

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)**

Крыжановская Алина Эдуардовна

Выпускная квалификационная работа

**Оценка прорывоопасности приледниковых озёр в Юго-Восточном Алтае  
по данным дистанционного зондирования**

Уровень образования магистратура

Направление 05.04.04 «Гидрометеорология»

Основная образовательная программа «Опасные гидрологические явления: от мониторинга до принятия решений (ГОЯ)»

Научный руководитель: старший преподаватель кафедры гидрологии суши, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, к.г.н, Банцев Дмитрий Вадимович

Рецензент: доцент кафедры физической географии и геоинформационных систем, Алтайский государственный университет, к.г.н., Останин Олег Васильевич

Санкт-Петербург

2023

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| <b>Введение</b> .....  | 3  |
| <b>Глава 1. Основные понятия и литературный обзор</b> .....  | 5  |
| 1.1. Основные понятия.....   | 5  |
| 1.2. Исследования горных озёр в России и в мире .....  | 9  |
| <b>Глава 2. Методы оценки прорывоопасности горных озёр</b> .....   | 14 |
| 2.1. Оценка по генетическим типам.....   | 14 |
| 2.2. Метод графической (балльной) оценки.....  | 17 |
| 2.3. Факторы, учитываемые при оценке прорывной опасности .....   | 20 |
| <b>Глава 3. Объекты исследования и физико-географические условия</b> .....                                     | 23 |
| 3.1. Южно-Чуйский хребет .....   | 23 |
| 3.2. Горный узел Цамбагарав и массивы Хархираа и Тургэн .....  | 28 |
| <b>Глава 4. Используемые материалы и методы</b> .....  | 35 |
| 4.1. Использование индекса MNDWI .....   | 35 |
| 4.2. Дистанционное определение глубины и объёма озера.....   | 37 |
| 4.3. Проведение полевых исследований.....  | 38 |
| <b>Глава 5. Результаты дешифрирования про помощи данных дистанционного зондирования</b> .....                  | 40 |
| 5.1. Систематизация приледниковых озёр .....   | 40 |
| 5.2. Изменения площади поверхности прорывоопасных озёр.....  | 46 |
| 5.2.1. Горные массивы Хархираа и Тургэн.....   | 47 |
| 5.2.2. Горный массив Цамбагарав. ....  | 54 |
| 5.2.3. Южно-Чуйский хребет. ....   | 58 |
| 5.3. Варианты по улучшению существующей методики.....  | 65 |
| 5.4. Результаты .....  | 67 |
| <b>Глава 6. Сравнение данных дешифрирования с полевыми данными на примере озёр «Таможенное» и Нурган</b> ..... | 70 |
| <b>Заключение</b> .....  | 76 |
| <b>Список источников</b> .....   | 78 |
| <b>Приложения</b> .....  | 86 |

## Введение

В связи с изменением климатических условий происходит увеличение скорости отступления ледников, что способствует образованию большого числа озёр, подпруженных неустойчивыми естественными плотинами. Эти озёра распространены по всему миру и являются крайне опасными объектами с точки зрения возможности возникновения прорывов.

Под прорывом подразумевается быстрое опорожнение озёрной котловины, вызванное размывом плотины или переливом воды через неё, несущее за собой значительное повышение расхода воды в долине реки ниже по течению. Селевые потоки, образованные в результате прорыва озера считаются опасными гидрологическими явлениями, они обладают катастрофической мощностью и могут стать причиной гибели людей и разрушения хозяйственной инфраструктуры.

Озёра, склонные к прорыву, приурочены к ледниковым зонам на больших высотах. Актуальность исследования озёр Юго-Восточного Алтая связана с тем, что в данном районе в последнее время наблюдается рост туристической активности (строятся туристические базы, проводятся горные и пешие походы). Поскольку данный район характеризуется слабой гидрологической изученностью, а также является труднодоступным, проведение полевых исследований на интересующих объектах может быть затруднено. В связи с этим, особую актуальность приобретают дистанционные методы исследования.

Использование методов дистанционного зондирования Земли позволяет быстро изучить необходимые характеристики, поэтому они, в основном, используются на начальных этапах исследования в качестве вспомогательных методов.

Цель работы – оценить прорывоопасность приледниковых озёр на основе данных дистанционного зондирования, сравнить результаты этой оценки с результатами полевых работ, а также внести предложения по улучшению методики балльной оценки прорывоопасности.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ литературы по теме работы;
2. Выявление приледниковых озёр в пределах исследуемых горных массивов по данным дистанционного зондирования Земли;
3. Определение характеристик озёр массивов Хархираа, Тургэн, Цамбагарав и Южно-Чуйского хребта по результатам дешифрирования;
4. Оценка прорывоопасности приледниковых озёр при помощи балльной методики;
5. Проведение полевых работ в районе ледника Некрасова (Южно-Чуйский хребет, республика Алтай, июль 2022 года) – проведение стандартных наблюдений на оборудованных временных водомерных постах, выполнение батиметрических съёмов озёр и тахеометрических съёмов прибрежной территории, организация метеорологических наблюдений за температурой и влажностью воздуха, измерение скоростей течения на водотоках;
6. Сравнение результатов оценки с полевыми данными;
7. Разработка предложений по улучшению методики оценки прорывоопасности по данным дистанционного зондирования.

# Глава 1. Основные понятия и литературный обзор

## 1.1. Основные понятия

Глобальное потепление является причиной устойчивого сокращения современного оледенения. Ледники отступают, и это приводит к образованию и увеличению числа высокогорных озёр и расширению моренно-ледниковых комплексов. Существование гляциальных озёр обусловлено климатическими факторами, а также рельефообразующей деятельностью ледников (Усубалиев и др., 2020).

Горные озера – естественные водоёмы, которые формируются в особых физико-географических условиях горных территорий. Для горных территорий характерна ярусность и расчлененность рельефа, солярная и ветровая экспозиция склонов, особое распределение температур воздуха и осадков, а также высотная поясность – эти факторы влияют на особенности формирования и распространения горных озёр. Количество выпавших осадков связано с расчлененностью рельефа и взаимным расположением хребтов. (Мильков, 1967).

Образование горных озёр происходит преимущественно на моренно-ледниковых комплексах у конца ледника, продолжаясь еще длительное время после его отступления (Усубалиев и др., 2020).

По методу образования ледниковые озёра подразделяют на: каровые, троговые озёра – озёра, образованные ледниковой экзарацией, обычно находящиеся в стабильном состоянии, они подпружены коренными породами. Возникновение селевой опасности здесь возможно лишь в редких случаях. Существуют также ледниковые озёра, формирование которых происходит на поверхности ледников, а также внутри них, это определяют их подразделение на внутриледниковые, наледниковые и подпруженные озёра.

Внутриледниковые озёра формируются в ёмкостях внутри ледника, которые могут быть как закрытыми, так и полузакрытыми. Образование и накопление внутриледниковых вод обусловлено существованием сложной системы каналов и тоннелей внутри ледника, пронизывающей его на разных

уровнях, поэтому необходимым условием для формирования внутриледникового озера является наличие у ледника разветвленной системы трещин.

Образование наледниковых озёр происходит, в свою очередь, в процессе локального протаивания поверхности ледника, в ходе которого вода аккумулируется в его понижениях. Это происходит до тех пор, пока не произойдёт образование подземного или поверхностного канала стока. Подпруженные ледниковые озёра формируются из-за подпруживания телом ледника потока талых вод. Озёра такого типа отличаются большими размерами, а также высокой степенью прорывоопасности (Усубалиев и др., 2020).

Моренные озёра образованы в областях ледниковой аккумуляции, они формируются позади легко разрушаемых морен, которые являются маркерами прошлых наступаний ледника. Размер моренных водоёмов зависит от темпов отступления ледника (Петраков и др., 2008). Завальные водоёмы формируются в горных территориях как результат определенных природно-климатических и склоновых процессов, они образуются преимущественно путём обвалов и оползней, которые обычно случаются из-за переувлажнения неустойчивых грунтовых массивов, с последующим скоплением воды в русле перед запрудной плотиной (Виноградов, 2008).

Термин «приледниковое озеро» наиболее часто встречается в литературных источниках, он отражает как расположение, так и генезис озёр (Медеу, 2011). Приледниковые озёра – водоёмы, возникающие в языковой части ледников, которые, в свою очередь, могут находиться как в стадии наступания, так и в стадии отступления (дегляциации) (Виноградов, 1977). Приледниковые озёра имеют преимущественно ледниковый тип питания – его обеспечивают поверхностные, подземные и внутриледниковые воды, которые образуются из-за таяния льда и снежников. Такие озёра можно разделить на стационарные и нестационарные по продолжительности своего существования.

Стационарные озёра заполняются водой периодически, в то время как нестационарные – лишь эпизодически (Усубалиев и др., 2020). В зимний период

стационарные водоёмы не опорожняются полностью, а в период максимальной абляции полностью заполнены водой, в то время как нестационарные озёра могут не наполняться в течение нескольких лет (Капица и др., 2018). В настоящее время, в связи с потеплением климата, число нестационарных озёр будет расти.

В горных водоёмах сток может быть: подземным – фильтрация воды через внутриморенные и внутриледниковые каналы стока, поверхностным – при переливе через наименее высокий относительно зеркала озера участок плотины, а также смешанным – при наличии одновременно обоих видов стока. Характер стока может указывать на стадию развития озера – так, на ранних этапах развития распространён подземный сток; а на конечном этапе развития – поверхностный (Бузруков и др., 2006).

В зависимости от своих геоморфологических особенностей, приледниковые озёра подразделяются на (Черноморец и др., 2015):

- Супрагляциальные (надледниковые) – озёра, которые окружены ледником, находятся на его теле;
- Прогляциальные – озёра, одна из сторон которых подпирается ледником;
- Перигляциальные – озёра, расположенные на небольшом расстоянии от ледника (до двух километров), однако не примыкающие к нему;
- Экстрагляциальные – озёра, не имеющие связь с ледником (ледниковое питание), и находящиеся на расстоянии  $>2$  км от него.

Плотина горного озера удерживает объём воды на склоне. Подпорные перемычки приледниковых озёр состоят преимущественно из моренных (талых, мёрзлых) грунтов, а также ледникового тела. Для таких озёр нередко существует риск их прорыва, который может произойти как путем размыва моренной перемычки из-за перелива потока воды через её край, так и в результате разрушения тела самой плотины, которое может произойти из-за внутренних термоэрозионных разрушительных процессов, а также в результате всплытия подпорных ледников. (Виноградов, 1977). Прорывы моренно-ледниковых озёр в

высокогорных районах являются одними из наиболее разрушительных стихийных бедствий.

Прорывы моренных и ледяных плотин озёр обусловлены различными факторами: возникновением ледяных и каменных лавин, обрушением морен из-за инфильтрации воды, таянием ледяного ядра морены. Помимо этого, прорыв может быть результатом воздействия экстремального количества осадков и высоких температур воздуха, сползанием внутреннего склона морены в озеро, и др. (Петраков и др., 2008).

Вследствие разрушения подпруживающих плотин происходит формирование мощного прорывного потока, который, как правило, провоцирует возникновение селей. Селевые потоки крайне опасны для нижерасположенных объектов: населённых пунктов, сельскохозяйственных угодий, инженерных сетей и коммуникаций (Виноградов, 1977).

Горные озёра имеют разную степень прорывоопасности, в работах (Бузруков и др., 2006, Петраков и др., 2009; Богаченко и др., 2008); водоёмы подразделяются на три категории: первая – опасные озёра, находящиеся на стадии прорыва и несущие угрозу. Для таких озёр необходимо проведение определенных мероприятий для предотвращения возможных негативных последствий. Озёра, отнесённые ко второй категории - слабоопасные, не представляют опасности в настоящий момент, однако, в своем развитии, они приближаются к стадии прорыва, что обуславливает необходимость установления режимных наблюдений. Озёра третьей категории (неопасные) в настоящее время не являются прорывоопасными, для озёр этой категории рекомендуется проводить ежегодное обследование аэровизуальными методами.

Из-за потенциальной опасности прорыва и ущерба, который он способен нанести, изучение прорывоопасных водных объектов и определение их параметров необходимо для их оценки с точки зрения безопасности, а также прогноза возможных негативных последствий. Наиболее прорывоопасными принято считать водоёмы, обладающие объёмом водной массы не менее 20-25



тыс. м<sup>3</sup>, а также подпруженные легкоразмываемой мореной (Богаченко и др., 2008).

## **1.2. Исследования горных озёр в России и в мире**

Наиболее катастрофические прорывы горных озёр мира, а также обзор связанных с ними опасных гидрологических явлений, были описаны в книге Ю. Б. Виноградова «Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки» (Виноградов, 1977). Исследования водных объектов, расположенных в горных территориях, распространены в регионах, для которых воздействие этих объектов может повлечь за собой экономический и социальный ущерб.

К примеру, на территории Таджикистана было зафиксировано 1449 озёр, общая площадь которых составляет 716 км<sup>2</sup>. Существенная часть этих озёр – примерно 78% - расположены на высоте от 3500-5000 метров, и являются горными водоёмами. В Таджикистане проводятся исследования, направленные на изучение прорывоопасности озёр – в 2020 году, в результате совместного исследования Агентства Ага Хана Хабитат (АКАН) и специалистов географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова были определены состояние и степень риска прорыва горных озёр бассейнов рек Шахдара, Бартанг, Пяндж, и др. с целью разработки мер по снижению риска и последствий прорывов (Пирмамадов и др., 2020).

Также, в 2018 году было проведено исследование, направленное на выявление потенциально опасных озёр долины реки Гунд. В работе использовались как методы дистанционного зондирования с использованием спутниковых снимков, так и результаты пешего обследования объектов (Шафиев, 2018). В результате была составлена таблица с основными характеристиками прорывоопасных озёр, а именно: местоположение, объём воды, тип плотины, время добегания прорывной волны до ближайшего населенного пункта, а также список населённых пунктов, для которых прорыв озера представляет непосредственную угрозу. Выявление наиболее уязвимых территорий выполняется с использованием математического моделирования возможного прорыва озера (Раимбеков и др., 2020), а также при проведении

полевых обследований, выполнении батиметрической съёмки, и с применением беспилотных летательных аппаратов.

На территории Кыргызстана насчитывают примерно 2000 озёр, среди которых большинство – высокогорные озёра с малой площадью (Умарова М., 2016). На данный момент выделяют 364 прорывоопасных озера, каждое из которых отнесено к одному из типов (тектонические, ледниковые, моренно-ледниковые, моренные, ригельные, завальные) (Ерохин, 2012).

Для прогноза прорывоопасности озёр необходимо осуществление регулярного мониторинга их состояния, что было реализовано на озёрно-гляциологической высокогорной станции Агыдене, которая расположена на территории Национального парка Ала-Арча (в 50 км от города Бишкек). Результаты исследований, полученные на этой станции в результате проводимых регулярных наблюдений за гидрологическим режимом озёр, пригодны для использования во всех областях Кыргызстана (Кубанычбек уулу и др., 2021).

Наиболее прорывоопасными в настоящее время считаются озёра ледникового типа с внутриледниковыми каналами стока, а также моренно-ледниковые озёра внутриморенных депрессий с неустойчивым подземным стоком и большими колебаниями объёма (Ерохин и др., 2020). В 2008 году в стране произошел катастрофический прорыв озера Зындан, расположенного в верховье бассейна реки Тон, описанный в работе (Маматканов, 2010), ставший причиной больших разрушений и человеческих жертв.

