

Прикладные проблемы

УДК 504.064.37:528.8

doi:10.15356/2076-6734-2016-2-235-245

Дистанционное определение резервного объёма прорывоопасных высокогорных озёр

© 2016 г. В.Г. Коновалов*, В.А. Рудаков

Институт географии РАН, Москва, Россия

*vladgeo@gmail.com

Remote assessment of reserve capacity of outburst alpine lakes

V.G. Konovalov*, V.A. Rudakov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*vladgeo@gmail.com

Article accepted for publication on February 9, 2016

Keywords: *dammed break-dangerous lake, digital relief model, Pamir, remote sensing.*

Summary

Results of distant satellite sounding (the TERRA satellite) of high-mountainous areas and digital models SRTM 4.1 and ASTER DEM G2 of the same relief were used to calculate the following parameters of high-mountain dammed glacial lakes: area, depth, the water volume, excess of the dam above the water level. It is important for estimation of the water volume that can be dangerous for a break-through of a dammed lake. Formulas deduced to calculate the depth and volume of a lake for several sections of its area were tested and proposed. It is demonstrated that the regression equation $V = H_{max} \times F$, where H_{max} is maximum depth of the lake, can be used as the parameterization of the formula «lake volume V equals the product of the area F on average depth D ». More precise values of the coefficients a and b in the formula $V = aF^b$ were also obtained. Parameters and the water volumes of lakes were estimated for the river Gunt (right tributary of Pyanj River) basin. According to [28], there are 428 high-mountain lakes in this region with their total area ≥ 2500 m². For basin Inflow of melted snow and glacier water caused by the rise of mean summer air temperatures in 1931–2015 was estimated for the lake Rivankul basin (the Pamir Mountains).

Статья принята к печати 9 февраля 2016 г.

Ключевые слова: *дистанционное зондирование, Памир, прорывоопасные озёра, цифровая модель рельефа.*

Результаты дистанционного зондирования высокогорных территорий со спутника TERRA и цифровые модели рельефа SRTM 4.1 и ASTER DEM G2 использованы для расчёта параметров прорывоопасных озёр: площади; глубины; потенциального резервного объёма; превышения плотины над урезом воды. Получены и проверены формулы для расчёта глубины и объёма озёр для нескольких интервалов их площади. Показано, что в качестве параметризации формулы «объём озера V равен произведению площади F на среднюю глубину D » может быть использовано уравнение регрессии $V = H_{max} \times F$, где H_{max} – максимальная глубина озера. Получены уточнённые значения коэффициентов a и b в формуле $V = aF^b$. Параметры и резервный объём озёр определены в бассейне р. Гунт (правый приток р. Пяндж), где, по данным [28], находится 428 высокогорных озёр общей площадью ≥ 2500 м². Для бассейна высокогорного оз. Риванкуль выполнена оценка притока талой снеговой и ледниковой воды в связи с ростом на Памире в 1931–2015 гг. средней летней температуры воздуха.

Введение

Прорывы подпруженных высокогорных озёр относятся к классу опасных и особо опасных гидрологических явлений [5]. Опубликованные антологии этих событий, например [1–3, 6, 14, 17, 21, 23, 31], показывают, что они широко распространены в горных областях Земли. В ряде

случаев эти опасные явления приводят к человеческим жертвам и разрушениям жилых и производственных сооружений. Напомним некоторые, наиболее известные из них

Иссыкский сель 7 июля 1963 г. был одним из самых крупных и разрушительных селевых потоков на территории СССР. Сель образовался в результате переполнения оз. Жарсай талой лед-

никовой водой с расположенного выше Жарсайского ледника. Гигантский грязекаменный селевой поток, содержащий огромные валуны и вековые ели, обрушился в оз. Иссык. Удар был такой силы, что озеро выплеснулось из берегов, а катера и лодки с людьми волны разбили о берег. Начался интенсивный размыв естественной плотины, и через несколько часов озеро перестало существовать. Далее на пути селя оказался город Иссык (население 21,6 тыс. жителей), где грязекаменная лава разрушила множество домов, водозаборные сооружения ГЭС и подвалы знаменитого винзавода «Иссык». По официальным данным погибли более 100 человек [8].

4 августа 1985 г. в моренно-ледниковое оз. Диг Тшо (Dig Tsho) площадью 0,41 км² и глубиной 18 м, расположенное в Непале, недалеко от горы Эверест, сошла ледово-каменная лавина. Эта лавина вызвала волну высотой около 5 м, которая разрушила подпруживающую плотину и вызвала опорожнение озера в течение 4–6 часов. Катастрофический паводок в р. Дуд-Коси, распространившийся на 50 км, уничтожил мосты, дома, сельскохозяйственные земли и почти завершённую ГЭС Намче за две недели до её ввода в эксплуатацию. Общая сумма ущерба составила 3 млн долларов, погибли пять человек [23].

Один из районов распространения ледниковых и моренно-ледниковых озёр расположен в Перу на восточном склоне хр. Кордильера-Бланка [14, 31]. Здесь, по данным [31], находится 514 озёр гляциального генезиса площадью более 5000 м² и объёмом от 100 тыс. до 79 млн м³. Для режима нескольких озёр характерны форс-мажорное переполнение, прорыв подпруживающей плотины и образование экстремальных паводков и селей. Так, 13 декабря 1941 г. сель, спровоцированный прорывом высокогорного оз. Палкакоча (Palcasocha), стал причиной катастрофы, в которой погибли 5000 человек, разрушены треть города Уарас и несколько селений [31].

Хорошо известны Алмаатинские сели 1951, 1956 и 1973 гг. [1–3, 8 и др.], вызванные аномальным сбросом воды из подпруженных моренно-ледниковых озёр в бассейне р. Малая Алмаатинка. Для предотвращения последствий прорыва моренно-ледниковых озёр в 1966 г. была построена селезащитная плотина, которая спасла г. Алма-Ата от возможного разрушения в результате катастрофического селя 1973 г.

По повторяемости рассматриваемые опасные явления можно разделить на систематические и регулярные (например, ежегодные прорывы оз. Мерцбахера на Тянь-Шане [12], а также озёр Тальсеква и Джордж [32] на Аляске); число последних значительно меньше, чем первых. Существенная разница между ними состоит в том, что регулярные и поэтому удобные для исследований события происходят примерно через одинаковые промежутки времени, а для систематических, а также случайных опасных явлений эта закономерность не свойственна, что затрудняет их постоянное изучение методами обработки материалов аэрофотосъёмки и наземных наблюдений.

