



Динамика площади зеркала горных озер бассейна реки Гунт (Памир, Таджикистан)

Наврузшоев Х.Д.^{а,с*}, Сагинтаев Ж.^б, Кабутов Х.К.^с, Неккадамова Н.М.^с,
Восидов Ф.К.^с, Халимов А.М.^с

^а Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267

^б Назарбаев Университет, проспект Кабанбай Батыра 53, г. Нур-Султан, 010000, Республика Казахстан.

^с Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33

АННОТАЦИЯ

В статье на примере озер Риваккуль и Нимацкуль рассмотрены горные озера бассейна р. Гунт, представляющие угрозу для поселений и инфраструктур, расположенных ниже по течению. В последние десятилетия количество озер и их площадь росли ускоренными темпами из-за сокращения ледников в данном бассейне, где насчитывается более 600 горных озер. Разработка рекомендаций по установке оборудования раннего оповещения населения о прорыве высокогорных озер является критически важным фактором для устойчивого развития Центрально-Азиатского региона. Целью данной работы является изучение динамики площади зеркала горных озер в период с 2000 по 2019 г. Используя показатели дистанционного зондирования, нами были собраны сводные данные о питании, расположении и площади зеркала горных озер. В работе представлены результаты, полученные со снимков Landsat 7–8 (за август и сентябрь 2000–2019 гг.). Полученные данные показали, что максимальное увеличение площади наблюдается в оз. Нимацкуль в 2006 г., а в оз. Риваккуль в 2010 г. В оз. Нимацкуль происходит постепенное уменьшение площади акватории начиная от 0,513 км² в 2000 г. до 0,462 км² к 2019 г., а площадь оз. Риваккуль остается более стабильной. Динамика зеркальной площади горных озер очень тесно связана с метеорологическими параметрами и установлено, что наличие поверхностного и подземного стока стабилизируют площадь зеркала и уровня воды в нем.

Подана в редакцию:
8 ноября 2021

Принята к публикации:
23 августа 2022

Доступ онлайн:
10 ноября 2022

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

дистанционное зондирование, динамика площади водного зеркала, ГИС, горное озеро, Landsat, бассейн реки Гунт, Памир

1. Введение

Прорывы горных и ледниковых озер, представляющие серьезную природную, экологическую и гидрологическую опасность, характерны для многих высокогорных регионов мира, в том числе и для Республики Таджикистан (РТ).

Основной целью исследований является изучение динамики площади зеркала горных озер и оценка их потенциальной опасности. Использование технологии дистанционного зондирования представляет собой наиболее оптимальный и целесообразный метод проведения исследований в труднодоступных высокогорных зонах, обеспечивающий возможность комплексной оценки опасности на значительных по площади территориях (Huggel et al., 2002).

Многочисленные исследования, проведенные специалистами ближнего и дальнего зарубежья, подтверждают тезис о том, что большинство высокогорных озер достаточно легко идентифицируется на мультиспектральных спутниковых снимках Landsat, Sentinel-2A и др. В частности, в большинстве стран Южной Азии (в Индии, Непале, Бутане, Пакистане), а также в Китае реализованы исследования современного оледенения; при этом для ряда речных бассейнов проведена сплошная каталогизация высокогорных озер и собрана базовая информация. Результаты исследований высокогорных озер, расположенных на территории Центральной Азии, изложены в работах Виноградова (1977, 1980); Тукеева (2002); Батырова, Яковлева (2004); Ерохина, Загинаева (2020а, 2020б); Коновалова (2009), Черноморца (2007а, 2007б); Шафиева (2018); Пирмамадова (2020) и др.

В Таджикистане насчитывается 1449 озер общей площадью 716 км². При этом 80 % из них находятся в горных и высокогорных районах, на абсолютных высотах 2300-5100 м н.у.м. Следует отметить, что для территории Памира характерно возникновение селепроявлений, 22 % которых составляют гляциальные сели, отличающиеся, как установлено, наиболее разрушительными последствиями (Оценочные доклады ... , 2006).

Исследования распространения высокогорных гляциальных озер в верховьях р. Амударья в основном организованы для защиты территории и поселений, подверженных воздействию стихийных бедствий, связанных с прорывами горных озер. В общей системе объектов воспринимающими влияние последствий прорыва озер являются ГЭС, созданные на территории бассейна р. Гунт, а также город Хорог - столица Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) РТ (Тукеев, 2002).

Проблема исследования горных озер в значительной степени актуальна для территорий, заселенных по речным долинам. При этом труднодоступные

горные озера в основном исследуются методами дистанционного зондирования и рекогносцировочными экспедициями (Кидяева и др., 2018).

В странах Центральной Азии, в том числе и в РТ, наряду с освоением горно-предгорных зон, строятся и эксплуатируются автомобильные дороги международного, стратегического значения, подверженные рискам стихийных бедствий, связанных с водой и другими опасными природными явлениями. Следовательно, при проектировании этих объектов необходимо учитывать зоны вероятного схода лавин, селей, паводков и возникновения других стихийных бедствий. Одним из опасных и разрушительных явлений в высокогорной зоне считаются прорывы высокогорных озер.

Селевые потоки и прорывные паводки являются потенциально опасными источниками, приводящими к значительному невосполнимому ущербу социального и экономического характера, и нередко, к сожалению, сопровождаются человеческими жертвами.

Следует также отметить, что проявления подобных рисков стихийных бедствий во многом сдерживают развитие гидроэнергетики в высокогорных зонах. В частности, построенные в русле р. Гунт две большие ГЭС («Памир-1» и «Хорог»), обеспечивающие ГБАО электроэнергией, также подвержены опасным гидрологическим процессам и требуют постоянного мониторинга и обеспечения безопасной эксплуатации этих жизненно важных для экономики ГБАО объектов.

Одним из существенных элементов подобного мониторинга является мониторинг динамики зеркальной площади горных озер и колебания уровня воды в них, позволяющий судить о тенденциях, способствующих усовершенствованию технологий оценки вероятности их потенциальных прорывов (Bolch et al., 2011; Кидяева, 2018).

Методологии по использованию спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для изучения изменений площади поверхностных вод используются многими исследователями в мире, в том числе в Центральной Азии (Sagin et al., 2015; Das et al., 2015; Sagintayev et al., 2012).