Проводилась оценка риска прорывоопасности ледниково-озёрного комплекса Петрова (Тянь-Шань) – моренно-ледникового озера, представляющего большую угрозу (Торгоев, 2013) – вероятность самопроизвольного прорыва его плотины оценена как средняя, однако, в связи с постоянным увеличением объёма воды в озере и усилением фильтрации, данная вероятность стремительно растёт. Проводилось также геофизическое изучение дамб прорывоопасных высокогорных озёр при изучении структуры завальной плотины озера Кельтор (Тянь-Шань) (Алёшин и др., 2018).

При проведении регулярных наблюдений по геофизическим данным предоставляется возможным отслеживание развития деструктивных процессов в естественных плотинах. На территории Киргизского хребта (Северный Тянь-Шань), также проводятся работы по анализу динамики ледников и приледниковых озёр (Алейникова и др., 2019). На сегодняшний день, исследованные ледники Адыгене и Аксай находятся в состоянии деградации, а площадь и глубина приледниковых озёр, в свою очередь, растёт. Это является причиной увеличения селеопасности в долине реки Ала-Арча – районе активного туризма и одном из наиболее селеопасных районов северной части Кыргызстана.

Для озёр Кыргызского хребта были составлены карты, отображающие их динамику и эволюцию в период с 2008 по 2018 года (Дайыров и др., 2019). Составление данных карт было проведено при помощи методов дистанционного зондирования Земли – были выявлены такие параметры, как площадь, высота, расположение, и т.д. Для оценки устойчивости дамб наиболее прорывоопасных озёр Кыргызского хребта проводились дальнейшие полевые исследования.

На территории Казахстана наиболее селеопасным районом является Заилийский Алатау. Исследование прорывоопасности озёр Заилийского Алатау является крайне актуальной задачей, поскольку город Алматы и его окрестности, включающие многочисленные объекты инфраструктуры, подвержены возможному воздействию селя. Именно поэтому существует множество исследований, направленных на оценку прорывоопасности приледниковых озёр (Благовещенский и др., 2018), разрабатываются системы противоселевых мероприятий на территории Заилийского Алатау (Медеу и др, 2020), (Бакарасова и др., 2008), которые включают мониторинг и раннее предупреждение селевой опасности, оценку и картографирование селевого риска, а также строительство селезащитных сооружений. Систематическое изучение селевой активности здесь проводится с 1950-х годов.

В России исследования, направленные на изучение данных объектов, затрагивают преимущественно Кавказский регион, поскольку он является

центром туристической активности. Озёра, расположенные в Западном и Центральном Кавказе, изучены наиболее детально (Тавасиев, 2019).

В настоящее время в регионе проводится множество исследований, направленных на изучение приледниковых озёр. В том числе, ведётся изучение динамики ледниковых озёр, оцениваются изменения их площадей и объёмов. Помимо этого, проводится также оценка потенциальной прорывоопасности и величина вероятных расходов при прорыве (Черноморец и др., 2007).

Проводятся исследования, направленные на инвентаризацию и составление каталогов ледников и приледниковых озёр, содержащих актуальную информацию об их состоянии. Это необходимо для рассмотрения динамики данных объектов путём сравнения с более ранними исследованиями (Тавасиев, 2019). Была также создана база данных, содержащая информацию о горных озёрах Северной Осетии, и включающая в себя сведения о прорывоопасных озёрах, а также о водных объектах антропогенного происхождения и рекреационного значения (Тебиева, 2017).

Нередко на начальных этапах исследования водных объектов применяются методы дистанционного зондирования Земли. Основным методом при изучении ледниковых озёр стало использование спутниковых снимков: к примеру, для оценки опасности прорыва приледниковых озёр бассейна реки Зедегондон (республика Северная Осетия – Алания, Центральный Кавказ), был проведён анализ спутниковых изображений за период с 1957 по 2021 года (Докукин и др., 2022) - в результате исследования данного района, было выявлено два потенциально опасных озера, прорыв которых возможен при воздействии определённого внешнего триггера (падение обломочных масс в озеро, выпадение экстремального количества осадков).

В работе (Докукин и др., 2022) при помощи аэрофотоснимков и космических снимков проводилось изучение эволюции озёр Кабардино-Балкарии и их котловин, в результате чего была проведена оценка их состояния и выявление фазы развития. Использование космических снимков также актуально при организации мониторинга ледниковых озёр (Коновалов, 2009).

В ходе применения данных дистанционного зондирования Земли для определения площадей водных поверхностей, используются такие методы обработки спутниковых изображений, как определение многоканальных спектральных индексов. В работе (Манилюк и др., 2017) описывается применение модифицированного нормализованного разностного водного индекса (MNDWI). В результате была представлена динамика изменения площадей водного зеркала озёр бассейна реки Аргунь.

В работе (Свирепов, и др., 2021) также было проведено исследование, связанное с оценкой риска прорыва горных озёр при помощи методов дистанционного зондирования. Каждое озеро было отнесено к определенному классу опасности, определенному по интегральной шкале, а также был составлен каталог прорывоопасных озёр Берегового Хребта Кордильер и Патагонских Анд.

## Глава 2. Методы оценки прорывоопасности горных озёр

### 2.1. Оценка по генетическим типам

Как уже было сказано ранее, горные озёра являются динамичными, изменчивыми во времени системами, которые могут быть потенциально прорывоопасными. Причиной прорыва таких водоёмов может стать, помимо всего прочего, повышение уровня воды, несущее за собой перелив через плотину, подпруживающую озеро.

Рост уровня воды в озёрах может быть вызван интенсивным таянием льда в районах водосбора и в «теле» ледника, связанным с резким изменением климатических условий и увеличением солнечной радиации; также возможно откалывание частей ледника и их падение в озеро, что приводит к вытеснению воды из него. Помимо этого, на увеличение уровня воды влияют интенсивные осадки, возникающие в аномальные годы. Ещё одной причиной является уплотнение подпруживающей плотины, вызванное заполнением её «тела» глинистыми частицами, которые содержатся в воде, в результате чего скорость естественного просачивания уменьшается.

Плотины горных озёр состоят преимущественно из глетчерного льда, моренных отложений различного гранулометрического состава, в морене также может присутствовать ледяное ядро. Такие естественные плотины подвержены разрушению, которое может быть вызвано обвалами и оползнями в озеро. Таяние ледяного ядра плотины, в свою очередь, снижает уровень её прочности, способствуя дальнейшему разрушению. Влияет также и гранулометрический состав – плотины, содержащие преимущественно мелкообломочную составляющую, подвержены разрушению в результате размыва. Помимо этого, прорыв озера может произойти в результате катастрофического сброса воды, вызванного образованием каналов стока, которые являются результатом термокарстовых процессов.

При существовании каскада – совокупности последовательно расположенной серии озёр, прорыв одного из них может повлечь за собой

возникновение катастрофического прорывного потока – он будет наращивать свою мощность по мере последовательного прохождения каждого из озёр (Бузруков и др., 2006).

При мониторинге моренно-ледниковых водоёмов определяется степень прорывной опасности конкретного озера. Систематизация прорывоопасных озёр осуществляется исходя из изучения и анализа механизмом их прорыва. Озёра ранжируются по степени прорывоопасности на прорывоопасные, потенциально прорывоопасные и непрорывоопасные.

Для прорывоопасных озёр характерна высокая вероятность их прорыва, связанная с образованием крупного селевого потока высокой плотности, способного нанести существенный ущерб нижележащим объектам инфраструктуры и населённым пунктам. Объём таких озёр обычно составляет не менее 10 000 куб. м., они расположены в верховьях крутых долин (Благовещенский и др., 2017).

Озёра, обладающие высокой опасностью прорыва, характеризуются интенсивным ростом уровня воды в озёрной котловине, за которым может последовать катастрофическое опорожнение. Водоудерживающая перемычка таких озёр может содержать пустоты разных размеров, а также гроты и водотоки, характерно также наличие действующих водопроводящих каналов стока на поверхности перемычки. Устойчивая жаркая погода является причиной таяния мерзлых пород и погребенного льда, о чем может свидетельствовать сползание моренного чехла, появление просадок, трещин и провалов.

Разгрузка прорывоопасных озёр осуществляется преимущественно по подземным каналам стока, интенсивность которого преобладает над поверхностным. Прорыву могут предшествовать такие факторы, как нарушение согласованности выходящего из-под морены стока, а также увеличение его интенсивности в целом (Медеу, 2011).

Потенциально прорывоопасными принято считать водоёмы, также обладающие объёмом воды, превышающим 10 000 куб. м. и неустойчивой перемычкой, однако в области, которая может быть затронута возможным

воздействием прорывного паводка, отсутствуют социально значимые объекты, таким образом, прорыв таких озёр способен привести лишь к экологическому ущербу (Благовещенский и др., 2017).

Согласно методике Казселезащиты (Медеу, 2011), к категории потенциально прорывоопасных водных объектов относятся подпрудные и приледниково-западинные озёра. Такие водоёмы характеризуются устойчивым гидрологическим режимом, что свидетельствует о стабильной пропускной способности дренажной системы – во время сезонной аккумуляции и опорожнении озёра, уровень воды в нём, как правило, изменяется постепенно.

Для потенциально прорывоопасных озёр характерно монолитное строение озёрной перемычки, возможно содержание мёрзлых обломочных пород с содержанием линз погребенного льда. Разгрузка таких водоёмов может происходить путём рассредоточенной фильтрации, либо путём поверхностного перелива. Возникновение селеопасных ситуаций характерно только при перестройке внутренних каналов стока.

Непрорывоопасные водоёмы, как правило, отличаются стабильностью своего состояния в течение длительного времени, а также большими размерами. К ним, согласно (Медеу, 2011) относят каровые и некоторые подпрудные озёра. Характер стока воды с озера в основном поверхностный, приток также осуществляется через поверхностные и близко расположенные к поверхности внутриморенные каналы. Моренная перемычка часто бывает задернована и имеет сглаженную поверхность, характерно также полное отсутствие мёрзлых пород и погребённого льда.

Уровень воды в непрорывоопасных озёрах стабилизируется, снижаясь до определенных отметок при прекращении притока воды в зимний период, что может говорить об отсутствии или же незначительном количестве пустот и водопрводящих каналов, которые могли бы обеспечивать фильтрацию через чашу озера, а разгрузка таких озёр протекает постепенно (Медеу, 2011). Озёра можно также разделить на различные степени прорывоопасности исходя из состава их плотин (Богаченко и др., 2008): подпруживающая потенциально



опасные озёра плотина состоит из легкоразмываемой морены, также возможно наличие погребённого льда; потенциально слабоопасные – озёра, плотина которых устойчива, состоит из моренного материала, а погребенный лёд отсутствует; потенциально неопасные – к ним относятся озёра, подпруженные устойчивым скальным ригелем.

Таким образом, прорывоопасность горных озёр растёт в результате изменений в строении дренажной системы – появления термокарстовых воронок, трещин, увеличения числа дренажных каналов, а также вследствие увеличения размеров озера до состояния максимального заполнения озёрной котловины водой. К примеру, важнейшим признаком опасности прорыва моренных озёр, возникающих аperiodически, является полное заполнение водой их озёрной котловины – катастрофический сброс воды озёр такого типа происходит по внутренней дренажной системе (Благовещенский и др., 2017).

Термокарстовые и приледниковые озёра считаются наиболее прорывоопасными, механизм их опорожнения в большинстве случаев осуществляется следующим образом: из-за блокировки каналов внутреннего стока происходит резкое наполнение озёрной чаши водой, которая ранее поступала в котловину, не заполненную до критического уровня. В связи с повышением уровня воды в озере, происходит разрушение моренной перемычки из-за оползневых или эрозионных процессов, более того, с увеличением гидростатического напора растёт вероятность выдавливания «пробки» (Медеу, 2011).

## **2.2. Метод графической (балльной) оценки**

Для того, чтобы ранжировать озёра по степени их прорывоопасности при помощи балльной оценки, были разработаны и усовершенствованы определённые методики Ю.Б. Виноградовым (Виноградов, Виноградова, 2008), Дж. Рейнольдсом (Reynolds, 2003), К. Хуггелем (Huggel et al., 2004), и другими исследователями. Сам метод балльной оценки даёт возможность проведения анализа характеристик исследуемых объектов с использованием данных дистанционного зондирования, однако его недостатком является то, что такой

метод подразумевает использование единых шкал для оценки, что исключает возможность учёта индивидуальных особенностей конкретного объекта, а также является отчасти субъективным.

В настоящее время используется методика (Reynolds, 2003), основанная на использовании методов многофакторной балльной оценки – прорывоопасность озёр является функцией совокупности характеристик, определяющих устойчивость плотины и степени воздействия внешних факторов – триггера, который является «спусковым механизмом» прорыва.

Критериями для данной эмпирической системы балльной оценки прорывоопасности ледниковых озёр являются такие характеристики, как: тип плотины, объём озера (млн. куб. м.), отношение ширины плотины к её высоте, высота нижней точки плотины над урезом воды в озере (в метрах), характер стока через плотину, а также риск откалывания ледника и возникновения ледопадов или скальных оползней.

Каждому критерию присваивается определённое количество баллов (от 0 до 50), сумма которых определяет степень прорывоопасности (чем больше сумма, тем выше вероятность прорыва озера) путём сравнения со значениями эмпирической шкалы рейтинговых оценок потенциальной прорывной опасности. Так, если сумма баллов составляет 100, вероятность прорыва озера оценивается как средняя, 125 – высокая, 150 – очень высокая; прорыв озера может произойти в любое время при сумме баллов больше 100.

В работе (Петраков, 2008) данная методика была усовершенствована при помощи дополнения и уточнения учёта воздействия возможных триггерных механизмов прорыва – здесь учитывается, помимо всего прочего, влияние аномальных атмосферных осадков, возможное всплытие ледяной плотины, возникновение волн, вызванных оползнями и отколом айсбергов, способных повлечь за собой перелив через плотину или её размыв (Торгоев, Алёшин, 2012). Помимо этого, вес каждого из факторов прорыва оценивался в интервале от 0 (не влияет) до 100 (полностью определяет). При высокой вероятности прорыва

возможно самопроизвольное разрушение плотины. Таким образом, степень прорывоопасности определяется исходя из суммы следующих баллов:

1) Тип плотины:

- Скала – 0 баллов;
- Морена – 20 баллов;
- Морена с ледяным ядром – 50 баллов;
- Лёд – 80 баллов;

Также, для ледяной плотины необходимо учитывать возможность её всплытия – дополнительно прибавляется 100 баллов.

