

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КАТАЛОГИЗАЦИЯ ГОРНЫХ ОЗЕР С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

^{1,2}Наврузшоев Х.Д., ²Фазылов А.Р., ^{3,2}Гулаёзов М.Ш., ^{3,2}Сафаров М.С.

¹ ГНУ «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана»,
г. Душанбе, Таджикистан

²Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук
Таджикистана (ИВПГЭиЭ НАНТ), г. Душанбе, Таджикистан

³Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды
Центральной Азии (Душанбе), Национальной академии наук Таджикистана, г.
Душанбе, Таджикистан

Аннотация: горные озера бассейна реки Гунт формируются в основном благодаря деятельности ледников - в пропаханных ими котловинах, в том числе и на конце собственно ледника за счет образовавшейся естественной плотины (конечная морена) в виде вала из обломков породы, отнесены к удаленным, с точки зрения расстояния, геологическим угрозам. Исследования горных озер включало в себя: оценку возможности их прорыва, получение параметров гидрометеорологического режима водоемов. В настоящее время в Таджикистане отсутствует единый каталог горных озер с полноценными данными по количеству, высотному расположению, зеркальной площадью, типизацией озер и т.п. Результаты реализованных в 2022 году исследований, с применением методов и технологий дистанционного зондирования позволили осуществить оцифровку и каталогизацию горных озер бассейна, реки Гунт, Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО). Впервые был составлен подробный каталог горных озер данного бассейна, а инвентаризация была выполнена на основе данных дистанционного зондирования с применением методики NDWI с использованием спутниковых снимков Landsat 8 и 9 OLI, что позволило каталогизировать в бассейне реки Гунт 378 горных озера с общей площадью 85,5 км². Установлено, что на некоторых озерах наблюдается интенсивный рост их зеркальной площади, ведущий к повышенному уровню прорывоопасности требующее постоянного мониторинга и разработку мероприятий по ликвидации возможного их прорыва.

Ключевые слова: бассейн, река, Гунт, дистанционное зондирование, каталогизация, NDWI, ГИС, горное озеро, ледниковое озеро, Landsat.

Введение

Характерной особенностью ледников Центральной Азии, в том числе и Таджикистана является то, что они отступают с высокой скоростью, ведущее к переполнению чаши ледниковых озер находящихся на их языковой части [Семакова Э.Р., Семаков Д.Г. 2017]. Установлено, что они сами провоцируют откол языковой части, повышая тем самым риск схода селевых потоков,

нанеся вред горному сообществу и экономике территорий, а также создают реальную угрозу населению и хозяйственной инфраструктуре, расположенных в поймах рек и районах, расположенных ниже по течению.

“По результатам дешифрирования данных дистанционного зондирования, полученных в 2018 г., только в бассейне реки Гунт было выявлено 644 горных озера площадью более 500 м². В течение предыдущих десятилетий прорывы ледниковых озер в высокогорьях ГБАО неоднократно приводили к катастрофическим прорывам ледниковых озер: в верховьях рек Хидоржевдара в 1991 г., Даштдара в 2002 г. (Рошткалинский район), Кофарендара (Ишкашимский районе) в 2008 г. Возникшие ситуации спровоцировали формирование селевых потоков, нанесших значительный ущерб населению, хозяйствам и инфраструктуре вниз по долине. К сожалению селевой поток 2002 года, по Даштдаре сопровождался, к сожалению, человеческими жертвами” [Пирмамадов и др., 2020]. Следует отметить, что “В ходе селевой катастрофы 2015 г. сформировался конус выноса, перегородивший р. Гунт, что привело к образованию подпрудного озера, названного Барсемкуль. В результате было затоплено около 70 хозяйств, более 2 км автодороги, соединяющей Таджикистан с Китаем и Кыргызстаном, 5 мостов (из них 3 автомобильных и 2 пешеходных), медицинский пункт, школа, торговые точки, сады и плодородные земли, десятки километров оросительных сетей. Также была разрушена основная высоковольтная линия подачи электроэнергии от ГЭС Памир-1” [Черноморец и др., 2015].

