ.)
 28. *Oledeniye Severnoi i Tsentral'noi Evrazii v sovremennuyu epokhu* (The glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era) / Ananicheva M.D., Glazovskij A.F., Desinov L.V., Kazanskij A.B., Kitayev L.M., Konovalov V.G., Kononov Yu.M., Krenke A.N., Kutuzov S.S., Lebedeva I.M., Macheret Y.Ya., Mihalenko V.N., Murav'ev A.Ya., Nosenko G.A., Osipova G.B., Popova V.V., Rototaeva O.V., Tarasova L.N., Turkov D.V., and Hmelevskoj I.F. (Eds.). Moscow: IG RAS (Publ.), 2006. 482 p. (in Russ.)
 29. Bhambri R., Bolch T., and Chaujar R.K. Frontal recession of Gangotri Glacier, Garhwal Himalayas, from 1965 to 2006, measured through high-resolution remote sensing data. *Current Science*. 2012. Vol. 102. No. 3. P. 489–494.
 30. Kääh A., Berthier E., Nuth C., Gardelle J., and Arnaud Y. Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*. 2012. Vol. 488. No. 7412. P. 495–498.
 31. Yde J.C. and Paasche Ø. Reconstructing climate change: not all glaciers suitable. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2010. Vol. 91. No. 21. P. 189–190.
 32. Finaev A.F. *Prirodnye usloviya formirovaniya vodnykh resursov* (Natural conditions for the formation of water resources). *Doklady Akademii Nauk Respubliki Tadjikistan* (Reports of the AS of the republic of Tajikistan). 2003. Vol. 46. No. 11–12. (in Russ.)
 33. Niyazov D.B., Kalashnikova O.Yu., and Mirzokhonova S.O. *Vliyanie klimaticheskikh izmenenii na stok reki Gunt (pritok reki Pyandzh, bassein reki Amudar'ya, Tadjikistan) za period 1940–2016 gg* (The impact of climate change on the flow of the Gunt River (a tributary of the Pyanj River, the Amudarya River Basin, Tajikistan) for the period 1940–2016). *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadjikistan. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk* (News of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Physics and Mathematics, Chemical, Geological and Technical Sciences). 2019. No. 3. P. 84–91. (in Russ.)

34. Dokukin M.D. and Shagin S.I. *Osobennosti dinamiki lednikovyykh ozer s podzemnymi kanalami stoka (analiz raznovremennoi aerokosmicheskoi informatsii)* (Features of dynamics of glacial lakes with underground drain channels (analysis of multi-temporal aerospace information)). *Kriosfera Zemli*. 2014. Vol. 18. No. 2. P. 47–56. (in Russ.)
35. Yablokov A.A. *Seli Tadzhikistana* (Debris flow in the Republic of Tajikistan). Dushanbe: Mir puteshestvii (Publ.), 2009. 15 p. (in Russ.)
36. *Ustoichivost' gornyykh ozer Tsentral'noi Azii. Riski vozdeistviya i prinyatie mer. Otsenochnyi doklad.* (Sustainability of mountain lakes in Central Asia. Risks of exposure and action. Estimative report). Dushanbe. 2008. 51 p. (in Russ.)
37. Raimbekov Yu.Kh. and Marodaseinov F.O. *Opasnye prirodnye protsessy i yavleniya na malyykh vodosborakh v basseine reki Gunt (Gorno-Badakhshanskaya avtonomnaya oblast', respublika Tadzhikistan)* (Hazardous natural processes and phenomena at small catchments in the Gunt river basin (Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Republic of Tajikistan)). *Georisk*. 2019. No 2. P. 52–62. (in Russ.)
38. Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., and Seynova I.B. Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst. *Natural Hazards*. 2012. Vol. 61. No. 3. P. 1293–1316.
39. Baryshnikov N.B. *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnyykh rusel* (Hydraulic resistance of river channels). SPb: Izd-vo RGGMU (Publ.), 2003. 147 p. (in Russ.)
40. Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Kidyayeva V.M., Rudoi A.N., Viskhadzhieva K.S., Arshinova M.A., and Kurovskaya V.A. *Batimetricheskaya s'emka ozer Kulenkul' (Duzakh dara), Varshedzkul', Patkhur (Chap dara), Dzhizev, Khavrazdara i modelirovanie vozmozhnykh proryvov* (Bathymetric survey of lakes Qulenkul (Duzakh dara), Varshedzkul, Patkhur (Chap dara), Jizev, Khavrazdara and modelling of potential outbursts). Moscow: MGU (Publ.), 2018. 278 p. (in Russ.)
41. Somos-Valenzuela M.A., McKinney D.C., Byers A.C., Rounce D.R., Portocarrero C., and Lamsal D. Assessing downstream flood impacts due to a potential GLOF from Imja Tsho in Nepal. *Hydrology & Earth System Sciences*. 2015. Vol. 19. No. 3. P. 1401–1412.
42. Shrestha A.B., Eriksson M., Mool P., Ghimire P., Mishra B., and Khanal N.R. Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2010. Vol. 1. No. 2. P. 157–169.
43. Huggel C., Haeblerli W., Kääh A., Bieri D., and Richardson S. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Can. Geotech. J.* 2004. Vol. 41. P. 1068–1083.
44. Vinogradov Yu.B. *Metod rascheta gidrografa pavodka pri proryve podpruzhennogo lednikom ozera* (The method of calculating the hydrograph of the flood during a glacier-loaded lake outburst). *Selevye potoki*. 1976. No 1. P. 138–153. (in Russ.)
45. Vinogradov Yu.B. *Glyatsial'nye proryvnye pavodki i selevye potoki* (Glacial outburst floods and debris flows). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1977. 154 p. (in Russ.)