2) Высота низшей точки плотины над урезом:

- Больше 10 метров – 10 баллов;
- 1-10 метров – 40 баллов;
- Меньше 1 метра – 90 баллов;

3) Отношение ширины плотины к её высоте:

- Менее 0,5 – 0 баллов;
- 0,2-0,5 – 30 баллов;
- Более 0,2 – 70 баллов;

4) Характер стока через плотину:

- Сток через морену по руслу с отмошкой – 10 баллов;
- Сток по дренажной системе ледника – 30 баллов;
- Фильтрация через морену – 60 баллов;
- Сток по поверхности льда – 100 баллов;

5) Объём озера:

- До 100 тыс. куб. м. – 10 баллов;
- 100 тыс. куб. м. – 1 млн. куб. м. – 20 баллов;
- От 1 млн. куб. м. – 30 баллов;

Воздействие внешнего триггера оценивается по следующим критериям:

1) Возникновение волн из-за ледяных и каменных лавин:

- Волны намного ниже плотины – 10 баллов;

- Высота волн сопоставима с высотой плотины – 50 баллов;
- Волны существенно выше плотины – 100 баллов;

2) Экстремальная жара/дожди:

- Один из факторов (жара/ливень) – 10 баллов;
- Ливень после продолжительной жары – 30 баллов;

Устойчивость плотины определяется по параметрам, которые возможно оценить методом дешифрирования (по оси абсцисс откладывается сумма баллов, показывающая устойчивость плотины - тип плотины, высота низшей точки над урезом, отношение ширины плотины к её высоте, характер стока через плотину, объём озера), по оси ординат - сумма баллов по возможному триггеру, который проявляется в виде волн из-за ледяных и каменных лавин, экстремальной жары/дождей (Распутина и др., 2021).

Степень прорывоопасности ледникового озера оценивается графическим методом в соответствии со следующей схемой (рис. 1):

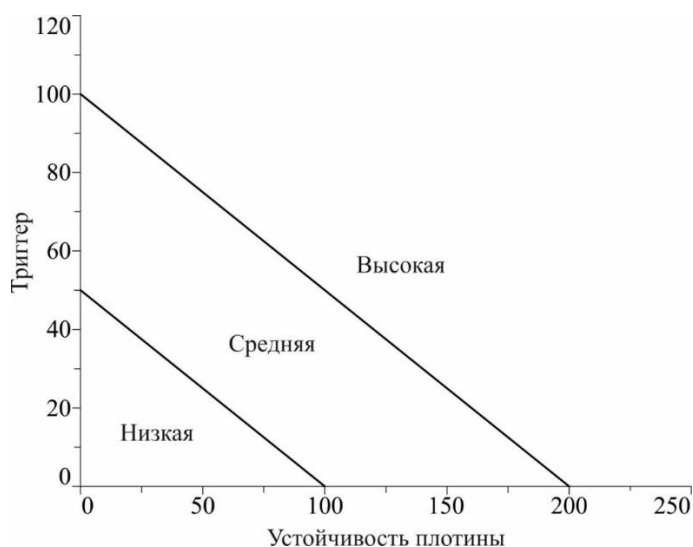


Рис. 1. Вероятность прорыва в зависимости от устойчивости плотины и воздействия триггерного фактора (Петраков, 2008).

### 2.3. Факторы, учитываемые при оценке прорывной опасности

Из-за того, что влияющие на прорыв факторы индивидуальны для каждого озера, сам прорыв спрогнозировать крайне трудно. На прорывную опасность водоёма влияют многие факторы, такие как близость к леднику – чем ближе к

нему расположено озеро, тем сильнее вырастает опасность его прорыва, а также присутствие обрывистых берегов или скал, нависающих над водной поверхностью. Ниже более подробно рассмотрены факторы прорывоопасности, учитываемые при балльной оценке:

1) *Тип плотины.* Строение плотины влияет на опасность прорыва озера. На основе типа плотины и условий образования водоёма устанавливают его генетический тип, который, в некоторых классификациях, является определяющей характеристикой прорывоопасности. Однако, следует уточнить, что определение типа плотины озера бывает затруднительно даже при полевых обследованиях – установление внутреннего состава плотины, а также наличия пустот, погребённых льдов и скальных пород возможно лишь при проведении геофизических работ.

2) *Высота нижней точки плотины над урезом воды в озере.* Данный параметр отображает устойчивость плотины, которая увеличивается с ростом её «надводной» части. Она определяется с помощью цифровой модели рельефа и спутниковых снимков, а также при полевых исследованиях.

3) *Отношение ширины плотины к её высоте.* Данное отношение характеризует форму плотины озера – чем соотношение ширины и высоты больше, тем более устойчивой она является. Шириной плотины принято считать расстояние от отметки максимальной глубины озера, до отметки той же высоты, расположенной на противоположной стороне от гребня плотины ниже по склону.

Ширина плотины может определяться как в ходе полевых работ, так и с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) и космических снимков, однако такой способ оценки является субъективным.

4) *Характер стока через плотину.* Если сток с озера поверхностный и осуществляется по руслу с отмосткой, то вероятность размыва дамбы при резком росте уровня воды уменьшается; в то же время, если сток происходит путём фильтрации через морену или идёт по поверхности льда, то уровень прорывоопасности такого объекта крайне велик (Петраков, 2008).

5) *Объём озера.* Поскольку одним из необходимых для прорыва факторов является достаточное количество воды, определение объёма водоёма является крайне важной задачей. Сложность заключается в том, что прорывоопасные водоёмы расположены в труднодоступных районах, куда, зачастую, технически невозможна доставка необходимого для батиметрической съёмки оборудования. Из-за этого, при выполнении оценки прорывоопасности приледниковых озёр, объём озера, как правило, рассчитывается при использовании данных дистанционного зондирования и космоснимков. Методика, по которой производилось вычисление объёмов озёр в данной работе будет представлена в главе 4.

## Глава 3. Объекты исследования и физико-географические условия

Объектами исследования данной работы являются приледниковые озёра Южно-Чуйского хребта (Центральный Алтай, Россия), массивов Цамбагарав, Хархираа, Тургэн (Монголия).

### 3.1. Южно-Чуйский хребет

Горный хребет, расположенный в Центральном Алтае, в междуречье Карагем и Чаган-Узун на севере и Джазатор на юге. Его длина составляет 120 км, он простирается с запада на восток. Южно-Чуйский хребет является восточным окончанием южной цепи гор Центрального Алтая. Наивысшая точка хребта – вершина горы Ирбисту (высота – 3967 метров) (Окишев и др., 2006).

#### *Орография*

Южно-Чуйский хребет имеет ромбовидную форму, его северный макросклон относительно пологий, в то время как южный – короткий и ступенчатый. Высота хребта в центральной части достигает 3700-3900 метров, в осевых частях – 3300-3400 метров. Для Южно-Чуйского хребта в его высокогорной части характерен альпийский тип рельефа, распространены такие ледниковые формы, как моренные гряды, цирки, кары. Начиная с высоты в 2500 метров, происходит формирование мерзлотных форм рельефа (бугры пучения, полигоны) (Новиков, 2004).

#### *Климат*

Для Южно-Чуйского хребта характерен сухой и холодный (криоаридный) климат. В связи с тем, что данный горный хребет имеет достаточную удалённость и отгороженность другими горными системами, теплые и влажные воздушные массы, приходящие с Атлантики, теряют большую часть своей влаги, доходя сюда трансформированными, в то же время, воздушные массы с Северного Ледовитого океана доходят сюда холодными и сухими.

Несмотря на то, что среднегодовая температура воздуха в высокогорных районах Центрального Алтая достаточно низкая (минус 6 – минус 7°C), лето

относительно тёплое. Средняя температура воздуха в июле в высокогорной зоне (выше 1000 метров над уровнем моря) составляет 5 – 10°C, средние температуры в январе – от минус 12 до минус 32 °С. В высокогорье переход температуры через 0°C осуществляется в весенний период (в конце мая), и осенью (в сентябре) (рис 2).

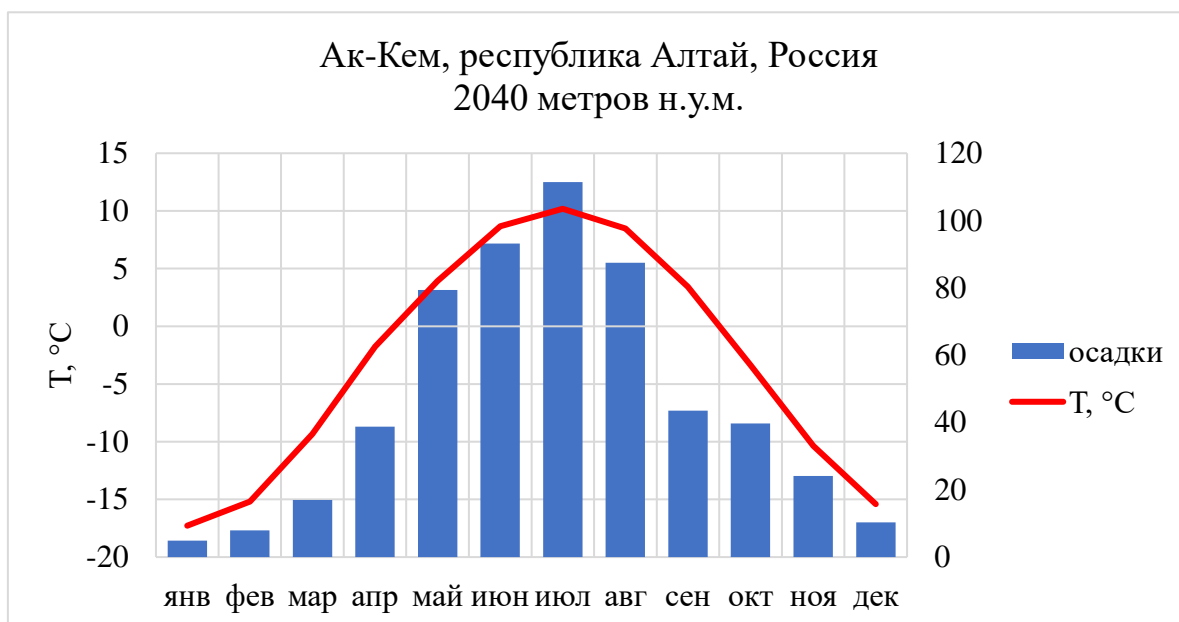


Рис. 2. Климатограмма по данным метеостанции Ак-Кем

Годовое количество осадков на территории Центрального Алтая составляет 400 – 600 мм, тем не менее, его значение может значительно увеличиваться на передовых склонах хребта, достигая 800 – 1000 мм. Осадки неравномерно распределены по сезонам, их максимальное количество выпадает в летние месяцы (июнь-июль), а сумма за период с апреля по октябрь составляет около 70 – 85% от их годовой суммы (Ресурсы поверхностный вод ..., 1969).

#### *Гидрографическая сеть и гидрологический режим*

Для Южно-Чуйского хребта характерна развитая гидрографическая сеть. Здесь берут начало такие реки, как Чаган, Талдура, Ирбисту, Тархата – притоки реки Чуя. Климатические особенности и сложный рельеф, характерные для данного района, обуславливают гидрографическое строение речной сети. Реки здесь текут преимущественно в северном и северо-западном направлении, это



связано с характером общего понижения местности, и положению главных водоразделов.

Средняя густота речной сети составляет 0,43 км/км<sup>2</sup>. Для Южно-Чуйского хребта характерны продольные ущельеобразные долины и долины-троги. Реки таких долин являются типично горными водотоками, их скорость течения велика. Для рек Южно-Чуйского хребта характерно летнее многоступенчатое половодье, его пик обычно наблюдается в третьей декаде июля (Ресурсы поверхностный вод ..., 1969).

Озёра Центрального Алтая в основном распространены на территориях развития многолетней мерзлоты и в приледниковых областях. Большинство озёр расположено в гляциально-нивальном, альпийском и лесном поясах гор на высотах от 2000 до 3200 метров над уровнем моря, преимущественно в верхних частях долин. Наибольшее распространение имеют моренно-подпрудные и каровые водоёмы, площадь которых не превышает 1 км<sup>2</sup>. На территории Центрального Алтая озёрность определена общей увлажнённостью территории, а также характером рельефа. Большинство озёр имеют ледниковое происхождение.

#### *Современное оледенение*

На склонах Центрального Алтая (Катунский хребет, Северо-Чуйский хребет, Южно-Чуйский хребет) находится приблизительно 70% площади всех ледников Алтая (Осипов и др., 2001). Южно-Чуйский хребет – второй по площади оледенения хребет на Алтае после Катунского хребта (Осипов и др., 2001). На его территории расположены 210 ледников, на данный момент времени общая площадь оледенения Южно-Чуйского хребта составляет 118 км<sup>2</sup> (Ganyushkin et al, 2022).

Ледники Южно-Чуйского хребта в основном расположены на высоте 3100 – 3200 метров. Здесь присутствует разница в интенсивности оледенения северного и южного макросклонов – для склонов южной экспозиции суммарная площадь ледников достигает 15% от общей для всего хребта, однако

максимальная по площади ледников высотная зона здесь расположена на 100 метров ниже, чем на северном макросклоне. Высотное распределение отдельных ледников, расположенных на северо-восточных отрогах Южно-Чуйского хребта, отражает изменение удельного баланса массы по высоте и уровень границы питания (Кобялко, 2016).

Ледники Русского Алтая, как и ледники других горных стран, деградируют начиная с середины 19 века (Нарожный и др., 1999). Ледники Южно-Чуйского хребта потеряли 60,5 км<sup>2</sup> (что составляет около 23%) своей массы в период с 1850 по 2003 г. (Никитин, 2009). Абляция ледников здесь начинается с середины марта, заканчиваясь в начале октября. В среднем за сутки стаивание составляет от 2 до 9-11 см в зависимости от погодных условий, а в среднем за абляционный период составляет 4-5 см/сутки (Ресурсы поверхностный вод ..., 1969).

#### *Почвы и растительность*

Почвенный покров Южно-Чуйского хребта характеризуется малой мощностью, слабой гумусированностью, а также сильной каменистостью и щебнистостью субстратов (Наумов, 2009). Распределение основных типов почв определено высотной поясностью, а также влиянием микроклимата и особенностями условий рельефа. Выделяются почвенные пояса, распределенные по высотам, такие как горно-тундровые почвы, горно-луговые почвы, почвы межгорных котловин, речных долин и сухих остепенённых склонов высокогорий (Наумов, 2009).

Растительность Южно-Чуйского хребта богата и разнообразна – здесь представлены такие типы растительности, как лесные (хвойные и лиственные), кустарниковые, луговые (альпийские и пойменные), тундровые, степные, и др. Характер растительного покрова связан с абсолютной высотой местности, на территории Южно-Чуйского хребта выделяют такие растительные пояса, как степной, лесостепной, лесной, субальпийский, альпийско-тундровый, нивальный (Огуреева, 1980).

#### *Гидрологическая изученность*

Гидрологическая изученность Южно-Чуйского хребта в современных условиях недостаточна. Плотность гидрологических постов на рассматриваемой территории крайне мала. Большинство постов в данном районе было открыто в 1940-х годах, они преимущественно находятся на равнинной территории.

В настоящее время основная часть гидрологических постов закрыта. На сегодняшний день, на территории Горного Алтая (в районе Южно-Чуйского хребта) находятся 4 действующих гидрологических поста (рисунок 3): в с. Кучерла на реке Кучерла (открыт в 1962 году), в с. Тюнгур на реке Катунь (открыт в 1932 году), в с. Малый Яломан на р. Катунь (открыт в 1932 году), в с. Терехта на р. Большая Терехта (открыт в 1962 году). Ближайшие к Южно-Чуйскому хребту метеостанции – ГМС «Ак-Кем» и ГМС «Кара-Тюрек».