Постановка задачи, исходные данные

Для оценки состояния и изменений режима подпруженных высокогорных озёр необходим регулярный мониторинг параметров таких объектов, число которых на Земле составляет не менее нескольких тысяч. Одна из важных характеристик озёр — изменение их объёма ΔV , которое равно произведению двух сомножителей: 1) $dZ = Z(t_2) - Z(t_1)$ — разности абсолютной высоты поверхности озера Z за известный интервал времени $\Delta T = t_2 - t_1$ и 2) постоянной F_1 или меняющейся площади $F_2(\Delta T)$ конкретного объекта. Запишем оба варианта определения ΔV в виде формул (1) и (2):

$$\Delta V_1 = dZ \times F_1; \quad (1)$$

$$\Delta V_2 = dZ \times F_2(\Delta T). \quad (2)$$

Оценка разности ΔV_{max} между максимально возможным V_{max} и фактическим $V(t)$ объёмами наполнения, т.е. потенциальный резервный объём, может служить для озёр одним из показателей прорывоопасности. Очевидно, что получение регулярных сведений о ΔV_{max} для всей совокупности или репрезентативной выборки рассматриваемых объектов наиболее реально, если для оценки площади и абсолютной высоты поверхности высокогорных озёр в моменты t_2 и t_1 использовать геоинформационные средства обработки спутниковых изображений и цифровую модель рельефа (ЦМР) в качестве топографической основы. При этом время создания ЦМР также должно отражать состояние озёр в моменты t_2 и t_1 . Поэтому основной целью наше-

го исследования служат способы и результаты определения ΔV_{max} для высокогорных озёр при отсутствии форс-мажорных внешних воздействий на подпруживающую плотину.

Для оцифровки контуров озёр в географических координатах использованы их изображения в оптическом диапазоне со спутника среднего разрешения TERRA (сканер ASTER), обеспечивающего глобальное пространственное покрытие снимками территории Земли. Разрешающая способность снимков ASTER — 15 м, что достаточно для надёжной идентификации объектов площадью не менее 1000 м². Повторность сканирования одного и того же объекта равна 16 дням, и это (путём отбраковки нерепрезентативных снимков) позволяет избавиться или уменьшить влияние таких помех, как облачность, сезонный снежный покров и летние снегопады. В расчётах по уравнениям (1) и (2) следует использовать ЦМР SRTM 4.1 или мозаики (tiles) откорректированных файлов ASTER DEM G2 в формате один градус по долготе и по широте.

Наибольшая доля недоуверенности (uncertainty) в оценках изменения объёма озёр методом определения разности высоты поверхности на известной площади за некоторый интервал времени связана с качеством различных версий цифровой модели рельефа: ASTER DEM; ASTER DEM G2; SRTM 4.1. Многочисленные исследования, например [29], показали, что среднеквадратичная ошибка определения абсолютной высоты в ЦМР зависит от ряда объективных причин, в том числе: от количества и качества опорных точек; наличия пробелов и артефактов на стереоснимках; состояния и типа донной поверхности (степь, водная поверхность, лес и пр.). В работе [29] по результатам экспериментов в Японии и США приведены следующие среднеквадратичные ошибки определения абсолютной высоты в ЦМР, м: ASTER DEM — 9,34; ASTER DEM G2 — 8,68; SRTM — 4,01. Поскольку качество перечисленной информации в первом приближении выглядит достаточно приемлемым, изображения со спутника TERRA (сканер ASTER), цифровые модели рельефа SRTM 4.1 (пространственное разрешение 90 м) и мозаики ASTER DEM G2 (пространственное разрешение 30 м) использованы в работе для оценки изменения объёма высокогорных озёр. Одним из способов оценки качества ЦМР с помощью ASTER DEM и ASTER DEM G2

в случае консервативности уровня поверхности озёр может служить сравнение определений высоты Z с использованием крупномасштабной топографической карты или с результатами применения ЦМР SRTM 4.1 как наиболее точной.

Широкое применение рассмотренных далее способов определения параметров озёр для локального, регионального или глобального мониторинга ΔV_{max} представляет собой в основном технологическую задачу, связанную с организацией получения и обработки значительных объёмов регулярной спутниковой информации.

Методика

Степень влияния плотины на естественный режим стока из подпруженного озера можно охарактеризовать таким показателем, как наличие или отсутствие поверхностного стока из озёрной котловины. В первом случае плотина не представляет собой препятствие для естественного руслового стока (например, оз. Яшилкуль — транзитный резервуар для стока р. Гунт), во втором служит потенциальным источником образования резервного объёма воды ΔV_{max} в озёрной котловине в результате форс-мажорных или систематически увеличивающихся её площади и объёма. Предельная величина ΔV_{max} равна разности между объёмами озера при возможном наполнении до максимальной высоты плотины и при современном уровне озера. Оценка ΔV_{max} на основе уравнений (1) и (2) состоит из двух этапов:

1) дешифрирование и оцифровка в географических координатах контура озера на снимке ASTER в видимом диапазоне; определение площади объекта; построение вертикального профиля рельефа в бассейне озера с помощью ЦМР и компьютерных программ ENVI или GLOBAL MAPPER;

2) тематическая обработка результатов первого этапа для получения искоемых значений ΔV_{max} и сопутствующих гляцио-гидрологических характеристик режима озера. Более подробно об этом сказано далее.