На основе вышеизложенного нами определена цель исследований, заключающаяся в изучении динамики площади зеркала горных озер в период с 2000 по 2019 г.

2. Место и объекты исследования

Река Гунт - второй по величине приток р. Пяндж. Площадь водосбора составляет 13 700 км², длина - 296 км. На рис. 1 приведена подробная карта бассейна р. Гунт.

Объектами исследования являются оз. Риваккуль (3456 м н.у.м.) и оз. Нимацкуль (4566 м н.у.м.).

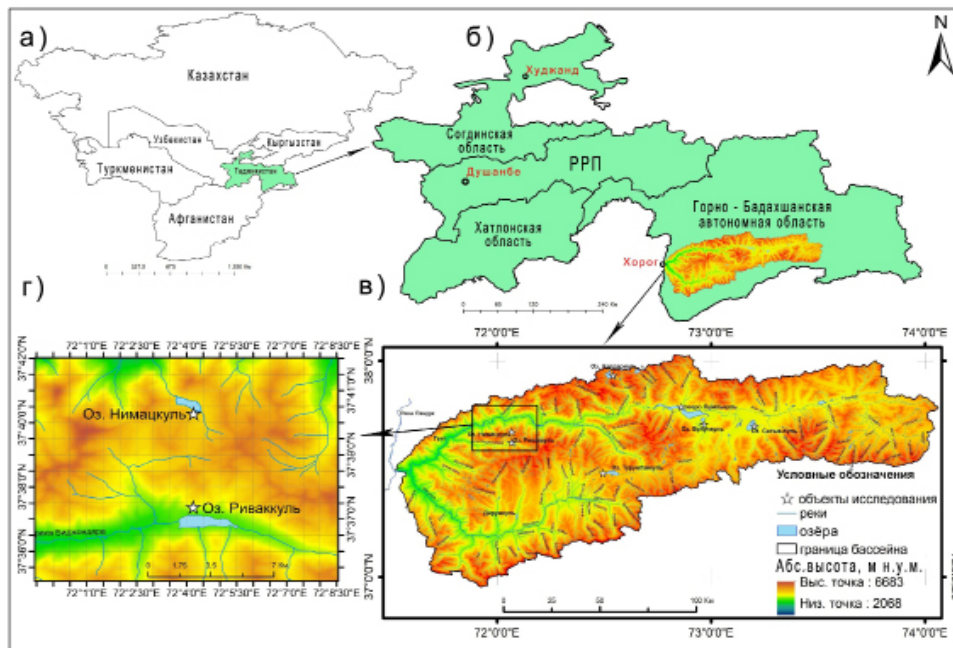


Рис. 1. Карта бассейна р. Гунт из карты Центральной Азии (работа авторов):
 а) карта Центральной Азии; б) карта Таджикистана; в) бассейн р. Гунт;
 г) оз. Нимацкуль и оз. Ривакуль.

Бассейн р. Гунт протяженностью с севера на юг в западной и центральной части - 90 км, на востоке - 50 км, с запада на восток - 220 км расположен в южной части Памира. С севера горная цепь Рушанского и Северо-Аличурского хребтов служит границей с бассейном р. Бартанг и р. Мургаб, а на юге Шахдаринский и Южно-Аличурский хребты разделяют бассейны рек Гунт и Памир-Пяндж (см. рис. 1).

На западе территория рассматриваемого района примыкает к бассейнам коротких крутопадающих притоков р. Пяндж. На востоке бассейн р. Гунт отделен короткими хребтами и невысокими горными массивами от бассейнов левых притоков р. Аксу верхнего течения р. Мургаб. Территория бассейна административно входит в состав ГБАО с центром в г. Хорог, расположенном в устье р. Гунт (Каталог ледников СССР, 1979).

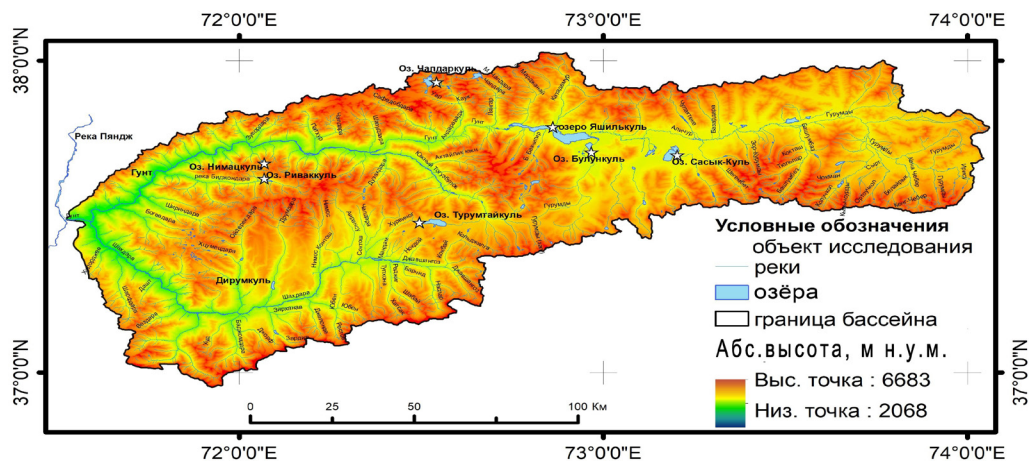


Рис. 2. Карта бассейна р. Гунт (работа авторов).

Горные хребты бассейна р. Гунт достигают 5000-5500 м, пики Карла Маркса, Энгельса и Патхор - 6726 м, 6507 м, 6080 м соответственно. Высокие вершины крутых склонов гор прорезаны глубокими узкими долинами рек, нижние части которых опускаются до 2050 м абсолютной высоты. Бурно текут реки и в некоторых местах образуют водопады (Каталог ледников СССР, 1979).

На территории бассейна р. Гунт находится более 600 больших и малых горных озер. На большом количестве боковых долин, спускающихся в долину Гунт также расположены озера ледникового происхождения: с севера - долины Чапдара и Шадзуддара, с юга - Ривакдара, Пишдара, Вашедздара, Нимацдара (рис. 3) и др. Значительная часть этих озер запружена перенесенными ледником обломками горных пород, морены (природные плотины), создают впечатление достаточной устойчивости. Однако некоторые из них, содержащие лед, вследствие таяния могут создать катастрофические ситуации.