Метеостанция «Ак-Кем» находится на северо-западном берегу озера Аккем (у подножия северного склона горы Белуха) на высоте 2050 метров над уровнем моря. Наблюдения здесь ведутся начиная с 1932 года. Метеостанция «Кара-Тюрек» расположена на высоте 2600 метров на территории природного парка «Белуха», наблюдения ведутся с 1939 года.

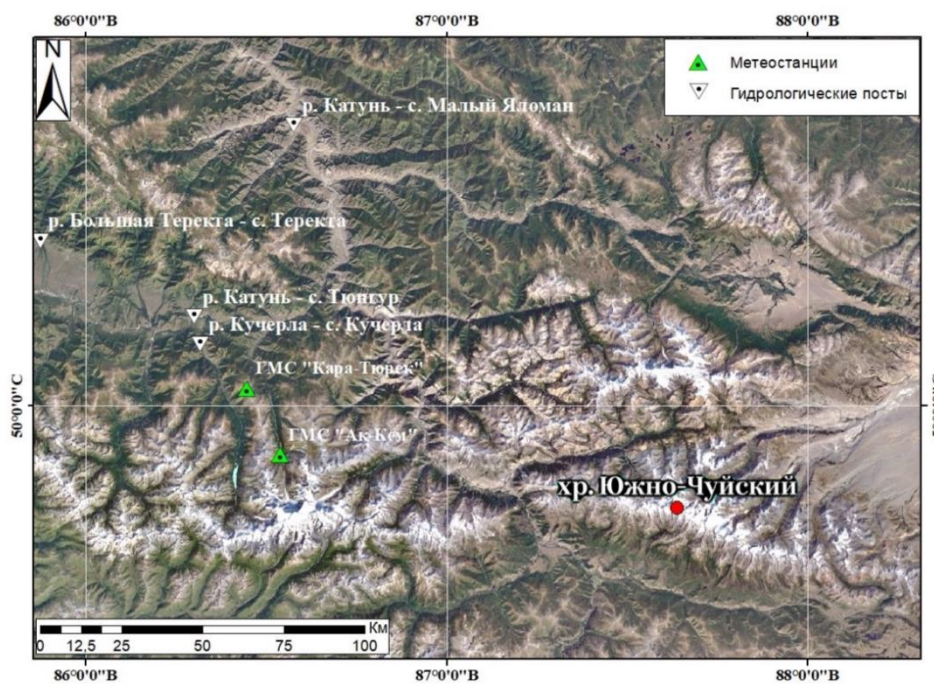


Рис. 3. Схема расположения действующих гидрологических постов и гидрометеорологических станций на территории Горного Алтая.

### **3.2. Горный узел Цамбагарав и массивы Хархираа и Тургэн**

Также в качестве объектов исследования данной работы были выбраны приледниковые озёра массивов Цамбагарав, Хархираа, Тургэн, расположенных на территории Монголии. Природно-климатические условия в Монголии определены расположением данного региона в северной части Центральной Азии.

#### *Физико-географическая характеристика*

Исследуемый район относится к Алтайской ландшафтно-климатической области Монголии (Севастьянов и др., 1994) и находится в западной части страны, она представлена горными цепями Монгольского и Гобийского Алтая, имеющие протяженность 1800 км с северо-запада на юго-восток. Наивысшая точка на территории Монгольского Алтая – гора Куйтун (хребет Табын-Богдо-Ола), достигающая 4374 метров. Для остальных хребтов характерна высота 3200-3500 метров.

Для горных районов Западной Монголии характерно присутствие таких ледниковых форм рельефа, как морены, кары, цирки и трогги, а также глубокое расчленение речными долинами, что является причиной формирования гляциогенных озёр. В верховьях трогов (массивы Табын-Богдо-Ола, Муст, Хархираа, Тургэн и др.) расположены карово-долинные ледники, а также следы мощного древнего оледенения. Склоны Монгольского Алтая отличаются резкой асимметрией склонов. Как правило, северо-восточный склон обычно короткий и относительно пологий, здесь не наблюдается ущелий и отрогов, в то время как юго-западный – достаточно длинный и крутой, здесь характерны глухие глубокие длинные ущелья, врезаемые в тело хребта.

Территория Монголии относится к резко континентальному типу климата, суточная амплитуда температур здесь может достигать 30°C, в то время как годовая – 90°C. Помимо этого, более чем для 46% территории страны характерна отрицательная средняя температура воздуха, положительная среднегодовая температура фиксируется только в центральных и южных частях Гобийских равнинных районов Монголии. Отрицательная среднегодовая

температура воздуха оказывает значительное влияние на термический режим озёр. За последние 40 лет, согласно (Нарожный и др., 2018), на территории Западной Монголии был зафиксирован рост суммы осадков, исходя из проведенного анализа было выявлено, что в горах Монгольского Алтая (а именно на территории Баян-Углэйского аймака), тенденция увеличения осадков составляет 6,8 мм/10 лет.

Региону свойственна длинная, сухая и холодная зима, продолжающаяся с октября по апрель, обусловленная влиянием на территорию Сибирского антициклона. Средняя температура в январе составляет минус 20°C, первые заморозки происходят в сентябре. Толщина снежного покрова здесь крайне мала – в среднем она составляет 27 сантиметров. Снег выпадает часто, однако быстро исчезает, испаряясь в сухом воздухе (Севастьянов и др., 1994). Летний период короткий и тёплый, средняя температура составляет 15°C.

Основная масса осадков (до 90%) выпадает в летнее время, однако их годовое количество сильно изменяется в зависимости от орографических особенностей местности – с увеличением высоты над уровнем моря, годовое количество осадков растёт. К примеру, в Гобийских районах годовое количество осадков составляет в среднем 100-120 мм, в то время как в высокогорных районах Монгольского Алтая этот показатель достигает 400-450 мм. Сезон осадков проходит с апреля по октябрь, и характеризуется летней засухой, прерывающейся интенсивными осадками (Отгонбаяр и др., 2016).

Региональные климатические особенности Монголии, помимо всего прочего, влияют на уровеньный режим и водный баланс водоёмов. Для горных озёр, сезонные колебания уровней зависят от соотношения осадков и притока в озеро, а также от величины стока из них, они составляют 1-2 метра в среднем. Для равнинных озёр амплитуда колебаний уровня больше (превышает 2 метра), что напрямую связано с величиной испарения, количеством выпадающих осадков, а также объёмами стока.

## Горный узел Цамбагарав (долина реки Эрегтийн гол, северо-западная Монголия)

Горный узел Цамбагарав расположен на северо-западе Монголии, в центральной части Монгольского Алтая, в пределах 90°50'в.д. и 48°40'с.ш. В его состав входят такие хребты, как: Цаст, Хух-нуруу, Ямат. Хребет вытянут в северо-западном направлении примерно на 40 км, и представляет собой сильно расчленённое высокогорье. Абсолютные высоты горного узла варьируются от 2840 м до 4193 м (Hironori Yabuki, 2007).

### *Орография*

С северной и северо-восточной частях горный узел Цамбагарав ограничен впадиной бессточного озера Баян Нур (урез воды – 1577 м), на северо-западе расположено урочище Омно-Олон-Нур (1750 – 1850 м), на западе – долина реки Зуслангийн-Гол (2000-2200 м), в восточной части расположена долина реки Кобдо, с южной же стороны характерно пологое снижение поверхности массива, граница гор здесь нечёткая. Горный массив Цамбагарав образован субширотным хребтом серповидной формы, характеризующийся высотами от 3600 до 4200 м, сочленяющимся в районе горы Хух-Нур с субмеридианальным хребтом, высота которого с севера на юг постепенно снижается с 4000-4100 до 3600-3700 м. Хребет ограничен крутыми уступами с выраженными цирками и карами (Отгонбаяр Д. 2012).

### *Климатические характеристики*

Особенности климатических условий в районе хребта Цамбагарав обусловлены тем, что он расположен в центральной части Евразии, характерными условиями здесь являются: небольшое годовое количество осадков (рис. 4), количество которых определено орографическими особенностями местности, преобладает северо-западное направление воздушных масс. Зима на рассматриваемой территории сухая и холодная, а лето – короткое и тёплое.

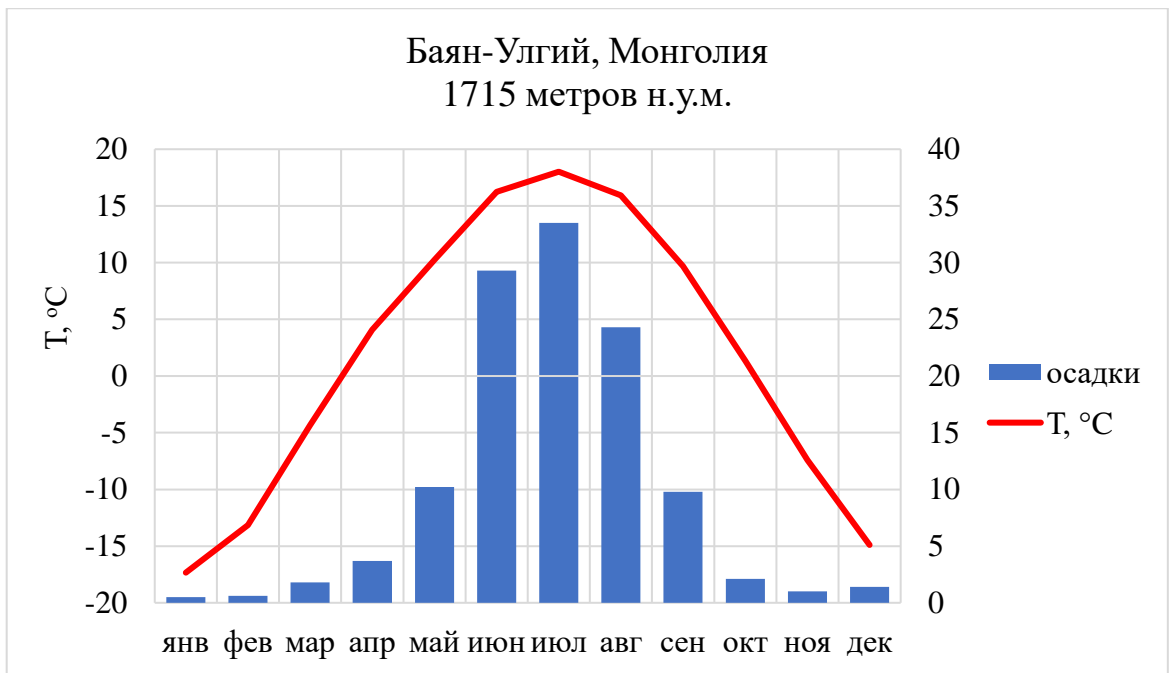


Рис. 4. Климатограмма города Баян-Улгий по данным метеостанции Улгий.

Ближайшей к объекту исследования является гидрометеостанция «Улгий», расположенная недалеко от города Баян-Улгий, на высоте 1715 метров над уровнем моря. Наблюдения на данной станции ведутся начиная с 1959 года.

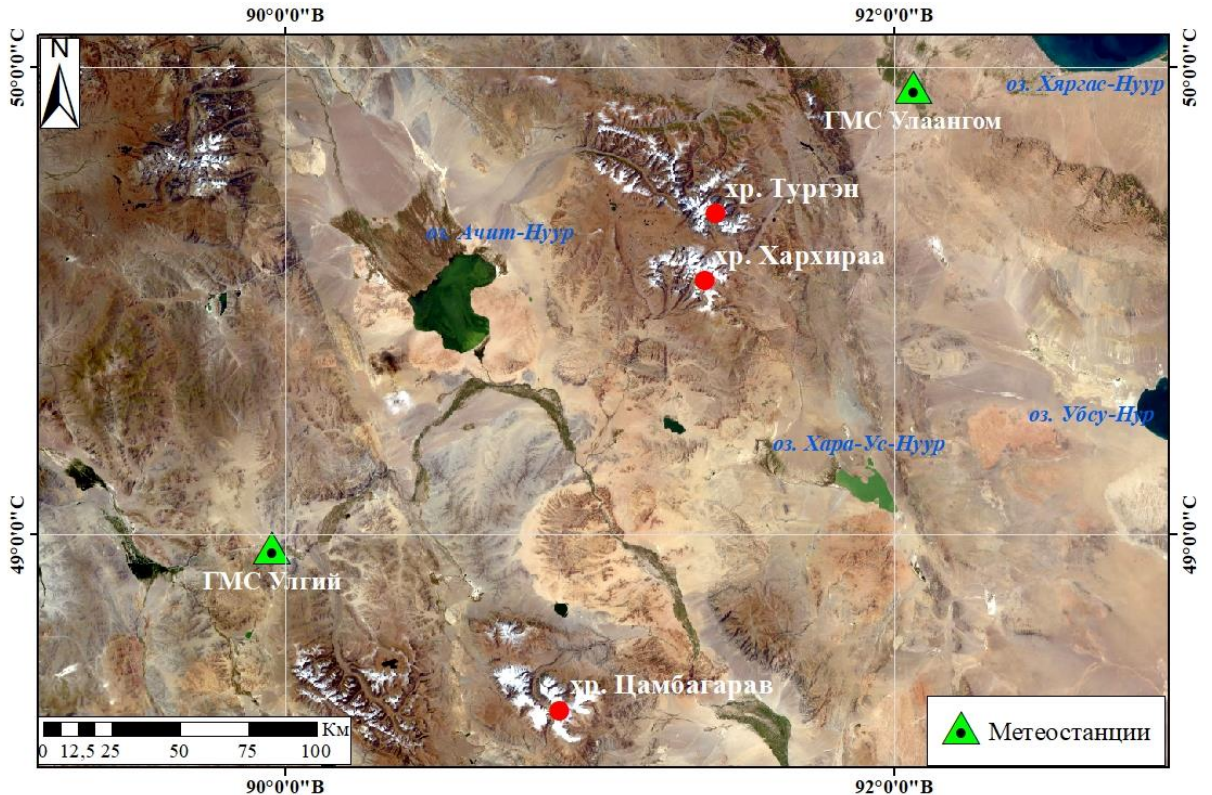


Рис. 5. Схема расположения гидрометеорологических станций в районе хребта Цамбагарав и горных массивов Хархираа и Тургэн (северо-западная Монголия).

### *Гидрографическая сеть*

На территории горного узла Цамбагарав представлены такие водные объекты, как озёра, реки, ледники и снежники. Реки данного района относятся к горному типу, и имеют преимущественно снеговое питание. Здесь основную долю (55-70%) составляют талые ледниковые и снеговые воды, на подземные воды приходится 20-45% формирования стока, а доля дождевого питания составляет 5-10% (Отгонбаяр. 2013).

Множество рек и ручьёв берут начало из ледников хребта Цамбагарав. Реки на данной территории стекают с гор в котловину Больших Озёр, они относятся к бессточным бассейнам Центральной Азии. Основная часть рек является притоками реки Ховд (Пряхина и др., 2021).