Расчёт резервного объёма прорывоопасных озёр. Оценки значимости ΔV_{max} как показателя прорывоопасности подпруженных высокогорных озёр получены на примере бассейна р. Гунт (правый приток р. Пяндж — основной составляющей р. Амударья). Возможная причина регулярного/

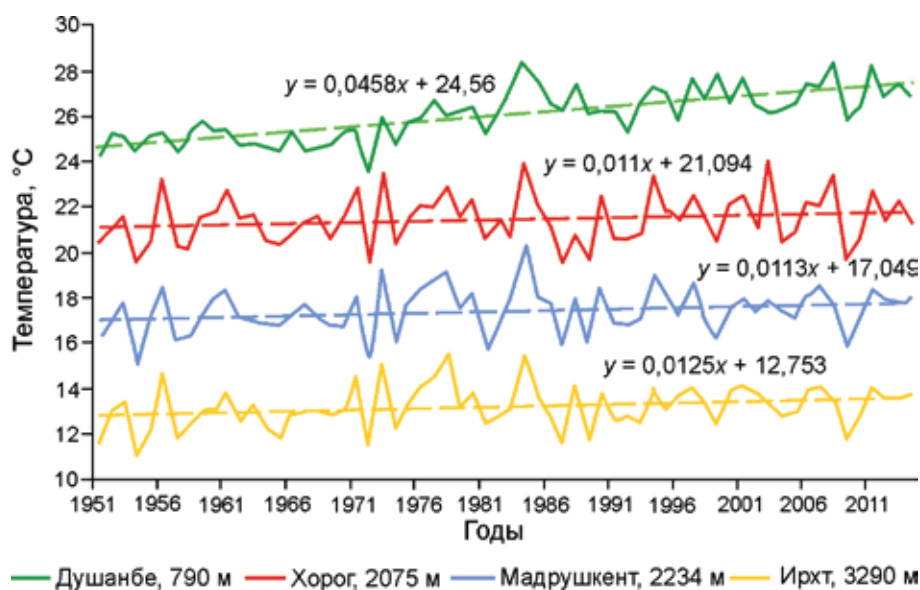


Рис. 1. Многолетнее изменение средней летней температуры воздуха T_s на метеостанциях Памира.

Штриховыми линиями показан линейный тренд T_s для соответствующих метеостанций

Fig. 1. Long-term change in the averaged summer air temperature at the meteorological stations of the Pamirs.

The dashed lines show the linear trend of T_s to the relevant weather stations

систематического увеличения объёма озёр в районе исследования — возрастание притока воды в результате повышенных осадков и/или таяния ледников и снега в бассейне озера, а также ухудшения условий фильтрации воды сквозь плотину. Анализ трендов изменения средней летней температуры воздуха T_s и суммы осадков P за характерные периоды октября—апреля и июня—августа в 1951–2014 гг. выполнен по данным 13 метеостанций (МС) Памира, расположенных на высоте 329–3747 м над ур. моря (36,73–37,43° с.ш., 68,56–72,63° в.д.). На всех метеостанциях отмечен (см. пример на рис. 1) устойчивый синхронный рост температуры воздуха, а по данным четырёх метеостанций — однообразный положительный тренд изменения суммы осадков за октябрь—апрель и июнь—август. Оба этих фактора благоприятны для систематического увеличения объёма прорывоопасных озёр, которое отражают повышение уровня и увеличение площади водоёма. Для оценки резервного объёма ΔV_{max} высокогорных озёр использованы следующие две операции.

1. Оцифровка контура озера в географических координатах на изображениях в оптическом диапазоне со спутника TERRA или в интернет-сервисе GOOGLE EARTH PRO и наложение файла с полученным контуром на цифровую модель рельефа (ЦМР) района, загруженную в программе GLOBAL MAPPER.

2. Далее в среде GLOBAL MAPPER выполняем следующие процедуры: а) определение проекции на горизонтальную поверхность длины за-

данного профиля по тальвегу долины (отрезок AD на рис. 2, а) и половины длины между отметками начала и конца озера (отрезок AB на рис. 2, а, $AB = m_1 = m_2$); б) определение разности ΔZ высоты в точках начала озера и конца профиля AD (отрезок CD на рис. 2, а); в) определение с помощью GLOBAL MAPPER или ArcGIS площади озера при современном уровне воды; г) расчёт максимальной глубины озера H_{max} (отрезок BE на рис. 2, а, а также соответствующее обозначение на рис. 2, б); д) расчёт минимальной высоты H_1 подпруживающей плотины относительно уреза воды (показана как разность высот Z_1 и Z_2 на рис. 2, б, в); е) расчёт резервного объёма озера (см. рис. 2, г) как разности между объёмами заполнения котловины озера до высоты плотины при будущих значениях площади (контур 2 на рис. 2, г) и при современных величинах объёма и площади (контур 1 на рис. 2, г). При этом будущее значение площади озера получаем с помощью ArcGIS или GLOBAL MAPPER после оцифровки в географических координатах изолинии минимальной высоты плотины в цифровой модели рельефа для бассейна озера. На рис. 2, г — это изолиния высоты 3854 м (все высоты в статье даны над уровнем моря). К характеристикам размеров подпруживающей плотины относятся превышение над урезом воды ($H_1 = Z_1 - Z_2$) и толщина завала $H_2 = Z_2 - Z_3$, которые определяются на основе продольного профиля рельефа выше и ниже озера, получаемого с помощью ЦМР и программ ENVI или GLOBAL MAPPER.

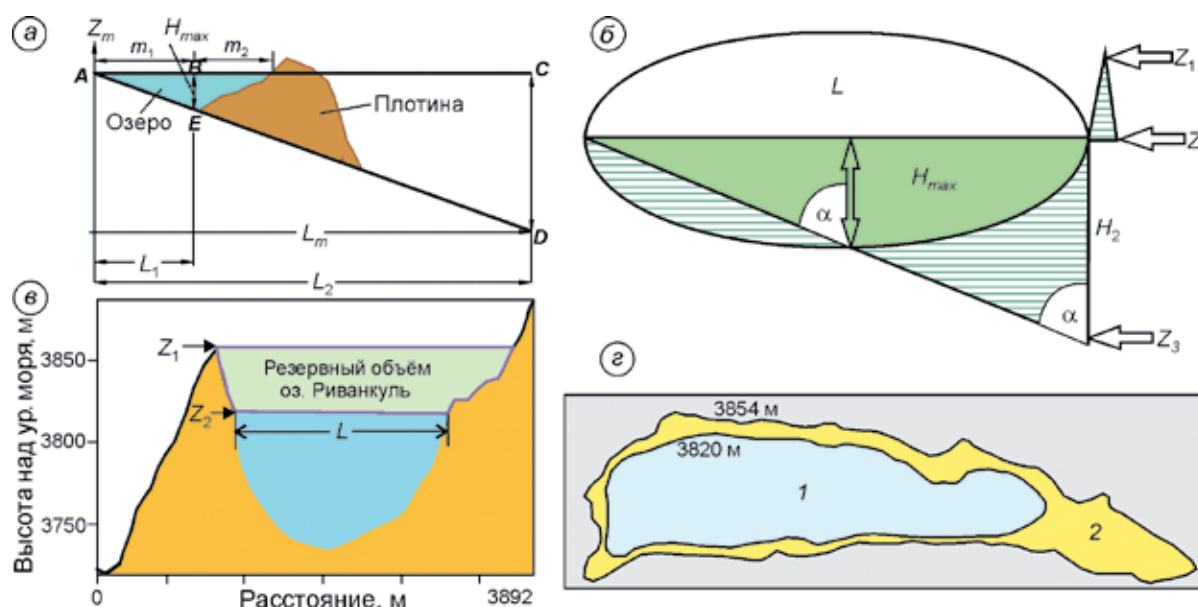


Рис. 2. Определение морфометрических параметров озера:

a – схема расчёта максимальной глубины высокогорного озера по материалам дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа; по оси ординат – высота над уровнем моря, по оси абсцисс – расстояние, м; объяснение см. в тексте; *b* – аппроксимация вертикального профиля глубины по продольной оси высокогорного озера: Z_1 – абсолютная высота плотины над уровнем моря; Z_2 – абсолютная высота уреза воды; Z_3 – минимальная отметка подпруживающей плотины над уровнем моря; $H_2 = Z_2 - Z_3$; H_{max} – максимальная глубина; *c* – вертикальный профиль котловины оз. Риванкуль; высота плотины равна $Z_1 - Z_2$; L – длина озера; *d* – изменение площади оз. Риванкуль в зависимости от разности высот ΔZ между уровнем озера Z_2 и подпруживающей плотины Z_1 , т.е. $\Delta Z = Z_1 - Z_2$. 1 – современная площадь ($\Delta Z = 40$ м); 2 – возможная площадь озера ($\Delta Z = 0$ м); 3820 и 3854 – соответственно изолинии высоты уровня оз. Риванкуль и верхней части подпруживающей плотины, м

Fig. 2. Determination of morphometry parameters of lake.

a – scheme for calculating the maximum depth of an alpine lake on materials of remote sensing and digital terrain model; explanation in the text; *b* – approximation of the vertical profile of the depth of the longitudinal axis of the alpine lake. Z_1 – absolute altitude of the dam above sea level, Z_2 – absolute altitude of the water's edge, Z_3 – minimum mark of the dam above sea level, L – length of the lake, $H_2 = Z_2 - Z_3$, H_{max} – maximum depth; *c* – vertical profile of the basin of the Rivankul Lake. The height of the impounded dam = $Z_1 - Z_2$, L – length of the lake; *d* – change in the area of Rivankul Lake depending on the difference ΔZ between the elevations of the level lake Z_2 and impounded dam Z_1 , $\Delta Z = Z_1 - Z_2$. 1 and 2 are current ($\Delta Z = 40$ m) and possible area ($\Delta Z = 0$ m) of the lake. 3820 and 3854 – are correspondingly isolines of elevation for the Rivankul Lake level and upper part of impounded dam

Изложенные операции выполнены для 74 высокогорных озёр в бассейнах рек Гунта и Шахдары – притока Гунта (рис. 3). В этой выборке минимальная площадь озера равна 0,064 км², а максимальная – 43,9 км². Относительная высота подпруживающей плотины над урезом воды изменялась от 0 до 78 м. В данном случае нулевая высота плотины указывает на свободный поверхностный сток из озера. Далее, в качестве примера, приведены результаты расчёта потенциального резервного объёма ΔV_{max} трёх озёр (Риванкуль, Зардив и Чапдара), который, при соответствующих значениях увеличения площади на 0,68, 0,41 и 0,24 км² и превышении плотины над современным уровнем воды на 40, 78 и 7 м составляет 25,9 млн м³ (103%), 12,3 млн м³ (80%) и

14,1 млн м³ (11%). В скобках указана доля ΔV_{max} от современного объёма. Наибольшую опасность представляет собой заполненное до верха плотины оз. Риванкуль, прорывная волна которого и вызванный ей сель могут достигнуть г. Хорог.

Изменение минимальной относительной высоты подпруживающей плотины H_1 над урезом воды, наряду с ΔV_{max} , служит важным показателем прорывоопасности озера при регулярной/систематической дистанционной оценке его параметров. Очевидно, чем больше H_1 , тем продолжительнее будет процесс заполнения озера до верха плотины при постепенном росте уровня в условиях современного увеличения средней летней температуры воздуха (см. рис. 1) и отсутствия форс-мажорных разрушений подпруживающей плотины. Резуль-

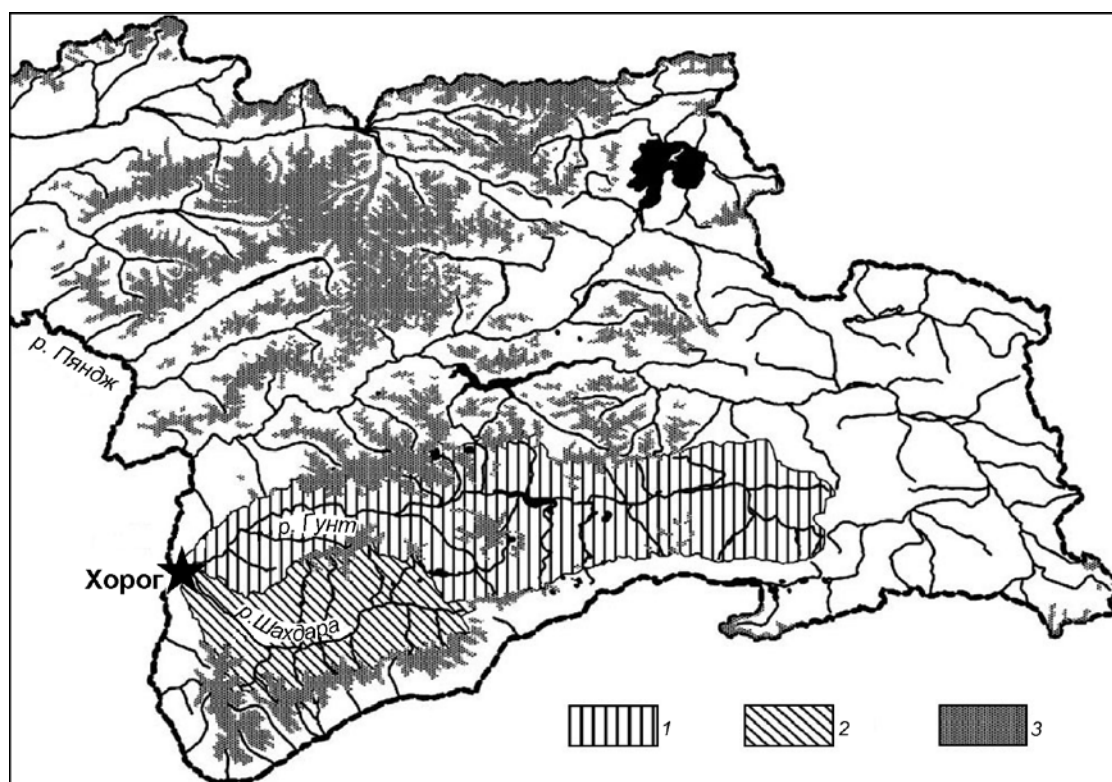


Рис. 3. Гидрографическая схема бассейнов рек Гунт (1), Шахдара (2) и сопредельной территории Памира (3 – ледники)