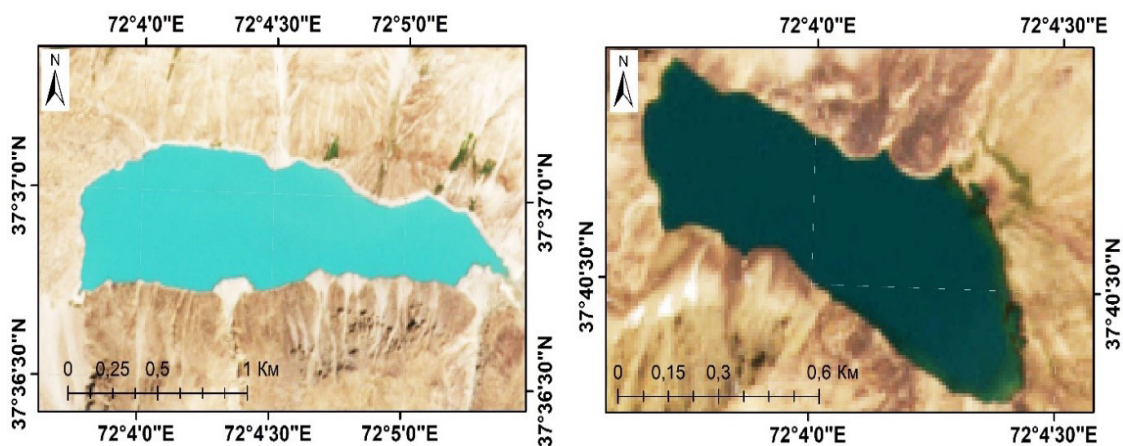


Рис. 3. Спутниковые снимки Sentinel-1: а) оз. Риваккуль; б) оз. Нимацкуль.

Специфична в этом плане долина Ривак, с большим горным оз. Риваккуль, подпруженным композитной плотинной (моренным валом). На этом озере были отмечены два периода заполнения и прорыва.

Следует отметить, что в верховьях существовало несколько ледниковых озер меньшего размера, но в настоящее время постепенно увеличивающихся, что ведет к опасности их прорыва. В случае возникновения такой критической ситуации оз. Риваккуль способно сыграть роль гасящего бассейна, позволяющего уменьшить опасность критической волны, приводящей к опасному гидрологическому явлению - наводнению. В тоже время оз. Нимацкуль относится к потенциально опасному природному объекту (Шафиев, 2018).

2.1. Климат

Наблюдения климатических условий долины р. Гунт осуществляются на двух метеорологических станциях: Булункуль, расположенной в верховьях реки, и станции Хорог - в низовьях. Район поселка Булункуль (3744 м н.у.м.) является одним из самых холодных районов Восточного Памира, характеризуется холодным летом с сухим климатом, зима в основном малоснежная. Иногда зимой температура воздуха опускается до -63°C , а летом температура воздуха поднимается до $+11,2^{\circ}\text{C}$. В связи с удаленностью от территории исследования (более 80 км) данные метеостанции Булункуль не были включены в работу.

Станция Хорог расположена на высоте 2075 м н.у.м. в центре г. Хорог. Климат здесь сухой резко континентальный. Самый холодный месяц зимы - январь, температура воздуха в среднем доходит до $-7,9^{\circ}\text{C}$, а летом (в июле) повышается до $+22,8^{\circ}\text{C}$. В течение года максимальное количество выпадающих осадков составляет 250-300 мм.

Как известно, водность озер и рек напрямую зависит от колебания климатических параметров. Для определения взаимосвязи изменения площади водного зеркала озер следует проанализировать их взаимосвязь с метеорологическими данными.

На рис. 4 и рис. 5 приведены графики осадков и температуры воздуха по годам за летний период.

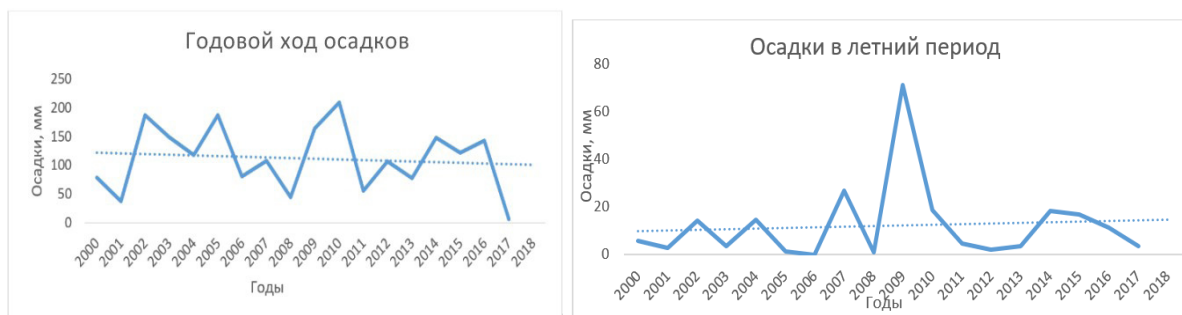


Рис. 4. Графики осадков: а) годовой ход осадков; б) осадки в летний период. Станция Хорог, с 2000 по 2018 г. (Мирзохонова, 2021)

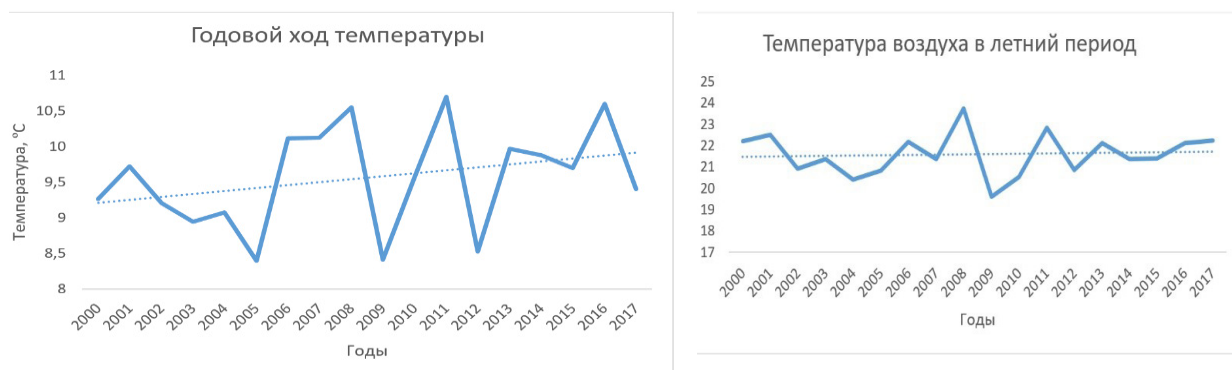


Рис. 5. Графики температуры воздуха: а) годовой ход температуры воздуха; б) температура воздуха в летний период. Станция Хорог, с 2000 по 2018 г. (Мирзохонова, 2021)