### *Современное оледенение*

В пределах массива Цамбагарав расположено 67 ледников, общая площадь которых (по состоянию на 2015 год) составляет 68,41 км<sup>2</sup>, они в основном расположены на высоте от 3500 до 4150 м. На территории хребта ледники сгруппированы в 7 ледниковых комплексов, среди которых самым крупным является комплекс ледников вершины Цаст-Ула, площадью 20,05 км<sup>2</sup>, состоящий из двадцати одного ледника (Ганюшкин и др., 2016). Плосковершинные ледники занимают важную роль в структуре оледенения исследуемого района, поскольку они принимают участие в питании периферии ледниковых комплексов, являясь распределителями твердых осадков.

На территории массива с запада на восток происходит увеличение глубины расчленения рельефа, поэтому северо-восточный склон характеризуется карово-долинными и долинными ледниками, в то время как ледники юго-западного склона – висячие (Ганюшкин и др., 2016). Наиболее крупный из долинных ледников, распространенных на северных склонах массива Цамбагарав, находится в бассейне реки Эрегтийн гол, его площадь составляет 4,86 км<sup>2</sup> (Ганюшкин и др., 2016). Сам район бассейна реки Эрегтийн гол насчитывает семь ледников, среди них: долинные ледники, занимающие площадь 6,72 км<sup>2</sup>, а также карово-долинные и каровые.



Распределение льда по речным бассейнам происходит следующим образом: 0.64 км<sup>3</sup> приходится на бассейн реки Ямат-Гол, 0.56 км<sup>3</sup> на бассейн реки Баян-Гол и 0.53 км<sup>3</sup> на бассейн реки Эрегтийн гол (Отгонбаяр, 2012).

#### *Почвы и растительность*

Почвы на территории горного массива Цамбагарав серьезно деградировали из-за засушливости климата, их формирование происходило в условиях умеренно-влажного климата. Большую часть почв района исследований можно отнести к бесплодным горностепным. Для данных почв характерен маломощный гумусовый горизонт, а почвенный профиль содержит большое количество щебня.

Говоря о растительном покрове исследуемой территории (которая относится к Монгольско-Алтайскому ботанико-географическому району), распространенный здесь тип почвы обуславливает существование специфических видов растительности – преобладают группы растений, способные адаптироваться к затяжным сухим сезонам и имеющие обширную корневую систему: здесь распространён ковыль, типчак, и др.

#### Горные массивы Хархираа и Тургэн

Массив Тургэн имеет протяженность 50 км с северо-запада на юго-восток, и 20 км с юго-запада на северо-восток, он является продолжением горной цепи Бармен, которая протягивается от массива Монгун-Тайга, который расположен на расстоянии в 90 км к северо-западу. Для массива характерно радиальное расчленение расходящимися речными долинами: северная и восточная его часть принадлежит бассейну озера Убсу-Нур, а западная и южная – бассейну озера Ачит-Нур и реки Кобдо. Наивысшая точка массива достигает 3965 метров.

Современное оледенение массива присутствует преимущественно в его южной части, поскольку там вершины превышают 3500 метров; в северной части массива Тургэн современное оледенение отсутствует.

Согласно (Ганюшкин и др., 2011), на территории массива Тургэн существует 39 ледников, общая площадь которых составляет приблизительно 42

км<sup>2</sup>. Большинство ледников находится на северных и северо-восточных склонах массива.

Из-за высокого гипсометрического положения основной части ледников массива Тургэн, а также высокой средней площади ледников относительно других массивов, оледенение данного района отличается своим более стабильным и инертным состоянием (за период с 1992 г. по 2002 г., общая потеря площади ледников составила 2% (около 0,8 км<sup>2</sup>) (Ганюшкин и др., 2011).

Массив Хархираа находится к югу от массива Тургэн; массивы разделены горным перевалом высотой 2974 метра. Наивысшая точка массива Хархираа – вершина высотой 4037 метров расположена в восточной части. Сам массив обладает формой подковы, раскрытой к юго-западу. Оледенение массива Хархираа схоже с оледенением массива Тургэн по своим основным чертам и масштабу. При помощи дистанционного исследования было определено, что на данный момент на территории массива находится 29 ледников, имеющих общую площадь 33,1 км<sup>2</sup> (Сэр-Од и др., 2012).

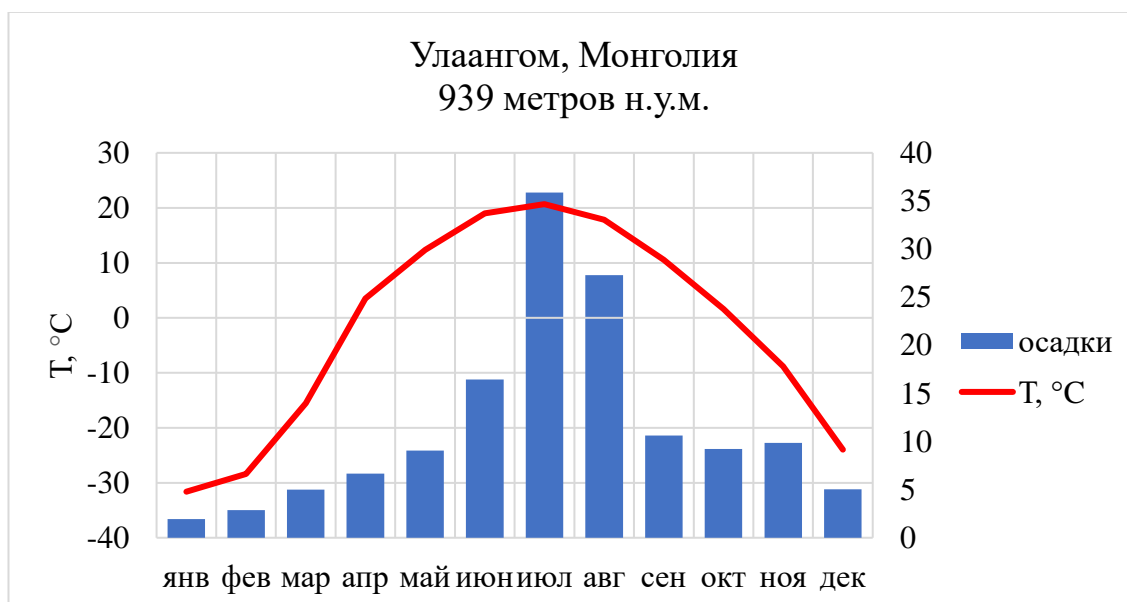


Рис. 6. Климатограмма города Улаангом по данным метеостанции «Улаангом».

Ближайшей к горным массивам метеостанцией стала ГМС «Улаангом» (рисунок 6). Метеостанция находится на высоте 939 метров над уровнем моря, она расположена на расстоянии 75 км от массива Тургэн.

## **Глава 4. Используемые материалы и методы**

Как уже упоминалось ранее, использование методов дистанционного зондирования Земли позволяет оперативно получать некоторые необходимые для исследований характеристики, проводить мониторинг водных объектов, анализ сезонной и годовой динамики, а также осуществлять расчёт таких характеристик, как объём и глубина. Это актуально, в первую очередь, для озёр, расположение которых не позволяет провести полевые исследования (Свирепов, 2021).

Большинство характеристик высокогорных озёр, можно выявить при помощи цветных спутниковых изображений Landsat, Terra, IRS и др. (Коновалов, 2009; Коновалов, Рудаков, 2016). Предварительная обработка спутниковых снимков упрощает процесс поиска озёр, обладающих небольшой площадью.

Использование спутниковых снимков, обладающих высоким разрешением, позволяет оценивать такие характеристики, как положение водного объекта относительно краевых частей ледника, наличие и характер стока из озера, площадь зеркала озера, состояние подпруживающей озеро плотины (на степень опасности прорыва влияет состав перемычки – лёд, морена или скальная порода) (Семакова, Семаков, 2017).

Для выявления расположения горных озёр, а также для определения их характеристик и степени прорывоопасности была использована программа ArcMap 10.8, а также спутниковые снимки Landsat 8-9 OLI/ TIRS от 27.07.2022 для Южно-Чуйского хребта, от 02.08.2019 и 21.07.2022 для массива Цамбагарав (Монголия), от 15.08.2022 для массивов Хархираа и Тургэн (Монголия).

### **4.1. Использование индекса MNDWI**

Дешифрирование водных объектов может проводиться визуально, путём анализа цветных синтезированных изображений, при помощи которых можно детализировать береговую линию объекта. Поскольку водные объекты характеризуются самыми низкими коэффициентами отражения, даже по сравнению с другими природными объектами, обладающими большой

увлажненностью, их выявление возможно при использовании водной маски, которая позволяет определить те пиксели, в которых расположены водные объекты на спутниковом снимке (Катаев, Бекеров, 2017).

Визуальное дешифрирование позволяет выделять озёра в видимом диапазоне на снимках, однако является достаточно трудоёмкой задачей, и для того, чтобы её упростить, используются определенные комбинации каналов спутниковых снимков. Комбинации каналов представляют собой определенные расчётные индексы, с помощью которых можно вычлениить водные объекты на исследуемой территории. Расчёт осуществляется с использованием инструмента «Калькулятор растров» программы ESRI ArcGIS и каналов снимков Landsat, по определенным для каждого индекса формулам. В результате формируются растровые изображения с закодированной информацией, принимающей определенные значения для каждого типа объектов (чаще всего значения находятся в диапазоне от -1 до 1) (Морозова, 2019).

Для выявления водных объектов используются такие индексы, как NDVI (нормализованный вегетационный индекс), NDWI (нормализованный разностный водный индекс), WRI (индекс влагостойкости), NDMI (индекс различий увлажненности), MNDWI (модифицированный нормализованный разностный водный индекс) и др. [1] В данной работе для выявления водных объектов на исследуемых территориях был использован индекс MNDWI, поскольку, согласно (Свирепов, 2021) именно он показал наибольшую эффективность при выявлении горных озёр по сравнению с индексами NDWI и NDVI. Данные индексы показали более высокую чувствительность к изменению влажности и атмосферным воздействиям соответственно.

Расчёт индекса MNDWI проводится при использовании зелёного и коротковолнового инфракрасного каналов. Вода здесь принимает положительный диапазон значений (от 0 до 1) – то есть, при данных значениях пиксель с большой вероятностью принадлежит водному объекту; при этом, ледники принимают значения более 0,45, а затенённые участки склонов – от 0 до 0,02, согласно (Свирепов, 2021).

Индекс рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

*Green* – значения пикселей из зелёного канала, видимое излучение, обладающее длиной волны диапазоном от 0,52 до 0,60 мкм. (Канал Landsat - Band 2).

*SWIR* – значения пикселей из коротковолнового инфракрасного канала, обладающие длиной электромагнитных волн от 2,09 до 2,35 мкм. (Канал Landsat - Band 7) (Морозова, 2019).

Для идентификации водных объектов в данной работе был применён данный индекс, однако, выявление озёр, расположенных вблизи ледника и имеющих малую площадь поверхности, был затруднён, поскольку некоторые озёра принимали значения, совпадающие с затенёнными склонами, краевыми частями ледников, снежниками и т.д. Для того, чтобы избежать большой ошибки при определении площадей, детализация контуров озёр проводилась вручную.

#### **4.2. Дистанционное определение глубины и объёма озера**

В данной работе для оценки прорывной опасности озёр была использована методика, описанная в работе Петракова Д. А. (Петраков, 2008). Вероятность прорыва оценивалась при помощи функции устойчивости плотины озера и результата воздействия внешнего триггера.

Такие параметры, как максимальная глубина и объём озера были оценены в соответствии с методикой, описанной в работе В.Г. Коновалова (Коновалов, 2009; Коновалов, Рудаков, 2016). Данная методика подразумевает определение при помощи данных дистанционного зондирования площади озера, его длины, абсолютной высоты уреза воды у плотины, а также высоту самой плотины. В результате обобщения результатов батиметрических съёмки высокогорных озёр, в работе (Коновалов, 2009) принимались определенные положения: максимальная глубина озера находится вблизи его середины; продольный вертикальный профиль глубины озера от его начала и до подпруживающей

плотины может быть аппроксимирован полуэллипсом, вписанным в прямоугольный треугольник.

Из-за того, что определение глубины водоёма по спутниковым снимкам невозможно, в работе была использована формула, применяемая в работе В. Г. Коновалова (Коновалов, Рудаков, 2016), с помощью которой был рассчитан объём исследуемых озёр:

$$V = a_1 H_{max} + b_1 F + c_1$$

где  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  — коэффициенты, полученные для расчета объема прорывоопасных озёр гляциального генезиса согласно (Коновалов, Рудаков, 2016),  $F$  — площадь озера,  $H_{max}$  — максимальная глубина, которая определяется с помощью выражения:

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

где  $L$  — длина озера,  $H_2$  — высота подпруживающей плотины от подошвы до уреза воды.

### 4.3. Проведение полевых исследований

В качестве материалов для данной работы были также использованы данные полевых исследований, полученные в результате экспедиции, проведенной сотрудниками и студентами СПбГУ в июле 2022 года (озеро «Таможенное», Южно-Чуйский хребет, республика Алтай), а также результаты экспедиции, проведенной студентами СПбГУ в 2019 году (озеро Нурган, горный узел Цамбагарав, долина реки Эрегтийн гол, северо-западная Монголия).

Для получения требуемых характеристик, в ходе полевых исследований проводились следующие работы: выполнялись батиметрические съёмки озёр, а также тахеометрические съёмки прибрежной территории. Помимо этого, проводились наблюдения за уровнем, минерализацией, электропроводностью, температурой воды в озёрах, также были измерены скорости течения воды на водотоках, впадающих в озеро и вытекающих из него, и др.

Батиметрическая съёмка озера «Таможенное» проводилась с надувной вёсельной лодки в рамках полевых исследований 28-го июля 2022 года. Всего было выполнено 1086 пункта измерения. Для регистрации глубин использовался эхолот-картплоттер Garmin 42-cv (Garmin Ltd., USA). По результатам промеров глубин была составлена батиметрическая схема и определялись морфометрические характеристики водоёма.

Построение батиметрических схем выполнялось в картографической программе Surfer (Golden Software Inc., USA) путём формирования гридов методом интерполяции Kriging и Natural Neighbor. Площади озёр определялись в программе ArcMap 10.4.1 (ESRI Inc., USA) вручную. Объёмы озёр рассчитывались автоматически в программе Surfer (инструмент Grid Volume).

Наличие полевых данных позволяет определить точность оценки прорывоопасности озёр с использованием данных дистанционного зондирования, используемой в данной работе, путём сравнения полученных результатов с измеренными характеристиками.

## Глава 5. Результаты дешифрирования про помощи данных дистанционного зондирования

### 5.1. Систематизация приледниковых озёр

В данной работе было выделено суммарно 151 озеро на территории четырёх горных массивов: Цамбагарав, Хархираа, Тургэн (Монголия), а также Южно-Чуйский хребет (Республика Алтай, Россия).

Был составлен список озёр (приложение I), включающий в себя такие параметры, как: площадь озера, его максимальные длина и ширина, рассчитанные значения максимальной глубины и объёма, абсолютная высота уреза воды озера, отношение к леднику, тип стока, каскадность, средний уклон поверхности в пределах 100 метров вокруг озера, сумма баллов, отражающая устойчивость подпруживающей плотины и воздействие внешнего триггера (в соответствии с методикой Д.А.Петракова), а также степень прорывоопасности.