Прогрессирующие процессы изменения климата, деградация ледникового покрова на фоне активных геодинамических процессов, в горных районах Таджикистана, определяют необходимость исследований, учет и каталогизацию горных озер. Эффективное решение задач, по исследованию горных озер, создание постояннодействующего механизма их мониторинга, требуют последовательных, целенаправленных и рассчитанных на длительную перспективу научно-практических, в том числе полевых работ.

Горные озера бассейна реки Гунт за последние столетия изучались советскими и отечественными специалистами, включавшие в себя: оценку возможности их прорыва, получение параметров гидрометеорологического режима водоемов, но с сожалением приходится констатировать, что в настоящее время в Таджикистане отсутствует единый каталог горных озер с полноценными данными по количеству, высотному расположению, зеркальной площади, типизации озер и т.п. Цель наших исследований в 2022 году заключалась в осуществлении оцифровки и каталогизации горных озер одного из бассейнов на территории ГБАО - бассейна реки Гунт.

Место исследований

Бассейн реки Гунт расположен на Юго-Западной части Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана и занимает площадь в 13700 км² [Кеммерих, 1978]. В большом количестве боковых долин, спускающихся в долину Гунта расположены озера ледникового происхождения: с севера - долины Патхор, Чапдара, Шадзуддара,

Андиравдждара и Сафедобдара с юга - Ривакдара, Пишдара, Вашедздара, Нимацдара (рис. 1) и др. Значительная часть этих озер запружена перенесенными ледником обломками горных пород, морены (природные плотины), создающие впечатление достаточной устойчивости. Однако некоторые из них, содержащие лед, вследствие таяния могут создать катастрофические ситуации [Черноморец и др., 2015; Наврузшоев и др., 2022]

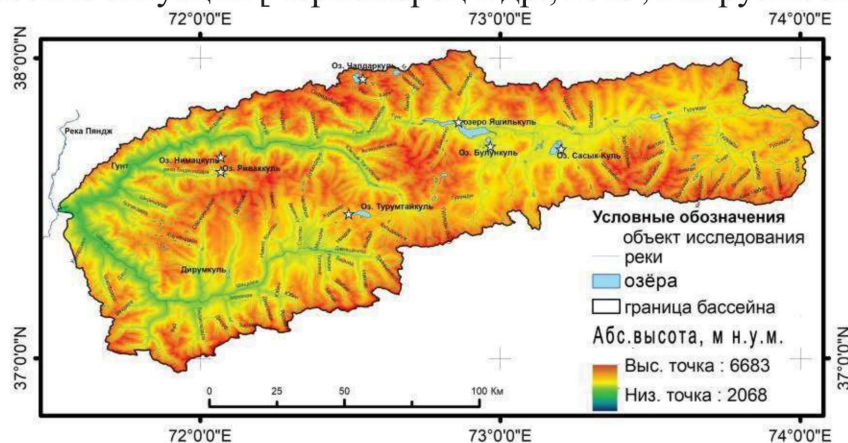


Рис. 1. Карта бассейна р. Гунт [Наврузшоев и др., 2022]