Fig. 3. Hydrography sketch of Gunt (1) and Shahdara (2) river basins and adjacent territory of the Pamir (3 – glaciers)

таты расчёта параметров этого процесса на примере оз. Риванкуль приведены в следующем разделе.

Расчёт притока талой воды в высокогорное озеро. Формирование ежегодного притока воды W_R в оз. Риванкуль, расположенного на высоте 3510 м, происходит почти исключительно благодаря таянию снега и льда на площади оледенения и снега на внеледниковой территории. Площадь водосбора оз. Риванкуль F_{bas} равна 45,1 км², средняя взвешенная высота – 4378 м, коэффициент оледенения составляет 38%. По оценке [16], сезонный снег в конце августа ставится в бассейне Гунта на высотах от 4500 до 5000 м. Расчёт изменения W_R в 1931–2015 гг. в связи с ростом средней летней температуры воздуха выполнен путём определения составляющих упрощенного уравнения водного баланса:

$$W_R = k_1 \times (P - E)_{Z0} \times F_{bas} + k_2 \times Ab(Z2) \times F_{gl}, \quad (3)$$

где k_1 – коэффициент стока с внеледниковой поверхности бассейна озера, равен 0,70; k_2 – коэффициент стока с площади оледенения F_{gl} , равен 0,89 с учётом, согласно [13], потерь на

внутреннее питание в областях аккумуляции ледников; P и E – соответственно годовые слои осадков и испарения на средней взвешенной высоте бассейна Риванкуль $Z0$; $Ab(Z2)$ – годовой слой абляции на средней высоте ледника $Z2$ (аналог фирновой границы).

Для определения составляющих правой части уравнения (3) использованы технологии ГИС, известные источники данных, апробированные гляциологические методы и зависимости [4, 10, 13, 16, 19, 20, 26, 30, 33]. Расчёт годовых осадков P_y на высоте $Z0$ выполнен по эмпирической формуле для бассейна Гунта:

$$P_y = 19\,631 - 254,2 \times Long + 0,2 \times Alt - 40,9 \times Lat, \quad (4)$$

где $Long$ и Lat – соответственно долгота и широта пункта, градусы; Alt – высота, м.

Для расчёта испарения использована методика, подробно изложенная в работе [26]. Изменение осадков в 1931–2015 гг. при определении W_R не принято во внимание ввиду отсутствия многолетнего ряда данных P_y , полностью синхронного с температурой воздуха. В итоге средние

Таблица 1. Параметры оледенения и средний приток талой воды в оз. Риванкуль за 1931–1960, 1961–1990, 1991–2015

Источник	Параметры оледенения					Средняя летняя температура воздуха на высоте Z2 $T_s(Z2)$, °C			Средняя годовая абляция на высоте Z2 $Ab(Z2)$, мм			Средний годовой объём стока от таяния снега и льда на площади F_{gl} $Vol(F_{gl})^*$, млн м ³		
	Число ледников N_{gl}	площадь ледников F_{gl} , км ²	высота, м											
			min Z1	mean Z2	max Z3	1931–1960	1961–1990	1991–2015	1931–1960	1961–1990	1991–2015	1931–1960	1961–1990	1991–2015
[30]	19	16,9	4623	4857	5091	–2,0	–1,9	–1,7	448	464	499	6,7	7,0	7,5
[27]	29	18,9	4676	4863	5159	–2,0	–1,9	–1,7	440	456	491	7,4	7,7	8,2
[17]	20	16,0	4690	4906	5196	–2,4	–2,3	–2,1	384	399	430	5,5	5,7	6,1
Среднее		17,3	4663	4875	5149	–2,1	–2,0	–1,8	421	437	470	6,6	6,9	7,4

* $Vol(F_{gl}) = Ab(Z2) \times F_{gl} \times K_R$; $K_R = 0,89$ – коэффициент стока.

годовые значения P_y и E на высоте Z0 бассейна оз. Риванкуль оказались равными соответственно 548 и 269 мм. Величина P_y хорошо согласуется со значением максимальных снегозапасов 320–550 мм в интервале высот 4500–5000 м, приведённых в [4] для средней части Гунта.

Значение $Ab(Z2)$ найдено по следующей формуле из работы [13]:

$$Ab = 1,33 \times (T_s + 9,66)^{2,85}, \quad (5)$$

где для оценки средней летней температуры воздуха T_s на высоте Z2 использована экстраполяция данных метеостанции Хорог по линейной зависимости $T_s = T_s(Z)$ с вертикальным градиентом 8,36 °C/км, принятым в соответствии с исследованиями этой задачи в работе [10]. При расчёте $Ab(Z2)$ учтено многолетнее изменение T_s в 1931–2015 гг. Результаты определения притока в оз. Риванкуль в 1931–2015 гг. талой снеговой и ледниковой воды с площади оледенения в этом бассейне представлены в табл. 1. Ввиду несогласованности морфометрических параметров оледенения в имеющихся Каталогах [20, 30, 33] использованы данные из трёх источников и для каждого выполнены расчёты величины $Ab(Z2)$ в уравнении (3). Суммарный годовой объём притока W_R за 1931–2015 гг. в среднем оказался равным 15,5 млн м³. Эта величина подтверждается независимой оценкой стока в озеро по формуле $W_R = Mo \times F_{bas} = 14,2$ млн м³, где Mo – модуль стока, л/(с·км²). Для расчёта Mo как функции средневзвешенной высоты Alt (м над ур. моря) по данным из работы [19] получено линейное уравнение (6) для рек снегово-ледникового питания в бассейне Пянджа:

$$Mo = 105,0 - 0,022 \times Alt. \quad (6)$$

Коэффициент детерминации этой формулы – 0,78. Как видно из табл. 1, средний годовой при-

ток талой воды в оз. Риванкуль с площади оледенения в 1991–2015 гг. увеличился на 0,8 млн м³ по сравнению с 1931–1960 гг. Если предположить продолжение прироста поступления талой воды с той же интенсивностью и полагать, что он полностью будет уходить на сокращение резервного объёма оз. Риванкуль, то объём ΔV_{max} может быть заполнен ориентировочно за 32 года. Эта оценка – один из важных результатов исследования поставленной проблемы. Аналогичный расчёт можно выполнить для других прорывоопасных озёр в бассейнах рек Памира.