Систематическая ошибка при определении площади объектов вычислялась по формуле (Ганюшкин и др., 2021):

$$A_{er} = \frac{100\% (nm)}{A_{gl}}$$

где  $A_{er}$  – ошибка, %;  $n$  – число пикселей;  $m$  – пространственное разрешение снимка, выраженное в виде площади пикселя,  $m^2$ ;  $A_{gl}$  – площадь объекта,  $m^2$ .

По результатам расчётов с помощью спутниковых снимков, использовавшихся для дешифрирования (Landsat 8-9, панхроматические), средняя ошибка составила – 1,2 %, максимальная – 6,15%

Полученные характеристики по массивам приведены в таблице 1.



| <b>№</b>   | <b>Площадь, м<sup>2</sup></b> | <b>Длина, м</b> | <b>Ширина, м</b> | <b>Максимальная глубина, м</b> | <b>Объём, м<sup>3</sup></b> | <b>Абсолютная высота, м</b> | <b>Положение относительно ледника</b> | <b>Тип стока</b> | <b>Тип плотины</b>     | <b>Каскадность</b> | <b>Уклон долины в пределах 100 метров, °</b> | <b>Кол-во баллов (по методике Д.А. Петракова)</b> | <b>Степень прорывоопасности</b> |
|------------|-------------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------------|--------------------|--|---|---------------------------------|
| <b>T9</b>  | 37 340                        | 262             | 193              | 25                             | 133 405                     | 2956                        | перигляциальное                       | подземный        | морена                 | нет                | 27,4   | 130 / 40  | средняя                         |
| <b>T10</b> | 30 279                        | 258             | 188              | 18,5                           | 113 905                     | 3054                        | прогляциальное                        | подземный        | морена с ледяным ядром | да                 | 13,8   | 210 / 30  | высокая                         |
| <b>T11</b> | 88 625                        | 598             | 242              | 21,5                           | 221 287                     | 2885                        | прогляциальное                        | поверхностный    | морена с ледяным ядром | да                 | 16,4   | 160 / 30  | высокая                         |
| <b>T12</b> | 14 438                        | 165             | 124              | 13                             | 51 582                      | 3140                        | прогляциальное                        | подземный        | морена с ледяным ядром | нет                | 14,6   | 210 / 30  | высокая                         |
| <b>T13</b> | 32 619                        | 432             | 105              | 13                             | 116 538                     | 2845                        | экстрагляциальное                     | подземный        | морена                 | да                 | 29,6   | 130 / 40  | средняя                         |

*Таблица 1. Фрагмент таблицы с характеристиками озёр массива Тургэн по результатам дешифрирования и балльной оценки (приложение I).*

## Массив Цамбагарав

На территории горного массива Цамбагарав по балльной методике оценки прорывоопасности было рассмотрено 12 озёр, среди которых 11 имеют среднюю степень прорывоопасности, а одно – высокую. Исследуемые озёра расположены в высотном диапазоне от 2800 до 3300 метров над уровнем моря. Большая часть озёр (66%) находятся выше 3000 метров.

Таблица 2. Сводная таблица исследуемых озёр массива Цамбагарав.

| Устойчивость плотины и воздействие внешнего триггера | Характеристика                                    | % озёр массива |
|--|---|----------------|
| Тип плотины  | морена  | 50% (6)        |
|  | морена с ледяным ядром                            | 50% (6)        |
| Высота низшей точки плотины над урезом               | >10 м   | 0%             |
|  | 1-10 м  | 100% (12)      |
| Отношение ширины плотины к её высоте                 | >0,5  | 92% (11)       |
|  | 0,2-0,5   | 8% (1)         |
| Характер стока через плотину                         | сток через морену по руслу с отмошкой             | 66% (8)        |
|  | фильтрация через морену                           | 33% (4)        |
| Объём озера  | 0-50 тыс. м <sup>3</sup>                          | 0%             |
|  | 50-100 тыс. м <sup>3</sup>                        | 25% (3)        |
|  | 100 тыс. м <sup>3</sup> – 500 тыс. м <sup>3</sup> | 75% (9)        |
|  | 500 тыс. м <sup>3</sup> – 1 млн. м <sup>3</sup>   | 0%             |
| Экстремальная жара/дожди                             | ливень после продолжительной жары                 | 100% (12)      |

Средняя площадь озёр массива составила 52,9 тыс. м<sup>2</sup>, средний объём – 189,2 тыс. м<sup>3</sup>. Среди озёр массива были выделены объекты, не имеющие связи с ледником (экстрагляциальные) – 4 озера, а также перигляциальные, у которых расстояние до ледника составляет менее двух километров – таких озёр на территории массива насчитывается 8. Преобладают озёра с поверхностным стоком, дамбы сложены моренным материалом и моренным материалом с ледяным ядром, 5 озёр массива являются каскадными.

## Массив Хархираа

На территории массива Хархираа было выделено 28 озёр, среди которых 4 имеют высокую степень прорывоопасности, остальные 24 озера – среднюю степень. Озёра расположены на высоте от 2750 до 3480 метров над уровнем моря. Средняя высота уреза воды озёр массива – 3000 метров. Среднее значение площади изучаемых водных объектов составило 71,5 тыс. м<sup>2</sup>, среднее значение объёма – 255,5 тыс. м<sup>3</sup>.

Таблица 3. Сводная таблица исследуемых озёр массива Хархираа.

| Устойчивость плотины и воздействие внешнего триггера              | Характеристика                                    | % озёр массива |
|---|---|----------------|
| Тип плотины   | морена  | 89% (25)       |
|   | морена с ледяным ядром                            | 11% (3)        |
| Высота низшей точки плотины над урезом                            | <1 м  | 89% (25)       |
|   | 1-10 м  | 11% (3)        |
| Отношение ширины плотины к её высоте                              | >0,5  | 93% (26)       |
|   | 0,2-0,5   | 7% (2)         |
| Характер стока через плотину                                      | сток через морену по руслу с отмошкой             | 43% (12)       |
|   | фильтрация через морену                           | 57% (16)       |
| Объём озера   | 0-50 тыс. м <sup>3</sup>                          | 11% (3)        |
|   | 50-100 тыс. м <sup>3</sup>                        | 25% (7)        |
|   | 100 тыс. м <sup>3</sup> – 500 тыс. м <sup>3</sup> | 53% (15)       |
|   | 500 тыс. м <sup>3</sup> – 1 млн. м <sup>3</sup>   | 11% (3)        |
| Экстремальная жара/дожди  | ливень после продолжительной жары                 | 100% (28)      |
| Волны из-за ледяных и каменных лавин, оползней и откола айсбергов | волны ниже плотины                                | 4% (1)         |

Среди озёр было выделено 20 экстрагляциальных водоёмов, 7 перигляциальных, и одно прогляциальное озеро, граничащее с ледником и расположенное в его краевой зоне. 12 озёр массива Хархираа обладают поверхностным стоком, для остальных - сток осуществляется путём фильтрации

через морену. Дамба исследуемых водоёмов также сложена моренным материалом, а также моренным материалом с ледяным ядром.

### Массив Тургэн

На территории массива Тургэн из 15 исследуемых озёр 5 обладают высокой степенью прорывоопасности, остальные имеют среднюю степень. Озёра массива находятся в высотном диапазоне от 2800 метров до 3150 метров над уровнем моря, средняя высота составляет 2952 метра. Средняя площадь озёр массива Тургэн составляет 50,2 тыс. м<sup>2</sup>, в то время как среднее значение объёма составило 185,9 тыс. м<sup>3</sup>.

Таблица 4. Сводная таблица исследуемых озёр массива Тургэн.

| Устойчивость плотины и воздействие внешнего триггера              | Характеристика                                    | % озёр массива |
|---|---|----------------|
| Тип плотины   | морена  | 67% (10)       |
|   | морена с ледяным ядром                            | 33% (5)        |
| Высота низшей точки плотины над урезом                            | <1 м  | 20% (3)        |
|   | 1-10 м  | 80% (12)       |
| Отношение ширины плотины к её высоте                              | >0,5  | 94% (14)       |
|   | 0,2-0,5   | 6% (1)         |
| Характер стока через плотину                                      | сток через морену по руслу с отмошкой             | 40% (6)        |
|   | фильтрация через морену                           | 60% (9)        |
| Объём озера   | 0-50 тыс. м <sup>3</sup>                          | 0%             |
|   | 50-100 тыс. м <sup>3</sup>                        | 13% (2)        |
|   | 100 тыс. м <sup>3</sup> – 500 тыс. м <sup>3</sup> | 86% (13)       |
|   | 500 тыс. м <sup>3</sup> – 1 млн. м <sup>3</sup>   | 0%             |
| Экстремальная жара/дожди  | ливень после продолжительной жары                 | 100% (15)      |
| Волны из-за ледяных и каменных лавин, оползней и откола айсбергов | волны ниже плотины                                | 20% (3)        |

Среди изучаемых водных объектов на территории массива было выделено 6 перигляциальных, 6 экстрагляциальных и 3 прогляциальных озера. Сток из 8

из 15 озёр осуществляется путём фильтрации через морену, для остальных характерен поверхностный характер стока. Плотины сложены преимущественно моренным материалом, больше половины озёр массива – каскадные.

#### Южно-Чуйский хребет

На территории Южно-Чуйского хребта было выявлено 96 озёр, из них 29 обладают высокой степенью прорывной опасности. Озёра Южно-Чуйского хребта находятся на высоте от 2270 до 3200 метров над уровнем моря, средняя высота составляет 2800 метров.

Таблица 5. Сводная таблица исследуемых озёр Южно-Чуйского хребта.

| Устойчивость плотины и воздействие внешнего триггера              | Характеристика                                    | % озёр массива |
|---|---|----------------|
| Тип плотины   | морена  | 64% (61)       |
|   | морена с ледяным ядром                            | 36% (35)       |
| Высота низшей точки плотины над урезом                            | >10 м   | 1% (1)         |
|   | 1-10 м  | 98% (94)       |
|   | <1 м  | 1% (1)         |
| Отношение ширины плотины к её высоте                              | >0,5  | 92% (92)       |
|   | 0,2-0,5   | 4% (4)         |
| Характер стока через плотину                                      | сток через морену по руслу с отмошкой             | 35% (34)       |
|   | фильтрация через морену                           | 65% (62)       |
| Объём озера   | 0-50 тыс. м <sup>3</sup>                          | 14% (13)       |
|   | 50-100 тыс. м <sup>3</sup>                        | 24% (23)       |
|   | 100 тыс. м <sup>3</sup> – 500 тыс. м <sup>3</sup> | 54% (52)       |
|   | 500 тыс. м <sup>3</sup> – 1 млн. м <sup>3</sup>   | 4% (4)         |
|   | >1 млн. м <sup>3</sup>                            | 4% (4)         |
| Экстремальная жара/дожди  | ливень после продолжительной жары                 | 100% (96)      |
| Волны из-за ледяных и каменных лавин, оползней и откола айсбергов | волны ниже плотины                                | 4% (4)         |

Среди всех изучаемых водных объектов было выделено 43 перигляциальных, 45 экстрагляциальных и 8 прогляциальных озёр. Среднее значение площади исследуемых озёр составляет 62,9 тыс. м<sup>2</sup>, среднее значение объёма – 224,7 тыс. м<sup>3</sup>. Для большей части озёр (64%) характерен подземный сток. Воздействие экстремальных температур и осадков характерно для района исследования – для аридных регионов свойственен ливневый тип осадков, которые выпадают преимущественно в летний период, что совпадает с пиком таяния ледников.

Выполненный анализ показал, что для изучаемых озёр характерны плотины, в основном сложенные моренным материалом – такие дамбы являются неустойчивыми к размыву. Многие озёра расположены вблизи краевых частей ледников, а также имеют подземный сток, эти факторы указывают также на возможность их прорыва. Наибольшую опасность представляют озёра, площадь зеркала, а также объём которых значительно увеличивался за последние годы; недавно возникшие горные водоёмы также обладают риском прорыва.

Для того, чтобы оценить динамику изменения площадей поверхности озёр, были рассмотрены некоторые озёра исследуемых массивов, обладающие преимущественно высокой степенью прорывной опасности, определенной методом балльной оценки, поскольку именно эти озера несут наибольшую угрозу прорыва, к тому же, их площадь достаточно сильно изменяется в течение выбранного промежутка времени, в отличие от площади озёр, которым была присвоена средняя степень прорывоопасности. Были отобраны спутниковые снимки начиная с 1999-2000 годов по настоящее время – более ранние изображения не обладают достаточным разрешением и качеством для корректной идентификации водоёмов.

## **5.2. Изменения площади поверхности прорывоопасных озёр**

Объём воды является важным параметром при оценке прорывоопасности озёр. Однако, при использовании методов дистанционного зондирования он определяется с большой ошибкой. К примеру, в работе (Распутина и др., 2021) максимальная ошибка при оценке площадей водной поверхности не превышала

20% от реальных значений, в то время как рассчитанный по используемой методике объём исследуемых озёр превышал значения, полученные по данным, полученным в результате проведения батиметрических съёмки практически в 3 раза. Это связано с невозможностью определения средних глубин водоёмов по спутниковым снимкам.

Исходя из этого было принято решение рассмотреть в качестве дополнения и усовершенствования существующей методики оценки прорывоопасности такой параметр как скорость приращения (изменения) площади озера.

Изменения площади зеркала озера во времени были оценены путём сравнения разновременных снимков Landsat. Спутниковые снимки находятся в свободном для скачивания доступе на портале геологической службы США (USGS) [2]. В работе использовались снимки спутников Landsat 7 ETM+, Landsat 8-9 OLI, а также Landsat Legacy ETM+ Pan для снимков 1999 - 2002 годов.

Данные спутниковые снимки состоят из различных каналов многозональных изображений, имеющих разрешение 30 метров, спутник Landsat ETM+ и Landsat 8-9 OLI/ TIRS C2 L1 имеет также панхроматический канал, пространственное разрешение которого составляет 15 метров. Спутниковые снимки были подобраны за летний период (июль – август) для того, чтобы оценить размеры озёр в период максимальной абляции ледника.

### **5.2.1. Горные массивы Хархираа и Тургэн.**

Размеры озёр, расположенных на территории массивов Хархираа и Тургэн были определены при помощи следующих разновременных спутниковых снимков (таблица 6):

Таблица 6. Используемые спутниковые снимки Landsat для массивов Хархираа и Тургэн.

| №  | Дата       | Спутник         | №   | Дата       | Спутник         |
|----|------------|-----------------|-----|------------|-----------------|
| 1. | 27-08-2000 | ETM+ Pan        | 8.  | 27-08-2015 | Landsat 8-9 OLI |
| 2. | 08-08-2002 | ETM+ Pan        | 9.  | 28-07-2016 | Landsat 8-9 OLI |
| 3. | 12-08-2004 | Landsat 4-5     | 10. | 17-08-2017 | Landsat 8-9 OLI |
| 4. | 15-08-2005 | Landsat 4-5     | 11. | 11-07-2018 | Landsat 8-9 OLI |
| 5. | 07-08-2008 | Landsat 7       | 12. | 30-07-2019 | Landsat 8-9 OLI |
| 6. | 19-08-2010 | Landsat 7       | 13. | 01-08-2020 | Landsat 8-9 OLI |
| 7. | 20-08-2013 | Landsat 8-9 OLI | 14. | 15-08-2022 | Landsat 8-9 OLI |

В качестве изучаемого объекта было выбрано озеро, имеющее высокую степень прорывоопасности по балльному методу оценки (номер в таблице X24).