Методы исследований

Мультиспектральные космические снимки идеальное средство для изучения и наблюдения за ледниками и ледниковыми озерами на больших территориях. Геоморфометрический анализ и моделирование позволяют оценить потенциальную опасность для наводнений, вызванных прорывом ледниковых озер. Выявление и мониторинг ледниковых озер проводилось полуавтоматическим методом с использованием нормализованного разностного водного индекса (NDWI) на основе мультиспектральных космических снимков со спутника Landsat 8 и 9 OLI. Для снимков со спутника Landsat 8 и 9 OLI применяются каналы (Green - 3, NIR-5) [Шихов и др., 2020]. Для визуальной интерпретации водных объектов обычно предпочитают использовать ближний инфракрасный (NIR) диапазон, поскольку NIR сильно поглощается водой и сильно отражается от наземной растительности и сухой почвы [Rokni et al., 2014]. Спутниковые снимки скачивались с портала Геологической службы США (USGS) от 07.09.2022 (Landsat 8) и 06.09.2022 (Landsat 9) которые были объединены (mosaic) и вырезаны по контуру водосбора в программе ArcMap 10.5 для полного охвата территории исследований. Особое внимание было уделено снимкам, на которых отсутствуют облака или туман над исследуемой территорией. Данные снимки состоят из каналов многозональных изображений с пространственным разрешением 30 м с добавлением панхроматического канала, разрешение которого составляет 15 м [Наврузшоев и др., 2022].

Для получения водной поверхности с применением метода NDWI [McFeeters, 1996] был получен растровый файл, который был переклассифицирован и далее конвертирован от растра в полигон в результате чего были получены контуры озер и других поверхностей. Всего было

получено более 400 тыс. полигонов и при полуавтоматической обработке были удалены ненужные файлы и остались только контуры водных поверхностей. Данные работы [Вахнина, Носкова, Голятина, 2020] посвящены идентификации и каталогизации горных озер дистанционным методом в разных уголках мира которые использовались при подготовке данной работы. В каталоги были занесены водные объекты всего бассейна реки Гунт с зеркальной площадью от 0,001 км² (1000 м²) и более, расположенные на высоте более 2000 м над уровнем моря, остальные объекты (полигоны в шейп-файле) были удалены полуавтоматическим методом [Petrov et al., 2017]. Далее в ручном режиме были удалены затененные места, которые тоже идентифицируются как водные объекты и в основном создают сложности при обработке. Также дополнительно были дорисованы контуры всех существующих нераспознанных озер, которые были проверены на разных онлайн снимках (Google Earth, Land Viewer, Zoom Earth и др.) и офлайн платформах (спутниковые снимки Sentinel 2A, топографические карты). В автоматическом режиме контуры озер выделяются в квадратах соответствующих пикселях которые в последующем были сглажены в программе ArcMap функцией сглаживания многоугольника (smooth polygon) и были также скорректированы в ручном режиме.

Нумерация озер производилась вручную по методологии используемой при создании Каталога ледников бассейна реки Гунт [Варнакова, О.В. Рототаева, 1979], от города Хорог, начало Рушанского хребта, по часовой стрелке, для каждой долины с последовательностью: Северо-Аличурский хребет, Южно-Аличурский хребет, северный склон горы Бакчигир далее южный склон горы Бакчигир до озера Оккуль, северный склон Шугнанского хребта со всеми притоками далее южный склон Шугнанского хребта и в конце южный склон Шахдаринского и Ишкашимского хребтов (рис. 2).

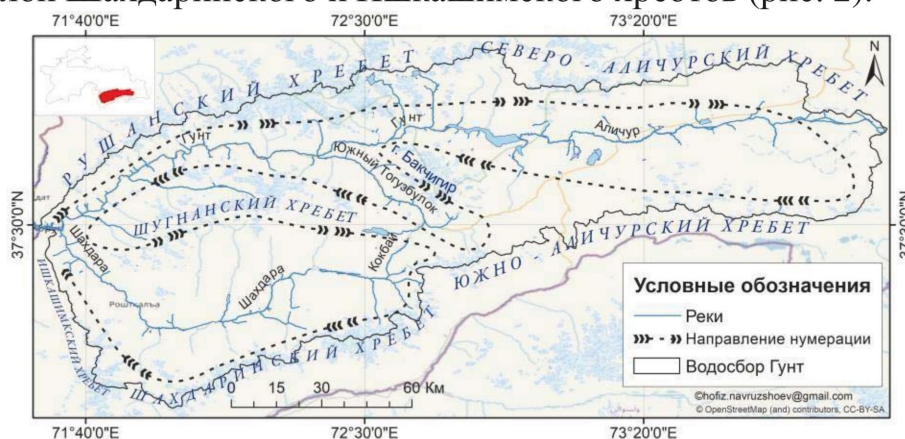


Рис. 2. Карта направления нумерации горных озер бассейна р. Гунт

Реализация вышеизложенного метода позволила отобразить полученные данные в таблицах, картах и графиках.