3. Методы исследования

Для определения изменения зеркальной площади оз. Риваккуль и оз. Нимацкуль использовались космические снимки, имеющие разное спектральное и пространственное разрешение со спутников Landsat 7 ETM+ и Landsat 8 OLI. Спутниковые снимки, находящиеся в открытом доступе, скачивались с портала Геологической службы США (USGS) (Пиотровский, Зенгина, 2018).

Данные снимки состоят из каналов многозональных изображений с пространственным разрешением 30 м с добавлением панхроматического канала, разрешение которого составляет 15 м. Спутниковые снимки подбирались в конце лета и начале осени, так как в этот период тает весь снежный покров и можно подсчитать питание озера за год. Всего было обработано более 10 разновременных изображений для района исследования с 2000 по 2019 г. (таблица 1) с интервалом через год (Ананичева и др., 2006).

В процессе обработки спутниковых снимков мы столкнулись с аппаратными искажениями из-за неисправности камеры ETM+, однако при ручном интерактивном режиме дешифрирования регулярные помехи не повлияли на качество интерпретации.

Таблица 1. Спутниковые снимки Landsat по годам.

№	Дата	Спутник	№	Дата	Спутник
1.	24 - август-2000	Landsat 7 ETM+	6.	25 - август-2012	Landsat 7 ETM
2.	30 - август-2002	Landsat 7 ETM+	7.	14 - август-2014	Landsat 8 OLI
3.	04 - сентябрь-2004	Landsat 7 ETM+	8.	28 - август-2016	Landsat 8 OLI
4.	30 - август-2008	Landsat 7 ETM+	9.	29 - август-2018	Landsat 8 OLI
5.	20 - август-2010	Landsat 7 ETM+	10.	03 - сентябрь-2019	Landsat 8 OLI

4. Результаты

Результаты исследований приведены на рисунках, в таблицах и диаграммах. На рис. 6 и рис. 7 показаны контуры озер (обозначенные в легенде разными цветами) по исследованным годам. Данные о динамике площади озер приведены в таблице 2. При этом погрешность расчетов площади зеркала оз. Нимацкуль составляет $0,05 \text{ км}^2$, оз. Риваккуль - $0,009 \text{ км}^2$.

Уменьшение площади зеркала обоих озер подтверждается трендовыми линиями, показанными на диаграмме (рис. 8). На основе полученных данных (см. таблицу 2) в 2006 г. в оз. Нимацкуль выявлено максимальное увеличение площади, а в оз. Риваккуль аналогичный процесс характерен для 2010 г. Установлено, что в оз. Нимацкуль постепенное уменьшение площади акватории с 2000 по 2019 г. составило от $0,462 \text{ км}^2$ до $0,513 \text{ км}^2$ соответственно.

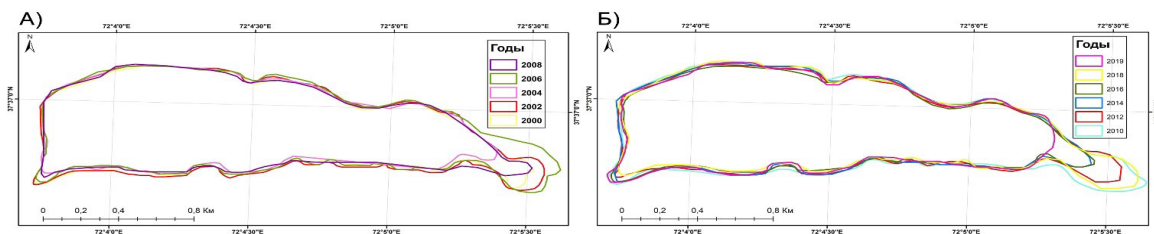


Рис. 6. Динамика оз. Риваккуль: А) с 2000 по 2008 г.; Б) с 2010 по 2019 г.

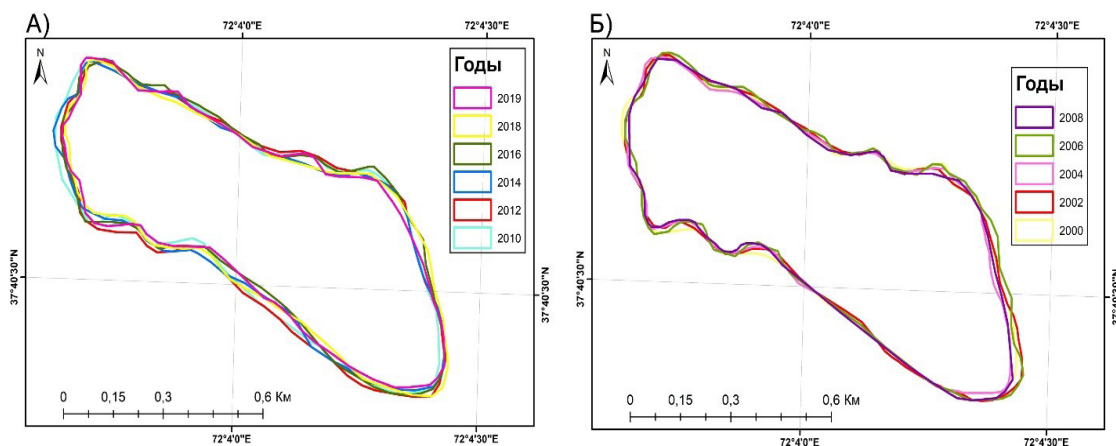


Рис. 7. Динамика оз. Нимацкуль: А) с 2000 по 2008 г.; Б) с 2010 по 2019 г.