Определение глубины и объёма озёр. Обоснованным и однозначным вариантом дискретного определения объёма озера служит выражение

$$V = \bar{D} \times F, \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i, \text{ а } F = \sum_{k=1}^M dF_k.$$

В этих формулах $\bar{D}$ – средняя глубина озера; F – площадь озера; N – число батиметрических измерений глубины d_i ; M – число ячеек в регулярной сетке для определения площади; dF – размер ячейки по долготе и широте в растровом изображении озера. Качество определений V по формуле (7) зависит от N и dF . Массовые оценки V по формуле (7) нереальны из-за трудностей получения достаточного количества прямых измерений глубины d_i . В связи с этим предложен [11] способ параметризации (7) в виде выражения $V = H_{max} \times F$, включающий в себя модель пространственного распределения d_i . Здесь H_{max} – максимальная глубина озера, приуроченная, как правило, к середине его длины. Кроме того, в результате корреляционного анализа выборки из 103 измерений V , F , H_{max} , $H_{mean} = \bar{D}$ установлено практическое равенство коэффици-

Таблица 2. Исходные данные и параметры уравнений для расчёта объёма озёр

Заданные пределы площади F , км	Число случаев N	Площадь озера F в выборке, км ²		Параметры в формуле $V = aF^b$		Коэффициент детерминации R^2	Верхний предел величины F , для которого интегральное распределение $P(F) = 85\%$, км ²
		min	max	a	b		
$< 0,1$	86	0,00004	0,1	9,6	1,23	0,92	0,033 (73)*
$0 < F < 0,4$	115	0,00004	0,4	13,8	1,28	0,94	0,200 (98)
$F > 0,1 \leq 0,4$	29	0,103	0,4	21,5	1,54	0,39	—
$1,0 \leq F < 36$	22	1,34	35,8	21,0	1,50	0,82	—
$0 \leq F < 1,0$	136	0,00004	0,96	13,8	1,28	0,94	0,440 (116)

*В скобках дано число случаев с F большим или равным верхнему пределу.

ентов детерминации ($R^2 = 0,75 \div 0,74$) уравнений регрессии $V = f(H_{mean}, F)$ и $V = f(H_{max}, F)$. Минимальное и максимальное значения переменных V , F , H_{max} , H_{mean} в данной эмпирической выборке были равны соответственно $0,00004 \div 120$ млн м³, $0,00004 \div 3,9$ км², $0,6 \div 143$ м и $0,4 \div 73$ м. Коэффициенты детерминации уравнений регрессии $V = f(H_{mean}, F)$ и $V = f(H_{max}, F)$ варьировали от 0,58 до 0,88 в различных диапазонах V , что подтверждает приемлемость параметризации формулы (7) уравнением регрессии $V = f(H_{max}, F)$.

Расчёт максимальной глубины озёр в бассейне р. Гунт выполнен двумя способами. Первый, изложенный в работе [11], основан на принятии двух положений: 1) максимальная глубина озера H_{max} находится вблизи середины длины озера; 2) продольный вертикальный профиль глубины озера от его начала до подпруживающей плотины может быть аппроксимирован полуэллипсом, вписанным в прямоугольный треугольник (см. рис. 2, б). Оба этих положения основаны на обобщении результатов батиметрических съёмок высокогорных озёр. Формула для расчёта H_{max} имеет следующий вид [11]:

$$H_{max} = \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\arctg(L/H_2))}. \quad (8)$$

Для получения выражения (8) использованы геометрические соотношения между сторонами и углами прямоугольного треугольника и достаточно реалистичное условие постоянства угла наклона склона α по длине L . Тогда в обозначениях на рис. 2, б $\operatorname{tg} \alpha = L/H_2$, где значения L и H_2 полагаем известными в результате обработки ЦМР бассейна озера. Для расчёта H_{max} на середине длины L применена другая формула геометрии прямоугольного треугольника, которая применительно к нашей задаче записана в следующем виде: $H_{max} = 0,5L \times \operatorname{ctg} \alpha$. Обоснованием для вто-

рого способа служит условие геометрического подобия треугольников ABE и ACD (см. рис. 2, а), параметры которых для заданного контура озера и его окрестности определяем в среде GLOBAL MAPPER (см. раздел «Расчёт резервного объёма прорывоопасных озёр»). Поскольку в данном и аналогичных случаях коэффициент подобия $K_p = L_1/L_2$, максимальная глубина H_{max} (отрезок BE на рис. 2, а) на середине длины озера равна произведению $\Delta Z K_p$. Смысл L_1 и L_2 понятен из рис. 2, а. Для пересчёта H_{max} в среднюю глубину озера H_{mean} получена [9] эмпирическая формула $H_{mean} = H_{max}/2,78$ (размерность — метры). Несмотря на различия в обосновании обоих способов определения H_{max} , они дают близкие результаты.

В литературе, например [9, 21, 22, 24], распространён расчёт объёма озера по одномерным формулам $V = aF^b$, где a и b — локальные эмпирические коэффициенты. Общие недостатки локальных формул $V = aF^b$ в работах [9, 21, 22, 24] — ограниченная информационная выборка, использованная для корреляционного анализа, и неизученность правомерности пространственной экстраполяции локальных эмпирических коэффициентов. Ранее в работе [11] была подготовлена база данных по 141 озеру, которые расположены в разных регионах Земли. В настоящее время число озёр в этой базе увеличено до 158 и формула вида $V = aF^b$ (размерность — млн м³) получена для интервалов площади F , перечисленных в табл. 2. Установлено также, что, наряду с формулой $V = aF^b$, эффективным для расчёта объёма озера оказалось выражение $V = c_1 F^2 + c_2 F + c_3$, где c_1 – c_3 — эмпирические параметры.