На рис. 7 изображены контуры озера №X24, выделенные разными цветами в зависимости от года на примере 2000, 2010, 2017 и 2022 годов.

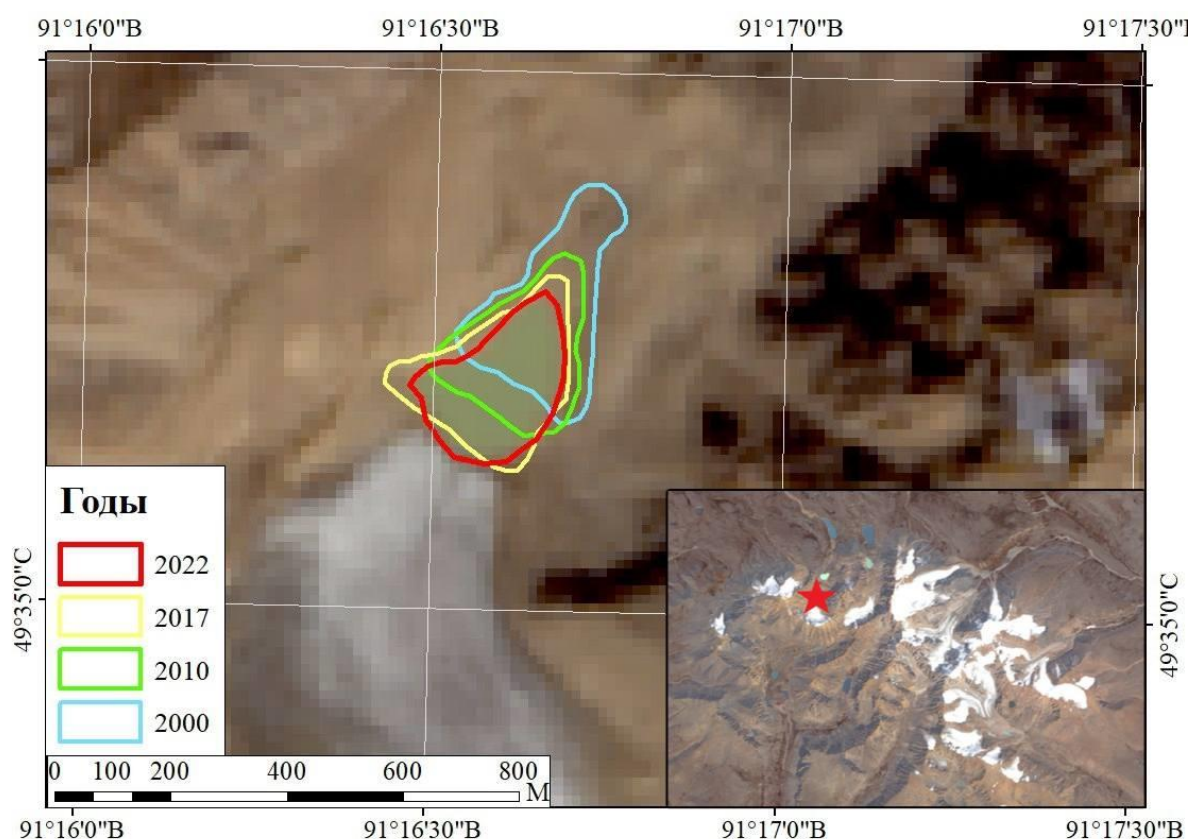


Рис. 7. Изменение площади озера №X24 в период с 2000 по 2022 г.



Озеро расположено в западной части массива Хархираа, оно является прогляциальным – граничит с ледником. В ходе изучения спутниковых снимков было выявлено, что положение данного озера изменяется в пространстве с течением времени – оно «следует» за ледником по мере его отступления. Это может быть обусловлено характером рельефа – вероятнее всего, ледник, примыкающий к данному озеру, лежит в котловине, которая углубляется с отступанием ледника, а озеро, соответственно, продвигается вслед за ним. Площади озера №Х24 за выбранные года представлены в таблице 7.

Таблица 7. Изменение площади зеркала озера №Х24 массива Хархираа по спутниковым снимкам Landsat.

| Изменение площади зеркала озера № Х24, кв. м. |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Годы  | 2000   | 2002   | 2004   | 2005   | 2008   | 2010   | 2013   |
| Площадь                                       | 56 390 | 50 907 | 45 584 | 53 204 | 55 024 | 49 622 | 44 871 |
| Годы  | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   | 2022   |
| Площадь                                       | 45 947 | 51 936 | 57 285 | 50 941 | 43 089 | 48 186 | 47 436 |

На рисунке 8 отображен график, построенный на основе данных из таблицы 7, где приведено изменение площади зеркала озера №Х24 в период с 2000 по 2022 г.

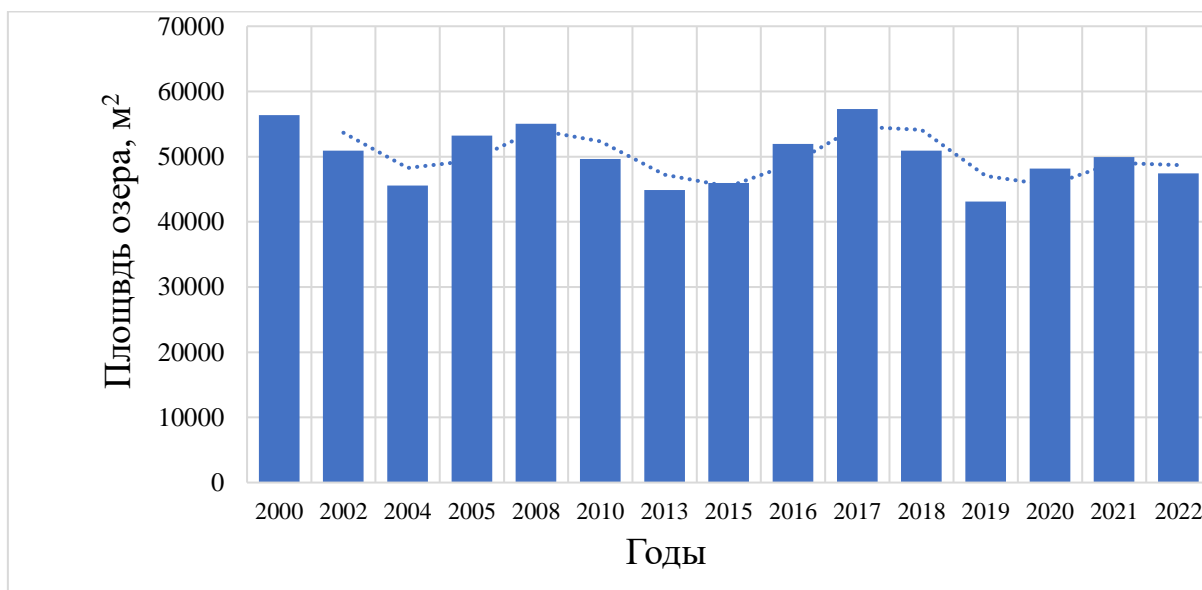


Рис. 8. График изменения площади озера №Х24.

Для данного водного объекта характерен циклический ход площади – на графике можно выделить два периода (с 2004 по 2013 и с 2015 по 2019 года), в течение которых можно наблюдать постепенное увеличение размеров озера, до достижения максимальных значений а 2008 и 2018 годах, после чего озеро начинало уменьшаться. Таким образом, в 2004 году размер озера № X24 составил 80,8% от своей первоначальной площади, уменьшаясь на 10% каждые 2 года. К 2008 году озеро вновь увеличилось на 20% по сравнению с 2004 годом; в 2017 году площадь зеркала озера достигла максимального зафиксированного значения, увеличившись на 27% по сравнению с 2013 годом. К 2022 году озеро №X24 теряет 15,8% своей изначальной площади. В среднем площадь озера изменяется на 7,7% в год.

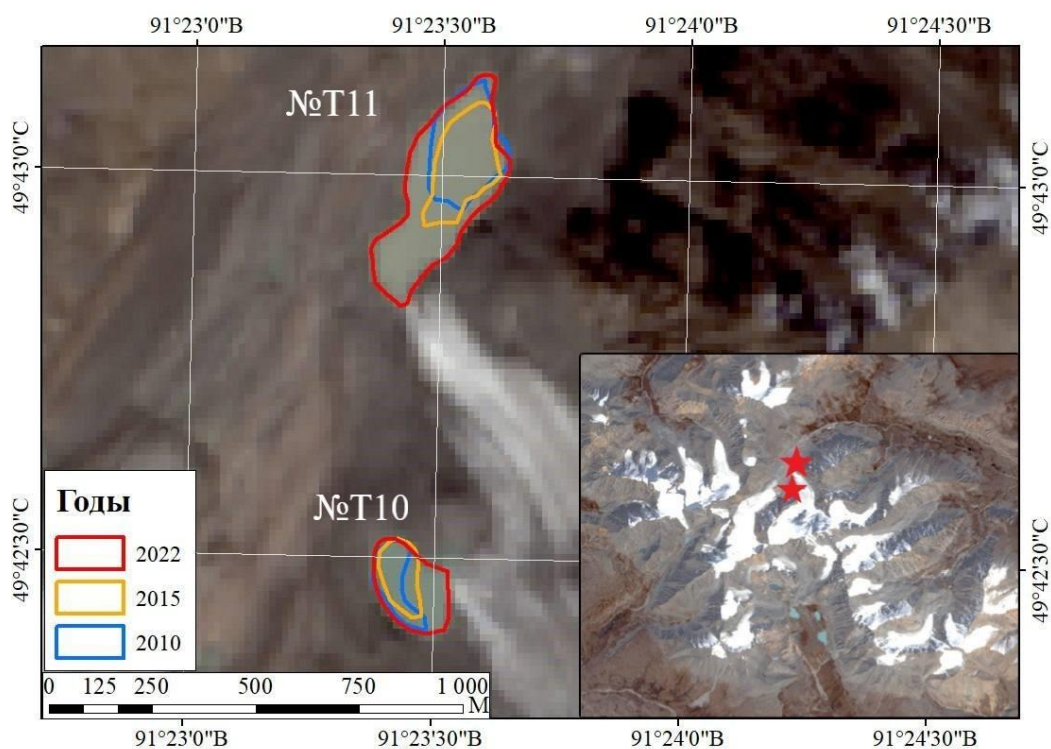


Рис. 9. Изменение площадей озёр №Т11, Т10 с 2010 по 2022 гг.

Выбранные озёра (рисунок 9) расположены на территории массива Тургэн, они имеют также высокую степень прорывоопасности. Озёра № Т11, Т10 являются прогляциальными, их формирование произошло в период с 2006-2008 год, однако из-за низкого качества спутниковых изображений за этот период, а также помех в виде облаков, определение площади их поверхностей за эти года

оказалось невозможным, вследствие чего в качестве первого снимка было использовано изображение 2010 года (табл. 8).

Таблица 8. Динамика площади зеркала озёр № Т11, Т10 массива Тургэн по спутниковым снимкам Landsat.

| Изменение площадей озёр № Т11, Т10, кв. м. |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Годы                                       | 2010  | 2013  | 2015  | 2016  | 2017  | 2019  | 2020  | 2022  |
| Оз. Т11                                    | 40447 | 33848 | 33648 | 60059 | 61516 | 53563 | 66113 | 88625 |
| Оз. Т10                                    | 13411 | 7059  | 13960 | 24469 | 22634 | 7661  | 16971 | 30279 |

Ниже изображены графики, построенные на основе данных из таблицы 4 (рисунки 10, 11). Площади озёр № Т11, Т10 увеличиваются в течение исследуемого периода из-за абляции ледника, граничащего с ними, поскольку оба озера не имеют поверхностного стока.

Озеро №Т11 уменьшается на 17% в период с 2010 по 2015 года, после чего, в 2017 году, его площадь увеличивается на 78% в 2016 году. Максимальное значение площади зеркала озера №Т11 было зафиксировано в 2022 году, в настоящее время озеро увеличилось более чем в 2 раза по сравнению с 2010 годом. Площадь данного озера ежегодно изменяется в среднем на 18,5%.

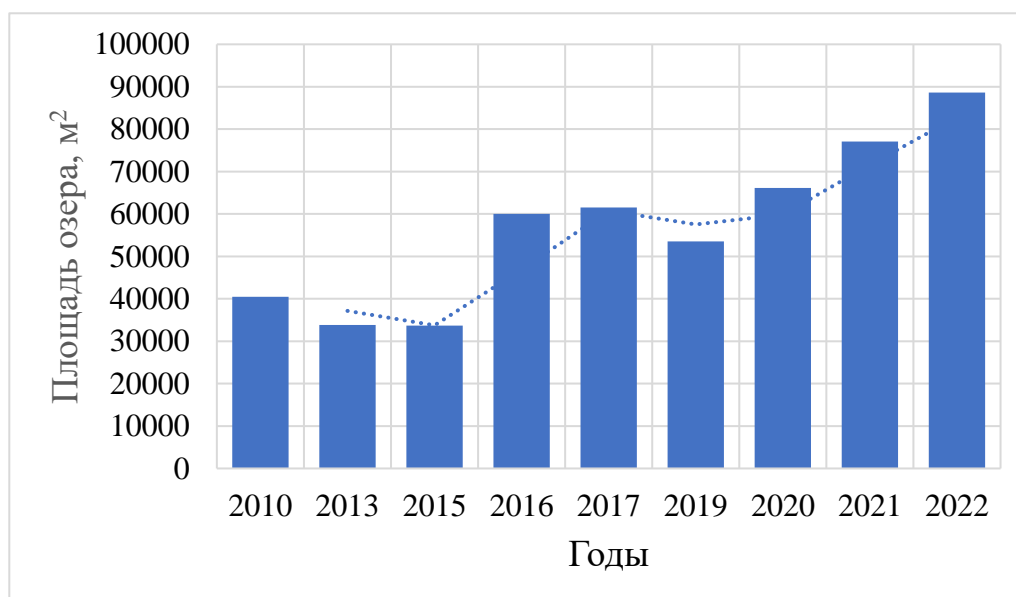


Рис. 10. График изменения площади озера №Т11.

Для озера №Т10 в 2019 году было зафиксировано резкое уменьшение площади – сначала, в период с 2013 по 2016 года площадь зеркала данного озера

возросла в 3,5 раза, после чего, в 2019 году, оно потеряло 70% своей площади. В то же время, площадь зеркала озера №Т11, расположенного ниже, в 2020 году увеличилась, следовательно, можно предположить, что в 2019-2020 г. произошёл перелив части объёма воды в озеро №Т11.