Таблица II. Динамика зеркальной площади оз. Нимацкуль и оз. Риваккуль с 2000 по 2019 г.

Название/ годы	Динамика зеркальной площади озера по годам спутником Landsat, км ²										
	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2019
оз. Нимацкуль	0,513	0,511	0,496	0,515	0,499	0,484	0,500	0,477	0,485	0,470	0,462
оз. Риваккуль	1,295	1,378	1,246	1,390	1,251	1,419	1,337	1,333	1,260	1,265	1,267

На рис. 8 построен график на основе данных таблицы 2, где приведены данные изменения зеркальной площади анализируемых озера с 2000 по 2019 г.



Рис. 8. График динамики площади зеркала оз. Нимацкуль и оз. Риваккуль с 2000 по 2019 г.

5. Обсуждение

Полученные результаты подтверждают аналогичные результаты других исследователей (Vajracharya & Mool, 2009; Кидяева и др., 2018; Черноморец и др., 2007а, 2007б). Выводы, сделанные о том, что при наличии поверхностного стока режим многолетних колебаний уровней воды в горных озерах стабилен, а при их отсутствии или перестройке внутриледниковых, фильтрационных и других каналов стока прилегающих ледников возникают масштабные изменения в водных балансах озера, что может провоцировать их прорыв, обоснованы

(Кидяева и др., 2013).

На основе анализа графиков изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков, т. е. тех показателей, которые влияют на увеличение или уменьшение площади зеркала озер (см. рис. 4, рис. 5 и таблицу 2), можно сделать вывод о том, что в годы увеличения количества осадков площадь зеркала озер также увеличивается и, наоборот, при уменьшении количества осадков площадь зеркала озер также уменьшается. Исходя из данных на рис. 6, у оз. Риваккуль наблюдается уменьшение площади с правого края. Это объясняется тем, что глубина озера в этой части низкая и в зависимости от метеорологических параметров зеркальная площадь данного озера уменьшается в летнее время. Установлено, что в период с 2000 по 2019 г. площадь зеркала оз. Нимацкуль и оз. Риваккуль уменьшилась. Наряду с этим установлено наличие в этих озерах подземных стоков.

Таким образом, изложенные результаты исследований позволяют утверждать, что актуальность использования технологий дистанционного зондирования для изучения динамики площади зеркала горных озер однозначна.

6. Выводы

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые на основе космических снимков горных озер бассейна р. Гунт осуществлен анализ их зеркальной площади. В перспективе (в дальнейших исследованиях) на основе полученных данных анализа и доступности программных комплексов по моделированию будет разработана модель возможного прорыва этих озер.

Полученные результаты исследований позволяют утверждать, что использование данных дистанционного зондирования может внести значительный вклад в изучение динамики горных озер и может быть рекомендовано для применения в геологических, гидрологических и гляциологических наблюдениях.

Результаты проведенного анализа разновременных, многозональных, космических снимков в районе исследования показали прямую связь изменения площади озер в зависимости с их питанием. Оз. Нимацкуль и оз. Риваккуль имеют только подземный сток, вследствие этого уровень воды в озерах остается стабильным.

Таким образом, использование материалов дистанционного зондирования может и должно лечь в основу методов оперативного контроля состояния динамики зеркальной площади в горных и ледниковых озерах в том числе с проведением полевых работ.

Необходимость дальнейшей разработки рекомендаций по установке оборудования раннего оповещения населения о прорыве высокогорных озер является критически важным для устойчивого развития Центрально-Азиатского

региона.

Анализ неопределенностей и ограничений

Большинство горных озер бассейна р. Гунт труднодоступны, и проведение полевых работ практически становится невозможным, кроме того, отсутствие аппаратуры для анализа горных озер также усложняет работу, т. к. требуется больше времени для получения каких-либо данных. Вместе с тем следует однозначно отметить, что проведение полевых работ не должно быть исключено из общей системы реализации всего комплекса исследований.

Дистанционные методы зондирования дают большие возможности исследовать труднодоступные высокогорья, но пространственное разрешение спутниковых снимков Landsat в 90-х годах составляет 30 м, и исследование малых озер становится невозможным или вычисляется с большой погрешностью. Доступ к спутниковым снимкам с более высокими качествами и использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) значительно упростили бы эти задачи.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РЭЦЦА в рамках конкурса студенческих исследований по устойчивому управлению природными ресурсами в Центральной Азии и Афганистане. Авторы выражают благодарность международным экспертам и руководителям в области водных ресурсов Жанаю Сагинтаеву и Андрею Митусову, а также местным экспертам Каюмову А.К., Кобулиеву З., Фазылову А.Р., Мирзохоновой С.О. за неоценимый вклад в подготовку данной статьи.

Список литературы

- Ананичева, М.Д., Капустин, Г.А., Корейша, М.М. (2006). Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001-2003 гг. *Материалы гляциологических исследований*, 101, 163-169.
- Батыров, Р.С., Яковлев, А.В. (2004). Использование цифровых космических снимков ASTER TERRA для определения гляциальных озер. *Труды НИИ, Ташкент, Гляциология горных областей*, 3 (248), 14-21.
- Богаченко, Е.М., Зимницкий, А.В., Ильичев, Ю.Г. (2008). Исследование гляциальных озер Приэльбрусья на предмет их потенциальной селевой опасности. *Труды Всероссийской конференции по селям (26-28 октября 2005 г.)*. М.: ЛКИ, 175-181.
- Виноградов, Ю.Б. (1977). Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 155 с.
- Виноградов Ю.Б. (1980). Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеиздат, 144 с.
- 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>