Результаты

Всего на территории бассейна реки Гунт автоматическим методом с ручной коррекцией и добавлением неопознанных водных объектов были идентифицированы и пронумерованы 378 горных озер с общей зеркальной

площадью в 85,5 км² (в результате ручной доработки были добавлены озера с площадью до 0,1 км²). Распространение озер больше всего наблюдается в западной и центральной части Шугнанского хребта и на южном склоне Рушанского хребта (рис. 3). Далее на склонах горы Бакчигир присутствуют значительное количество горных озер, в основном у языковых частей одноименных ледников, зеркальная площадь которых увеличивается очень быстро [Наврузшоев, Фазылов, 2021].

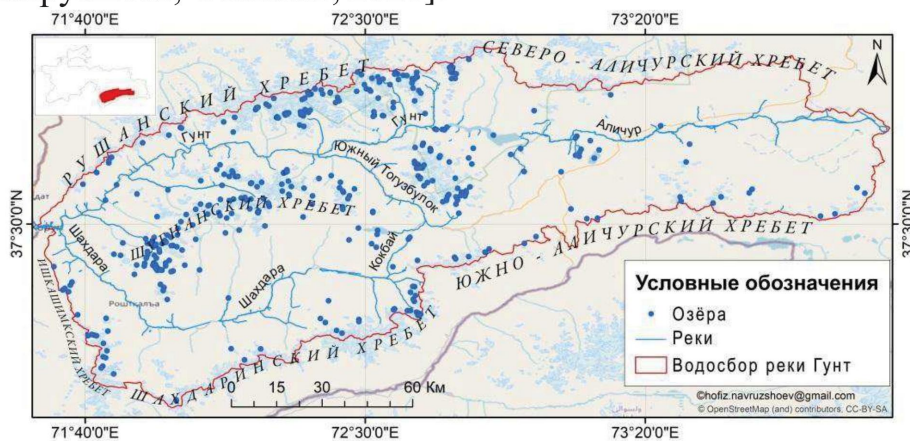


Рис. 3. Распространение горных озер на территории бассейна р. Гунт

Следует отметить, специфическое распределение горных озер бассейна реки Гунт, заключающееся в том, что они расположены начиная с высоты 2370 м над ур. м (для водохранилищ в низовье) и до отметки 5030 м над ур. м для ледниковых озер, расположенных в непосредственной близости языка ледников или же на теле ледника. Установлено, что наибольшее количество озер расположено на высотах от 4300 до 4800 м над ур. м (рис. 4). При этом, значительное количество озер расположены на больших высотах, в непосредственной близости ледников. Ледники связанные непосредственно с фронтом ледника, под воздействием последних увеличиваются в площади и сильно подвержены изменениям. Бассейн реки Гунт характерен именно наличием подобного типа озер, доминирующих как по количеству, так и по площади и более быстрым темпом расширяются, чем озера без ледникового питания.

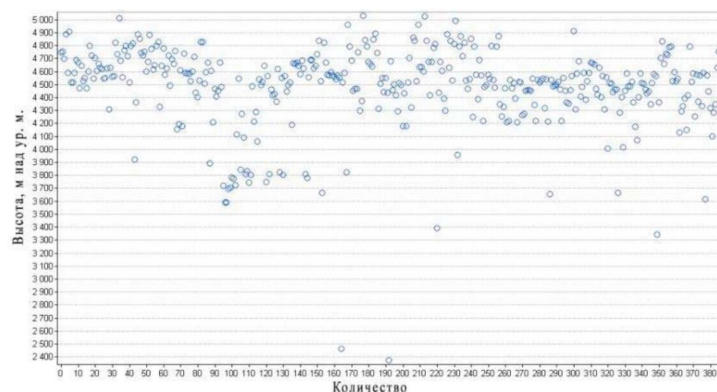


Рис. 4. Распределение горных озер бассейна р. Гунт по высотам

Полученные результаты позволили создать базу данных горных озер бассейна реки Гунт, с включением основных данных: нумерация озер, географические координаты и т.д. При создании базы данных использованы