В принципе, расчёт объёма озера по одномерным формулам $V = aF^b$ и $V = f(c, F)$ — физически некорректная процедура, поскольку в этих формулах отсутствует глубина озера. Наличие эмпирических зависимостей $V = aF^b$ и $V = f(c, F)$, с одной

Таблица 3. Средняя относительная ошибка расчёта объёма озёр δV для двух районов

Показатели	Тянь-Шань	Перу
Число озёр	25	32
Пределы площади озёр, км ²	0,007–1,40	0,008–1,48
Ошибка расчёта объёма озёр δV (%) по данным:		
[18]	482,7	69,7
[8]	478,3	77,6
[21]	478,4	69,2
авторов статьи	179,0	60,3

стороны, объясняется преднамеренным расширением диапазона значений функции V и аргумента F , что способствует искусственному увеличению коэффициента корреляции, с другой – возможно неявному учёту глубины в использованных наборах V и F . Вероятно, чем больше и разнообразнее такие наборы, тем меньше влияние неучёта глубины озера в каждой отдельной выборке значений V и F . Именно этот подход реализован при получении нашего варианта формулы $V = aF^b$ в табл. 2.

Решающим аргументом при выборе эмпирической формулы $V = V(F)$ служит её проверка на независимых данных, которая выполнена нами по материалам батиметрических измерений объёма 25 озёр на Тянь-Шане [15] и 32 озёр в Перу [29], площади которых изменялись от 0,007 до 1,4 км². Использованы формулы $V = aF^b$ из работ [9, 21, 24] и наша формула для интервала $0 \leq F < 1,0$ из табл. 3. Средняя относительная ошибка расчёта объёма озёр по различным формулам приведена в табл. 3. Как видно, лучшие результаты показала наша формула, поскольку она менее всего завышает объём. Аналогичные средние относительные ошибки (62, 225 и 657%) рассчитанного объёма озёр по формуле типа $V = aF^b$ с различными эмпирическими коэффициентами получены в работе [22].

Обсуждение

Объём высокогорных озёр V служит одной из основных характеристик для мониторинга их размеров, расчёта и прогноза гидрологического режима озёр. Очень часто такой расчёт выполняют, например в [9, 21, 24 и др.], по упрощённым эмпирическим формулам $V = aF^b$ или уравнениям регрессии $V = f(c, F)$ (здесь F – пло-

щадь озера; a, b, c – эмпирические параметры). Коэффициенты этих уравнений однозначно зависят от размера и состава эмпирической выборки. Поскольку площадь F – один из факторов (глубина, периметр, коэффициент формы, отношения параметров морфометрии и др.), определяющих объём озера, при построении эмпирической зависимости $V = V(F)$ необходимо использовать значения F , удовлетворяющие принципу «при прочих равных условиях».

Несоблюдение этого принципа неизбежно приведёт к появлению завышенной или «ложной» корреляции. Так, в работе [24] формула $V = aF^b$ получена по данным о V и F для 15 озёр, причём для 13 из них площадь была неравномерно распределена в интервале 0,0035–1,6 км², а площадь остальных двух была 5 и 6 км². Очевидны неоднородность состава эмпирической выборки и ограниченность её размера. Другие параметры (a и b) в формуле типа $V = aF^b$ найдены [9] по данным для 32 озёр на Кавказе, при этом площадь 31 озера изменялась от 0,00036 до 0,065 км². Площадь 32-го озера была равна 0,1494 км², и она существенно повлияла на вид зависимости $V = V(F)$ и параметры уравнения для расчёта объёма как функции площади.

Априорная оценка качества расчёта объёма неизученных озёр остаётся пока нерешённым вопросом, поскольку при пространственной экстраполяции модели продольного профиля глубины озера, описанной в разделе «Определение глубины и объёма озёр», следует учитывать также различия морфометрических параметров (отношения периметра к площади, длины к ширине, длины к H_{max}) и влияние многих генетических факторов на формирование и режим озёр. К этим факторам относятся: условия фильтрации воды через плотину; интенсивность накопления донных осадков в озере; расстояние от озера до питающего его ледника; подводные формы рельефа; пороги, формирующие борта и днище озёрной котловины. Из этого следует, что уравнения регрессии $V = f(H_{max}, F)$ должны быть основаны на выделенных из генеральной совокупности однородных группах озёр. В качестве первого приближения при создании таких групп в настоящей работе был использован размер озёр. Дальнейшее улучшение уравнения регрессии $V = f(H_{max}, F)$ может быть получено при учёте морфологического типа озёр по аналогии с предложением [22] по совершен-

ствованию другой формулы для расчёта объёма $V = f(F)$. При этом целесообразно ориентироваться на наиболее распространённые и прорывоопасные типы озёр. Например, на территории Кыргызстана к этой категории относятся моренные и моренно-ледниковые озёра [6]. Продолжение нашего исследования будет направлено на пополнение имеющейся глобальной совокупности сведений об озёрах и извлечение из неё групп с характерными размерами и морфологическими типами.

Заключение

1. Множество высокогорных озёр разнообразных форм, размеров и генезиса служит одним из элементов ландшафта на всех континентах Земли. Потенциально наиболее прорывоопасными могут быть моренные и моренно-ледниковые озёра. Такие озёра широко распространены во всех областях горного оледенения Земли. К данным о числе и площади высокогорных озёр, упомянутых в ранее процитированных работах [28, 31], добавим далеко не полный ряд региональных сведений. Ниже после названия региона в квадратных скобках приведены ссылки на источник, а в круглых (через разделительный знак) — предварительные оценки числа и площади озёр:

а) горные области Бутана, Непала, Индии, Китая, Пакистана [25] (8790/801,83 км²);

б) Большой Кавказ [7] (1852/95,8 км²);

в) горные области некоторых стран Западной Европы, исключая озёра площадью более 100 км², [<https://ru.wikipedia.org/>], [<http://ru.encydia.com/en/>], [<https://en.wikipedia.org/>], Австрия (44/220,1 км²), Исландия (44/69,7 км²), Норвегия (317/5100,1 км²), Швейцария (276/640,2 км²);

г) Канада [27] (175/15,0 км²);

д) Таджикистан, кроме озёр Каракуль и Сарезского, [18] (1300/245 км²);

е) Кыргызстан, кроме озёр Иссык-Куль, Сонкуль, Чатыркуль, [<https://en.wikipedia.org/>] (1920/150 км²).