- Ерохин, С.А., Загинаев, В.В. (2020б). Тенденции прорывоопасности в развитии горных озер Кыргызстана. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: *Труды 6 Международной конференции (Душанбе-Хорог, Таджикистан)*, том 1, Душанбе: ООО «Промоушн», 194-207.
- Зимницкий, А.В. (2005). *Формирование, распространение и динамика приледниковых озер Западного и Центрального Кавказа (в границах России)*: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Краснодар, 22 с.
- Зимницкий, А.В., Николайчук, А.В. (2006). Современное оледенение и приледниковые озера в верховьях Малки (Центральный Кавказ) *Изменения природной среды на рубеже тысячелетий: труды Международной электронной конференции*. Тбилиси-Москва: «Полиграф», 35-40.
- 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.
- Кидяева, В.М., Крыленко, И.Н., Крыленко, И.В., Петраков, Д.А., Черноморец, С.С. (2013). Колебания уровня воды в горных ледниковых озерах Приэльбрусья. *GeoРиск*, 3, 20-27.
- 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. (2018). Моделирование прорывов горных озер и селевых потоков в Горно-Бадахшанской автономной области, Таджикистан. *Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: материалы междунар. научн. конф.*, СПб, 897-902.
- Коновалов, В.Г. (2009). Дистанционный мониторинг прорывоопасных озер на Памире. *Криосфера Земли*, 13, 4, 80-89.
- Крыленко, И.Н., Петраков, Д.А., Черноморец, С.С., Тутубалина, О.В., Шахмина, М.С., Крыленко, И.В., Норин, С.В. (2008). Дистанционный и наземный мониторинг ледниковых озер Центрального Кавказа. *Труды междунар. Центрально-Азиатской конф. «Дистанционное зондирование Земли и геоинформационные системы»*, Алматы, 3 с.
- Мирзохонова, С.О. (2021). Влияние изменения климата на гидрологический режим бассейна реки Пяндж. (автореф. дисс. ... канд. техн. наук]. Дата обращения: 3.09.2019. https://www.imoge.tj/kitobho/Monographiya_Mirzokhonova-S.O..pdf.
- Оценочные доклады по возникающим экологическим проблемам Центральной Азии. *Устойчивость горных озер Центральной Азии. Риски воздействия и принятия мер*. (2006). Ашхабад, 53-103. Дата обращения: 15.10.2019. <http://cawater-info.net/library/rus/icsd1-ru.pdf>
- Петраков, Д.А. (2008). Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва. *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: труды Международной конференции*. Пятигорск: Институт «Севкавгипроводхоз», 309-312.
- Пиотровский, А.А., Зенгина, Т.Ю. (2018). Изменение водного зеркала акватории Ангарского Сора в связи с природными и антропогенными колебаниями уровня воды в Байкале. *Проблемы региональной экологии*, 2, 102-108. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-12102
- 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. (2020). Риск и последствия прорывов высокогорных озер Таджикистана. *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: труды 6 Международной конференции (Душанбе-Хорог, Таджикистан)*, том 1, Душанбе: ООО «Промоушн», 1-24.
- Тукеев, О.В. (2002). Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз. М.: Научный мир, 176 с.
- Черноморец, С.С., Петраков, Д.А., Крыленко, И.В., Крыленко, И.Н., Тутубалина, О.В., Алейников, А.А., Тарбеева, А.М. (2007а). Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ). *Криосфера Земли*, XI, 1, 72-84.
- Черноморец, С.С., Петраков, Д.А., Тутубалина, О.В., Сейнова, И.Б., Крыленко, И.В. (2007б). Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия. *Материалы гляциологических исследований*, 102, 219-223.
- Шафиев, Г.В. (2018). Анализ состояния прорывоопасных озер по долине реки Гунт в Юго-Западном Памире. *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: труды 5-й Международной конференции*. Тбилиси: Изд-во «Универсал», 631-638.

- Bajracharya, S.R., & Mool, P.K. (2009). Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 50(53), 81-86. <https://doi.org/10.3189/172756410790595895>
- Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradchan, B., Buchroithner, M., Blagoveshchensky, V. (2011). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Natural Hazards*, 59(3), 1691-1714. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9860-2>
- Costa, J.E. (1985). Floods from dam failures (Open-File Report, 85-560). Denver, Colorado. <https://doi.org/10.3133/ofr85560>
- Das, A., Sagin, J., Sanden, J., Evans, E., McKay, H., Lindenschmidt, K. (2015). Monitoring the freeze-up and ice cover progression of the Slave River. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(9), 609-621. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0286>
- Huggel, C., Käab, A., Haeblerli, W., Teyssie, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316-330. <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Mool, P.K., Bajracharya, S.R., Joshi S.P. (2001). Risk assessment of Tsho Rolpa Glacial Lake along the Rolwaling and Tama Koshi Valleys Dolakha District. ICIMOD, Nepal, Katmandu, 75 p.
- Mool, P.K., Bajracharya, S.R. (2003). Tista Basin, Sikkim Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region. ICIMOD, Nepal, Katmandu, 145 p.
- Mool, P.K., Bajracharya, S.R., Roohi, R., Asraf, A., Hussain, S.A. (2004). Upper Indus, Jhelum, Shingo, Shyok, and Shigar River basins. *Pakistan Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region*. ICIMOD, Nepal, Katmandu, 354 p.
- Sagin, J., Sizo, A., Wheeler, H., Jardine, T., Lindenschmidt, K. (2015). A Water Coverage Extraction Approach to Track Inundation in the Saskatchewan River Delta, Canada. *International Journal of Remote Sensing*, 36(3), 764-781.
- Sagintayev, Z., Sultan, M., Khan, S.D., Khan, S. A., Mahmood, K., Yan, E., Milewski, A., Marsala, P. (2012). A remote sensing contribution to hydrologic modeling in arid and inaccessible watersheds, Pishin Lora basin, Pakistan. *Hydrological Processes*, 26, 85-99. <https://doi.org/10.1002/hyp.8114>

Surface area dynamics of Gunt River Basin mountain lakes (Pamir, Tajikistan)

Navruzshoev H.D.^{a,c*}, Sagintaev Zh.^b, Kabutov H.K.^c, Nekkadamova N.M.^c, Vosidov F.K.^c, Khalimov A.M.^c

^a Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, 734063, Republic of Tajikistan, Dushanbe, st. Aini, 267

^b Environment and Resource Efficiency Cluster (EREC), Nazarbayev University, 53 Kabanbay Batyr Ave., Nur Sultan, 010000, Kazakhstan.