результаты исследований (глубина и объем озёр) изложенные в ранее опубликованной научной работе [Пирмамадов и др., 2020]. Разработанная база данных ежегодно будет пополняться, результатами наших исследований для осуществления дальнейших работ по выявлению сезонной динамики ледниковых озёр и расчета их глубины, с использованием существующей методики [Коновалова, 2009].

Обсуждение результатов

Выводы, о том, что озера, питаемые ледниками, значительно расширяются в площади, а озера без ледникового питания характерны с более стабильными площадями подтверждают результаты ранее проведенных исследований, выполненные в других странах Центральной и Южной Азии [Zhang et. al., 2015; Hussain, 2020; Ерохин, Загинаев, 2020].

Ошибки, связанные с выделением ледниковых озёр на снимках дистанционного зондирования с использованием ручного визуального оконтуривания, обычно связаны с компонентами качества снимков (например, пространственно-временное разрешение, облачность и горные тени), а следовательно, теоретическая максимальная ошибка площади выделения границы ледникового озера равна половине площади краевых пикселей [Wang X. et al., 2020]. Для повышения достоверности полученных результатов планируется реализация исследований с использованием снимков более высокого пространственного разрешения [Rylov, Pestunov, 2019]. В перспективе, работы планируемые по оценке сезонной и межгодовой динамике горных озёр бассейна реки Гунт, позволят получить закономерности их распределения и выявить из них наиболее прорывоопасные озера [Семакова, Семаков, 2014].

Заключение

Инвентаризация горных озёр бассейна реки Гунт была выполнена на основе данных спутникового дистанционного зондирования с применением ГИС и методики NDWI. В целом, в 2022 году в данном бассейне было каталогизировано 378 горных озёр с общей площадью 85,5 км². Тенденция увеличения зеркальных площадей происходящее ускоренным темпом предопределяет необходимость постоянного мониторинга, анализа и оценки их состояния.

Впервые для бассейна реки Гунт составлен подробный каталог горных озёр с указанием основных характеристик и была создана база данных, которая будет пополняться новыми данными о состоянии, типе плотины и будет реализована классификация озёр по расположению и на основе выявленных индикаторов определяться степень их прорывоопасности. Проведенные исследования озёр бассейна реки Гунт позволили присвоить им идентифицирующий номер, позволяющий определить их на картах Google Earth добавлением подготовленных шейп-файлов с соответствующими данными.

Рекомендуется создать базу данных горных озёр Таджикистана на онлайн платформе. Открыть доступ всем заинтересованным учреждениям и специалистам занимающимся вопросами стихийных бедствий, совместно осуществлять управление рисками стихийных бедствий, в том числе по

повышению эффективной работы установленных систем раннего оповещения и расширить эту сеть по всей республике, на основе результатов оценки и предварительного анализа состояния прорывоопасности ледниковых озер. На наш взгляд именно такой подход позволит применить не только превентивные меры (снижение уровня воды в ледниковых озерах путём искусственного сброса воды) непосредственно в озёрах, но также разработать рекомендации по выбору, проектированию инженерных сооружений для защиты населения и инфраструктуры от возможных губительных воздействий прорывов горных озер.