Информация по перечисленным озёрам весьма неоднородна. Преобладают данные о площади озёр. После расширения списка горных областей следует выбрать более содержательные данные и использовать их для совершенствования расчёта объёма озёр по формулам

$V = aF^b$, $V = f(H_{max}, F)$, как это сделано в работе [11] и в разделе, посвящённом определению глубины и объёма озёр (результаты см. в табл. 2), и, в конечном счете, создать региональные каталоги высокогорных озёр.

2. В число превентивных мер по уменьшению ущерба от стихийных природных явлений в бассейнах рек Памира должна входить система дистанционного мониторинга опасных и особо опасных гидрологических явлений, содержащая, как минимум: а) сведения о распространении прорывоопасных озёр и их морфометрических параметрах по данным спутниковых и наземных обследований; б) базу данных о современном оледенении Памира и его динамике; в) сведения об объектах, подверженных ущербу в результате стихийных природных явлений; г) климатические, гидрологические и почвенно-геологические характеристики Памира, имеющие значение для оценки состояния высокогорных озёр и прогноза их переполнения или возможного прорыва.

3. Рассмотренные в работе характеристики озёр (площадь, текущий и резервный объёмы, превышение подпруживающей плотины над урезом воды и условия стока из них) следует использовать в качестве показателей прорывоопасности. В нашей работе показано, что эти параметры легко поддаются определению с помощью цифровой модели рельефа, изображений со спутников среднего разрешения и применения гляцио-гидрологических методов расчёта притока воды в озеро. При оценке изменения высоты поверхности озёр необходимо избегать разности близких значений уровня.

4. Параметризация формулы «объём озера V равен произведению площади F на среднюю глубину D » региональными/локальными уравнениями регрессии $V = f(H_{max}, F)$ физически более корректна по сравнению с эмпирической формулой $V = aF^b$, поскольку включает в себя площадь и глубину озера.

Литература

1. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 154 с.
2. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 143 с.

3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 319 с.
4. Геткер М.И., Царев Б.К., Архипова О.М., Усмано-ва Д.Ш. Методические рекомендации по определению характеристик режима снежного покрова в горах Средней Азии. Ташкент: изд. САНИГМИ, 1988. 147 с.
5. ГОСТ Р 22.1.08–99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных гидрологических явлений и процессов. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 11 с.
6. Ерохин С.А. Мониторинг прорывоопасности горных озер Кыргызстана: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геол.-минер. наук. Бишкек: Институт водных проблем и гидроэнергетики, 2012. 158 с.
7. Ефремов Ю.В. Новые данные об озерах Центрального Кавказа // Изв. РГО. 1991. Т. 123. Вып. 6. С. 515–518.
8. Казахстанская Энциклопедия. www.encyclopedia.kz; <https://ru.wikipedia.org/wiki/Иссык>
9. Кидяева В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озер: Автореф. канд. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М: МГУ, 2014. 29 с.
10. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 237 с.
11. Коновалов В.Г. Дистанционный мониторинг прорывоопасных озер на Памире // Криосфера Земли 2009. Т. XIII. Вып. 4. С. 80–89.
12. Коновалов В.Г. Наполнение и сброс воды из прорывоопасного озера Мерцбахера (Тянь-Шань) // Геориск. 2012. № 4. С. 26–38.
13. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 287 с.
14. Ли Дэвис. Природные катастрофы: Т. 1. Смоленск: Русич, 1996. 181 с.
15. Озера Тянь-Шаня и их история / Ред. А.В. Шнитников. Л.: Наука, 1980. 230 с.
16. Оледенение Памиро-Алая / Ред. В.М. Котляков. М.: Наука, 1993. 256 с.
17. Оценочные доклады по возникающим экологическим проблемам Центральной Азии. Устойчивость горных озер Центральной Азии. Риски воздействия и принятия мер. Ашхабад, 2006. 134 с.
18. Реки и озера Таджикистана. Душанбе: изд. Главного управления по гидрометеорологии и наблюдениям за природной средой Министерства охраны природы Республики Таджикистан, 2003. 23 с.
19. Шульц В.Л., Шалатова Л.И., Лукина Н.К., Видинева Е.М. Гидрологическая характеристика верхней части бассейна Амударьи. Ташкент: Фан, 1975. 122 с.
20. Щетинников А.С. Морфология оледенения речных бассейнов Памиро-Алая по состоянию на 1980 год (справочник). Ташкент: изд. САНИГМИ, 1997. 148 с.
21. Anacona P. I., Norton K.P., Mackintosh A. Moraine-dammed lake failures in Patagonia and assessment of outburst susceptibility in the Baker Basin // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2014. 14. P. 3243–3259. doi: 10.5194/nhess-14-3243-2014.
22. Cook S.J., Quincey D.J. Estimating the volume of Alpine glacial lakes // Earth Surface Dynamics. 2015. № 3. P. 559–575. doi: 10.5194/esurf-3-559-2015.
23. Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods in Nepal. Kathmandu: ICIMOD, 2011. 109 p.
24. Huggel C., Kääb A., Haeblerli W., Teyssie P., Paul F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. Canadian // Geotechnical Journ. 2002. V. 39. № 2. P. 316–330.
25. Ives J.D., Shrestha R.B., Mool P.K. Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, 2010. 66 p.
26. Kononov V.G. New approach to estimate water output from regional populations of mountain glaciers in Asia // Journ. GES. 2015. V. 8. № 2. P. 13–29.
27. McKillop R.J. Objective preliminary assessment of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia: MS Thesis. Canada, Simon Fraser University, Vancouver, 2005. 153 p.
28. Mergili M., Schneider J.F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. № 11. P. 1447–1462. doi: 10.5194/nhess-11-1447-2011.
29. Meyer D. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. NASA LP DAAC and the Joint Japan-US ASTER Science Team, 2011. 26 p.
30. Randolph Glacier Inventory. Version 5, released 20 July 2015. <http://www.glims.org/RGI/index.html>
31. Rodríguez Portocarrero C.A. The glacial lake handbook reducing risk from dangerous glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru. The Mountain Institute Washington, DC, 2014. 69 p.
32. Stone K.H. The annual emptying of Lake George, Alaska. Department of Geography, University of Wisconsin, 1952. P. 26–40.
33. WGI – World Glaciers Inventory. Version 11/19/2007. <http://nsidc.org/data/g01130.html>