^c State Scientific Institution "Center for the Study of Glaciers of the National Academy of Sciences of Tajikistan", 734025, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Rudaki Ave., 33

<https://doi.org/10.29258/CAJWR/2022-R1.v8-2/85-101.rus>

ABSTRACT

This article discusses mountain lakes that pose a threat to settlements and infrastructure, located downstream on the example of the lakes Rivakkul and Nimatskul in the Gunt river basin. In recent decades, the number and area of lakes have grown at an accelerated pace due to the reduction of glaciers in this basin, where there are more than 600 mountain lakes. The development of recommendations for the installation of equipment for early warning of the population about the outburst of high-mountain lakes is critical for the sustainable development of Central Asian regions. The purpose of this work is to study the dynamics of the surface area of two mountain lakes in the Gunt River Basin in the period from 2000 to 2019. Using remote sensing data, summary data were collected on the water supply, location and surface area of mountain lakes. This paper presents the results obtained from Landsat 7-8 images (August and September 2000-2019). Based on the data obtained, in 2006 there is a maximum increase in the area of Lake Nimatskul, whereas a maximum increase of Lake Rivakkul is observed in 2010. In Lake Nimatskul, a gradual decrease in water area from 0.513 km² in 2000 to 0.462 km² by 2019, while Lake Rivakkul has remained more stable. The dynamics of the surface area of mountain lakes is very closely related to meteorological parameters, and it has been established that the presence of surface and underground runoff stabilizes the surface area and the water level in it.

ARTICLE HISTORY

Received: November 9, 2021

Accepted: August 23, 2021

Published: November 10, 2022

KEYWORDS

Remote sensing, water surface area dynamics, GIS, mountain lake, Landsat, Gunt river basin, Pamir

References

- Ananicheva M.D., Kapustin G.A., M.M.K. (2006). *Izmenenie lednikov gor Suntar-Hayata i hr. Cherskogo po dannym Kataloga lednikov SSSR i kosmicheskim snimkam 2001-2003 gg* [Change in the Glaciers of the Suntar Khayat Mountains and Chr. Chersky According to the USSR]. *Glacier Catalog and Space Images 2001 - 2003*. 163-168 [In Russian].
- Assessment reports on emerging environmental issues in Central Asia. Ashgabat 2006. Pp. 56 [In Russian].
- Bajracharya, S.R., & Mool, P. (2009). Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 50(53), 81-86.
- Batyrov R.S., Yakovlev A.V. Ispol'zovanie cifrovyyh kosmicheskikh snimkov ASTER TERRA dlya opredeleniya glyacial'nyh ozer [Using digital space images ASTER TERRA to identify glacial lakes] // Tr. Research Institute. Tashkent, 2004, no. 3 (248), p. 14-21 [In Russian].
- Bogachenko E.M., Zimnitsky A.V., Ilyichev Yu.G. Issledovanie glyacial'nyh ozer Priel'brus'ya na predmet ih potencial'noj selevoj opasnosti [Study of the glacial lakes of the Elbrus region for their potential mudflow hazard] // *Proceedings of the All-Russian Conference on Mudflows*, October 26-28, 2005. Moscow: LKI, 2008. P. 175-181 [In Russian].
- Catalog of Glaciers of the USSR. Volume 14. Central Asia, part 15. Gunta river basin. Leningrad, 1979 [In Russian].
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Krylenko I.V. et al. Dinamika lednikovo-ozernogo kompleksa Bashkara i ocenka selevoj opasnosti v doline reki Adyl-Su (Kavkaz) [Dynamics of the glacier-lake complex of Bashkara and assessment of mudflow hazard in the valley of the Adyl -su river (Caucasus)]// *Cryosphere of the Earth*, 2007a, vol. XI, no. 1, p. 72-84. [In Russian]
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V. et al. Proryv lednikovogo ozera na severo-vostochnom sklone El'brusa 11 avgusta 2006 g.: prognoz, sobytie i posledstviya [Outbreak of a glacial lake on the northeastern slope of Elbrus on August 11, 2006: forecast, event and consequences] // *Materials of glaciol. research*, 2007b, no. 102, p. 225-229. [In Russian]
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Seinova I.B., Krylenko I.V. Proryv lednikovogo ozera na severo-vostochnom sklone El'brusa 11 avgusta 2006 g.: prognoz, sobytie i posledstviya [Breakthrough of a glacial lake on the northeastern slope of Elbrus on August 11, 2006: forecast, event and consequences] // *Materials of glaciological research*. 2007. No. 102. S. 211-215. [In Russian]
- Costa JE Floods from dam failures. Denver, Colorado, 1985, 54 p. (Open-File Rep. 85-560).
- Das, A, Sagin.J., Sanden, Y., Evans, E., McKay, H., Lindenschmidt, K., 2015, Monitoring freeze-up icecover progression of the SlaveRiver, Canada, *Canadian Journal of Civil Engineering*, doi: 10.1139/cjce-2014-0286
- Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Impact of climate change on the hydrological regime of the Pyanj river basin. Mirzokhonova S.O., Dushanbe 2019 [In Russian].
- Erokhin S.A., Zaginaev V.V., 2020. Tipizaciya gornyyh ozer Kyrgyzstana po stepeni ih proryvoopasnosti [Typification of mountain lakes in Kyrgyzstan according to the degree of their outburst hazard]. *GeoRisk*, Volume XIV, No. 3. c. 78-86. <http://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-3-78-86> [In Russian].
- Erokhin, S.A., Zaginaev, V.V. (2020b). Tendencii proryvoopasnosti v razvitii gornyyh ozer Kyrgyzstana. [Breakthrough trends in the development of mountain lakes in Kyrgyzstan]. Debris flows: catastrophes, risk, forecast, protection: *Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe-Khorog, Tajikistan)*, volume 1, Dushanbe: Promotion LLC, 194-207 [In Russian].
- Huggel, C., Käab, A., Haeblerli, W., Teysseire, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316-330. <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Kidyayeva, V. M. (2016). Kolebaniya urovnya vody v gornyyh lednikovyyh ozerah Priel'brus'ya [Fluctuations in the water level in the mountain glacial lakes of the Elbrus region water level fluctuations in mountain glacier lakes in the Elbrus region]. (February) [In Russian].
- Kidyayeva, V. M., Chernomorets, S. S., Savenyuk, E. A., Krylenko, I. N., & Dokukin, M. D. (2017). Modelirovanie proryvov gornyyh ozer i selevyyh potokov v Gorno-Badahshanskoj avtonomnoj oblasti,