Список использованной литературы:

Вахнина И.Л., Носкова Е. В., Голятина М.А. Особенности изменения площадей водного зеркала и количества озер степной зоны Восточного Забайкалья // Вестник Воронежского государственного университета. Серия География. Геоэкология, 2020, №3, с. 13-23. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2020.3/3019>

Ерохин, С.А., Загинаев, В.В. (2020а). Типизация горных озер Кыргызстана по степени их прорывоопасности. ГеоРиск, 14, 3, 78-86. <http://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-3-78-86>

Каталог ледников СССР (1979). Т. 14 (Средняя Азия), вып. 3 (Бассейн р. Аму- Дарьи), ч. 15 (Бассейн р. Гунта), (авторы Г.М. Варнакова, О.В. Рототаева). Ленинград: Гидрометеиздат

Кеммерих А.О. Гидрография Памира и Памиро-Алая. М.:1. Мысль11, 1978. – 264 с.

Коновалов В. Г. Дистанционный мониторинг прорывоопасных озер на Памире // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – №. 4. – С. 80-89.

Наврузшоев Х., Сагинтаев Ж., Кабутов Х., Неккадамова Н., Восидов Ф., Халимов А. (2022). Динамика площади зеркала горных озер бассейна реки Гунт (Памир, Таджикистан). *Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов*, 8(2), 85–101. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2022-R1.v8-2/85-101.rus>

Наврузшоев, Х. Д. Мониторинг и оценка современного состояния оледенения водосбора озера Яшилкуль (Таджикистан, Юго-Западный Памир) / Х. Д. Наврузшоев, А. Р. Фазылов // Вестник Донского государственного аграрного университета. – 2021. – № 4(42). – С. 139-147.

Пирмамадов У.Р., Бобов Р.А., Раимбеков Ю.Х., Мародасейнов Ф.О., Зикиллобеков И.И., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Кидяева В.М., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Висхаджиева К.С. Риск и последствия прорывов высокогорных озер Таджикистана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 1–24.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Бассейн р. Амударьи. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с. Режим доступа: <http://www.cawaterinfo.net/library/rus/hist/resources-amudarya/>

Семакова Э. Р., Семаков Д. Г. Определение гляциальных объектов в

высокогорных районах Республики Узбекистан //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 4. – №. 1. – С. 35-40.

Семакова Э.Р., Семаков Д.Г. О возможности использования методов дистанционного зондирования Земли при расчётах гляциологических показателей для горных районов Узбекистана. *Лёд и Снег*. 2017;57(2):185-199. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-2-185-199>

Черноморец и др., 2015 Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Бобов Р. и др. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // Междунар. науч. конф. Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии (Санкт-Петербург, 18–22 нояб. 2015 г): сб. докл. СПб., С.-Петерб. гос. ун-т, 2015, с. 261–264.

Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]. Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2020. – 49,6 Мб; 191 с.

Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 208–220.

Hussain A., Nasab N., Bano D., Karim D., Anwar W., Hussain K., Uddin N. Glacier lake outburst flood modeling of Khurdopin glacier lake using HEC-RAS and GIS. In:

McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 1996, 17(7), 1425-1432

Petrov, M.A., Sabitov, T.Y., Tomashevskaya, I.G., Glazirin, G.E., Chernomorets, S.S., Savernyuk, E.A., Tutubalina, O.V., Petrakov, D.A., Sokolov, L.S., Dokukin, M.D., Mountrakis, G., Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., 2017. Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan. *Sci. Total Environ.* 592, 228–242. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.068>.

Rokni K, Ahmad A, Selamat A, Hazini S. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*. 2014; 6(5):4173-4189. <https://doi.org/10.3390/rs6054173>

Rylov S.A., Pestunov I.A. Assessment of lakes areas by Sentinel-2 satellite data, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(5), 526-535. DOI: 10.17516/1999-494X-0108

Wang X. et al. Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images //Earth System Science Data. – 2020. – Т. 12. – №. 3. – С. 2169-2182.

Zhang, G., Yao, T., Xie, H., Wang, W. & Yang, W. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Global. Planet. Change* **131**, 148–157 (2015).