- Tadzhikistan. Tret'i Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii: materialy mezhdunar. nauchn. konf. [Modeling of outbursts of mountain lakes and mudflows in the Gorno -Badakhshan Autonomous Region], Tajikistan. 897-902 [In Russian].
- Konovalov V.G. Distancionnyj monitoring proryvoopasnyh ozer na Pamire [Remote monitoring of outburst -prone lakes in the Pamirs]. *Cryosphere of the Earth*, 2009, v. XIII, no. 4, p. 80-89 [In Russian]
- Krylenko I.N., Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Tutubalina O.V., Shakhmina M.S., Krylenko I.V., Norin S.V. Distancionnyj i nazemnyj monitoring lednikovyh ozer Central'nogo Kavkaza. Trudy mezhdunar. Central'no-Aziatskoj konf. «Distancionnoe zondirovanie Zemli i geoinformacionnye sistemy» [Remote and ground monitoring of glacial lakes in the Central Caucasus // Proceedings of the International Central Asian Conference"] *Remote Sensing of the Earth and Geoinformation Systems*, Almaty, 2008 [In Russian].
- Mirzokhonova S.O. (2021). Vliyanie izmeneniya klimata na gidrologicheskij rezhim bassejna reki Pyandzh [Impact of climate change on the hydrological regime of the Pyanj river basin. [author. diss. ... cand. tech. Sciences]. Date of access: 3.09.2019. https://www.imoge.tj/kitobho/Monographiya_Mirzokhonova-S.O.pdf [In Russian].
- Mool PK, Bajaracharya SR Tista Basin, Sikkim Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region. Nepal, Katmandu, ICIMOD, 2003, 145 p.
- Mool PK, Bajaracharya SR, Joshi SP Risk assessment of Tsho Rolpa Glacial Lake along the Rolwaling and Tama Koshi Valleys Dolakha District. Nepal, Katmandu, ICIMOD, 2001, 75 p.
- Mool PK, Bajaracharya SR, Roohi R. et al. Upper Indus, Jhelum, Shingo, Shyok, and Shigar River basins. Pakistan Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region. Nepal, Katmandu, ICIMOD, 2004, 354 p.
- Petrakov, D.A. (2008). Selevaya opasnost' lednikovyh ozer i ocenka veroyatnosti ih proryva. [Mudflow danger of glacial lakes and assessment of the probability of their breakthrough]. Mudflows: catastrophes, risk, forecast, protection: Proceedings of the International Conference. Pyatigorsk: Institute "Sevkavgiprovodkhoz", 309-312 [In Russian].
- Petrakov, DA Debris flow hazard of glacial lakes and assessment of their outburst risk. Mudflow streams. (2008).
- Piotrovsky A. A., Zengina T. Yu. Izmenenie vodnogo zerkala akvatorii Angarskogo Sora v svyazi s prirodnyimi i antropogennymi kolebaniyami urovnya vody v Bajkale [Changes in the water surface of the Angarsky Sor in connection with natural and anthropogenic fluctuations in the water level in Baikal]. 2018. №2. With. 102-108 [In Russian].
- Pirmamadov U.R., Bobov R.A., Raimbekov Yu., Marodaseinov F.O., Zikillobekov I., Chernomorets S.S., Savenyuk E.A., Kidyayeva V.M., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Viskhadzhieva K.S. Risk i posledstviya proryvov vysokogornyh ozer Tadzhikistana. Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita: trudy 6 Mezhdunarodnoj konferencii (Dushanbe-Horog, Tadzhikistan) [The risk of outbursts of high mountain lakes in Tajikistan and their consequences]. 2019 [In Russian]
- Sagin, J, Sizo, A., Wheeler, H., Jardine, T., Lindenschmidt, KE, 2015, A Water Coverage Extraction Approach to Track Inundation in the Saskatchewan River Delta, Canada, *International Journal of Remote Sensing* 36:764- 781
- Sagintayev, Z, Sultan, M., Khan, SD, Khan, AS, Mahmood, K., Yan, E., Milewski, A., and Marsala, P., 2011, Remote Sensing Contributions to Hydrologic Modeling in Arid and Inaccessible Watersheds, Pishin Lora Basin, Pakistan. *Journal of Hydrological Processes*, June, 2011, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.8114/full>
- Shafiev G.V., Analiz sostoyaniya proryvoopasnyh ozer po doline reki Gunt v YUgo-Zapadnom Pamire. [Analysis of the state of outburst -prone lakes along the valley of the Gunt River in the South-Western Pamirs]. Mudflows: catastrophes, risk, forecast, protection. Tblisi, 2018, pp. 631-638. [In Russian]
- Tukeev O.V. Selevye yavleniya Pamira: katastrofy, zakonomernosti, prognoz [Mudflow phenomena of the Pamirs: Catastrophe, regularities, forecast]. M., 2002, 176 p. [In Russian]

- Vinogradov Yu.B. Etyudy o selevyh potokah [Etudes about mudflows]. L., Gidrometeoizdat, 1980, 144 p. [In Russian].
- Vinogradov Yu.B. Glyacial'nye proryvnye pavodki i selevye potoki [Glacial outburst floods and mudflows]. L., Gidrometeoizdat, 1977, 155 p [In Russian].
- Zimnitsky A.V. Formirovanie, rasprostranenie i dinamika prilednikovyh ozer Zapadnogo i Central'nogo Kavkaza (v granicah Rossii): avtoref. diss. ... kand. geogr. nauk [Formation, distribution and dynamics of glacial lakes in the Western and Central Caucasus: Abstract of the thesis. dis. cand. geogr. Sciences]. Krasnodar, 2005, 22 p. [In Russian]
- Zimnitsky A.V., Nikolaychuk A.V. Sovremennoe oledenenie i prilednikovye ozera v verhov'yah Malki (Central'nyj Kavkaz) Izmeneniya prirodnoj sredy na rubezhe tysyacheletij: trudy Mezhdunarodnoj elektronnoj konferencii [Modern glaciation and periglacial lakes in the upper reaches of the Malka (Central Caucasus)] // *Changes in the natural environment at the turn of the millennium: Tr. International, electronic conf.* Tbilisi; Moscow, Polygraph, 2006, p. 35-40 [In Russian].