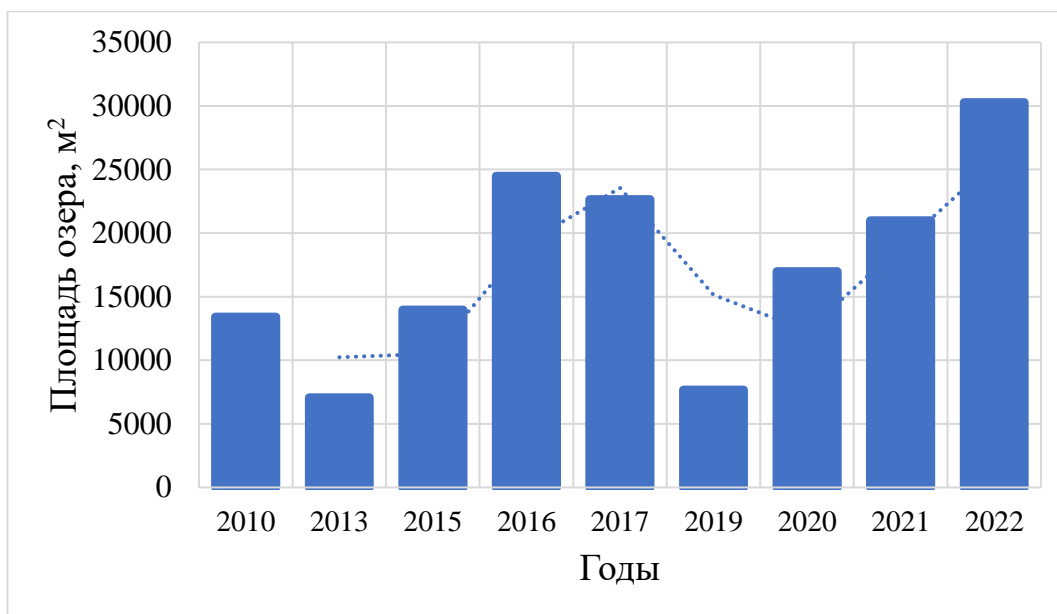


Рис. 11. График изменения площади озера №Т10.

Начиная с 2019 года по настоящее время (2022 год) площадь озера №Т10 (рисунок 11) увеличивается ежегодно на 20-30%, таким образом, в период с 2010 по 2022 года озеро увеличилось в 2 раза. Площадь озера №Т10 изменялась в среднем на 46,2% ежегодно.

Озеро №Т12 (рисунок 12) также расположено на территории массива Тургэн, оно граничит с ледником, а также «следует» за ним по мере его отступления.

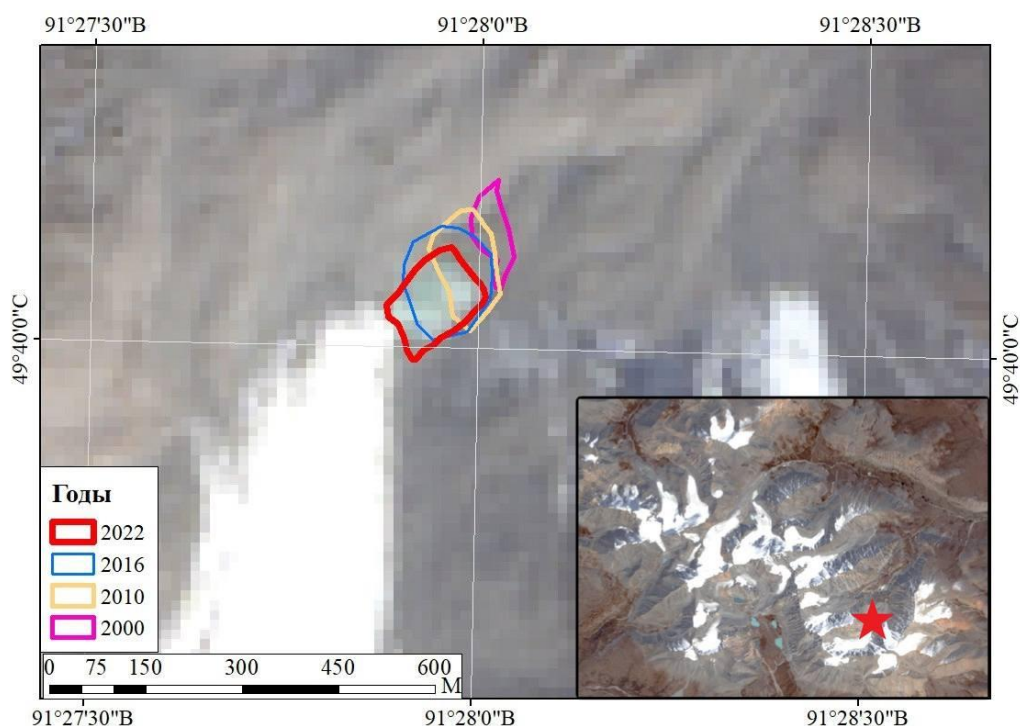


Рис. 12. Изменение площади озера № Т12 с 2000 по 2022 гг.

Изменение площади озера № Т12 отображено в таблице 9.

Таблица 9. Изменение площади зеркала озера № Т12 массива Тургэн по спутниковым снимкам Landsat.

| Изменение площади зеркала озера № Т12, кв. м. |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Годы  | 2000  | 2002  | 2004  | 2005  | 2010  | 2013  |
| Площадь                                       | 5825  | 8741  | 9519  | 11325 | 13236 | 16111 |
| Годы  | 2016  | 2017  | 2019  | 2020  | 2021  | 2022  |
| Площадь                                       | 18649 | 15312 | 16314 | 14225 | 13972 | 14834 |

На основе данных из таблицы 9 был построен график (рисунок 13) изменения площади озера № Т12 в период с 2000 по 2022 год. Озеро постепенно увеличивалось с 2000 по 2016 год, площадь его поверхности за 16 лет возросла более чем в 3 раза, после чего, в период с 2017 по 2022 года, озеро № Т12 стало уменьшаться (по сравнению с 2016 годом оно уменьшилось на 20%. Ежегодно площадь озера изменялась в среднем на 9,7% в год.

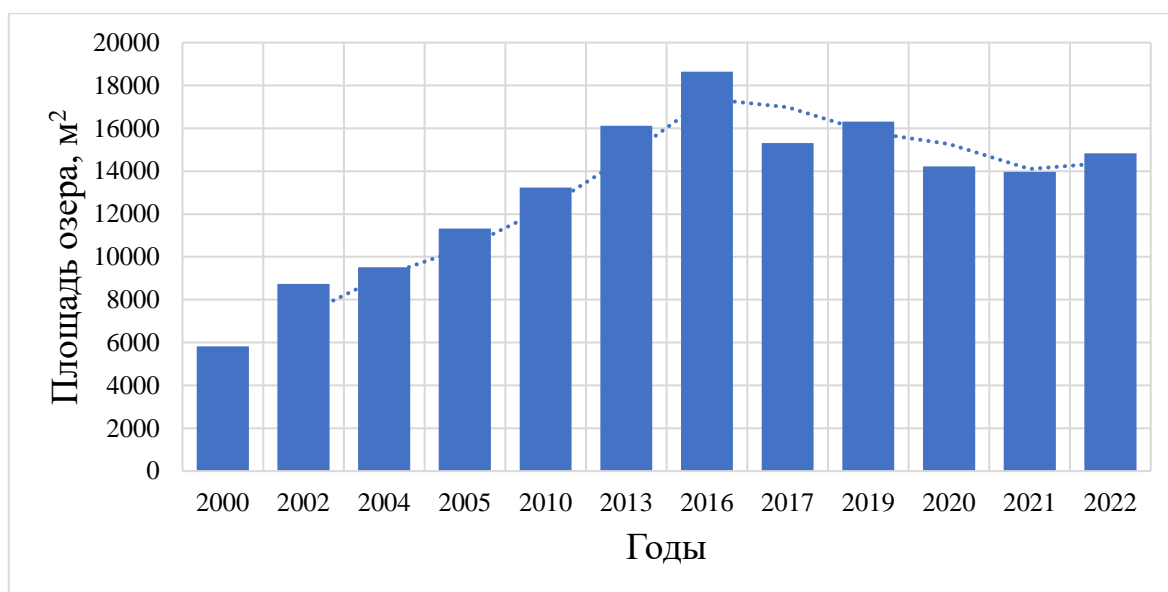


Рис. 13. График изменения площади озера № Т12

### 5.2.2. Горный массив Цамбагарав.

Для оценки площадей выбранных озёр горного массива Цамбагарав были использованы спутниковые снимки (таблица 10) за период с 2000 по 2022 года.

Таблица 10. Используемые спутниковые снимки Landsat для массива Цамбагарав.

| №  | Дата       | Спутник     | №   | Дата       | Спутник         |
|----|------------|-------------|-----|------------|-----------------|
| 1. | 27-08-2000 | ETM+ Pan    | 7.  | 10-08-2015 | Landsat 8-9 OLI |
| 2. | 08-08-2002 | ETM+ Pan    | 8.  | 15-07-2017 | Landsat 8-9 OLI |
| 3. | 12-08-2004 | Landsat 4-5 | 9.  | 11-07-2018 | Landsat 8-9 OLI |
| 4. | 26-07-2006 | Landsat 4-5 | 10. | 30-07-2019 | Landsat 8-9 OLI |
| 5. | 06-07-2008 | Landsat 7   | 11. | 01-08-2020 | Landsat 8-9 OLI |
| 6. | 05-07-2010 | Landsat 7   | 12. | 15-08-2022 | Landsat 8-9 OLI |

Среди озёр массива было выбрано озеро, имеющее высокую степень прорывоопасности по балльному методу оценки (номер в таблице №Ц11).

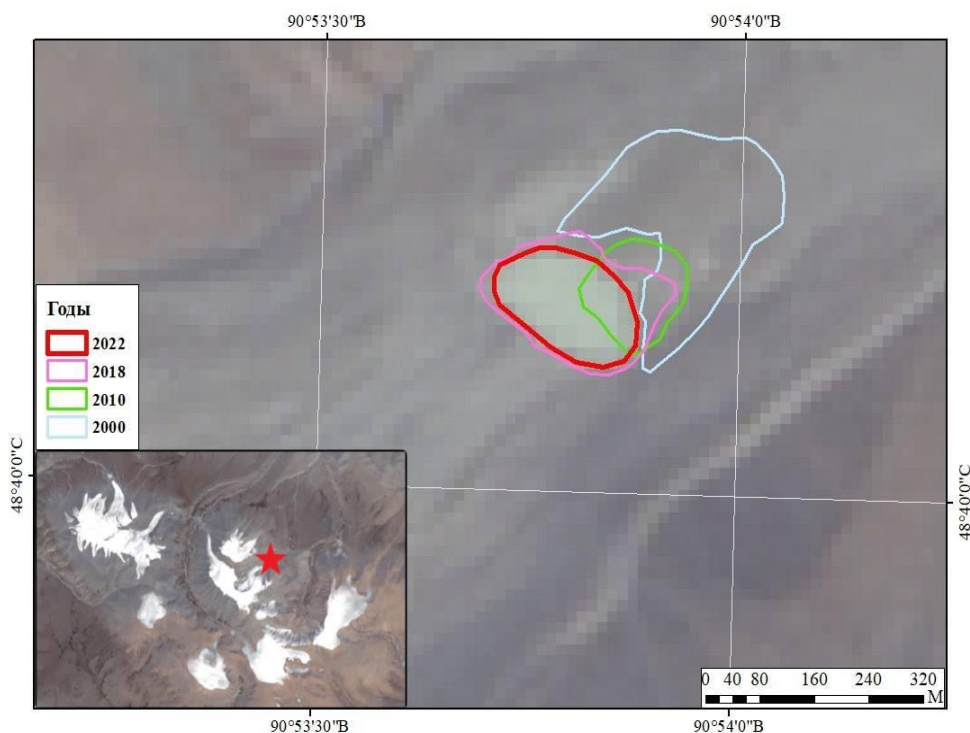


Рис. 14. Изменение площади озера №Ц11 с 2000 по 2022 гг.

Изменение площади озера №Ц11 представлено в таблице 11.

Таблица 11. Изменение площади зеркала озера №Ц11 массива Цамбагарав по спутниковым снимкам Landsat.

| Изменение площади зеркала озера № Ц11, кв. м. |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Годы  | 2000   | 2002   | 2004   | 2006   | 2008   | 2010   |
| Площадь                                       | 53 567 | 46 369 | 47 219 | 53 714 | 31 852 | 16 981 |
| Годы  | 2013   | 2017   | 2018   | 2019   | 2021   | 2022   |
| Площадь                                       | 31 590 | 35 219 | 34 796 | 27 493 | 21 336 | 20 869 |

Данное озеро до 2013 года являлось прогляциальным, после чего, в результате отступления ледника, начало терять с ним связь, и, в настоящий момент расположено на расстоянии в 300 метров от него.

Размер озера уменьшался до 2010 года, потеряв 70% своей площади, после чего увеличивался до 2017 года, в этот период площадь озера возрастает в 2 раза; к 2022 году размер озера вновь стал уменьшаться по мере отступления ледника – в период с 2017 по настоящее время озеро ежегодно теряет до 20% своей

площади. Размер озера ежегодно изменяется в среднем на 11,4%. На графике (рисунок 15) приведены данные изменения площади зеркала озера № Ц11.

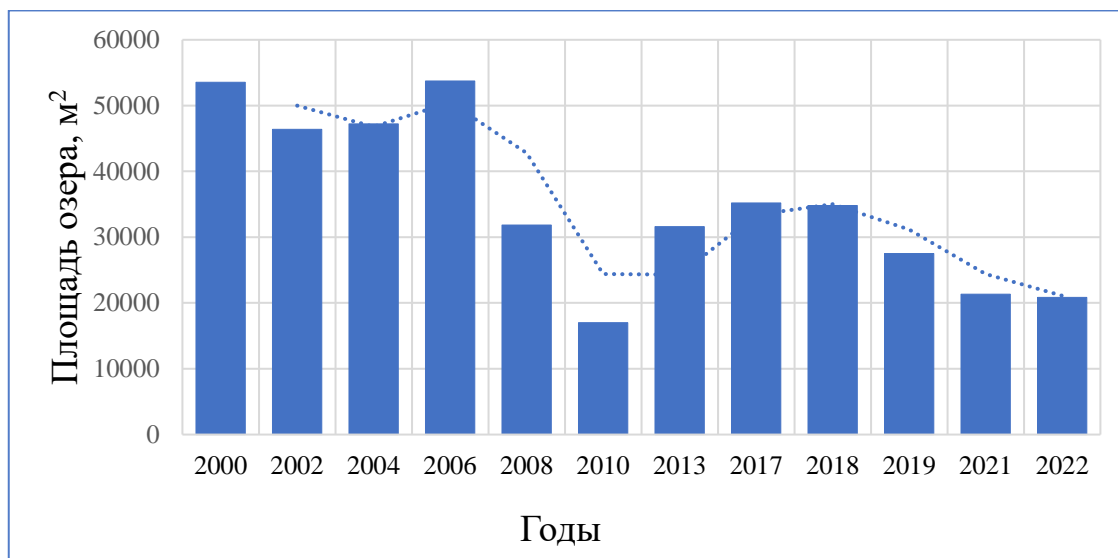


Рис. 15. График изменения площади озера № Ц11

Озеро Нурган (№Ц1), расположенное в северо-западной части массива Цамбагарав, имеет среднюю степень опасности прорыва по методике Д.А. Петракова. Как упоминалось ранее, озеро является перигляциальным и расположено на расстоянии 210 метров от ледника.

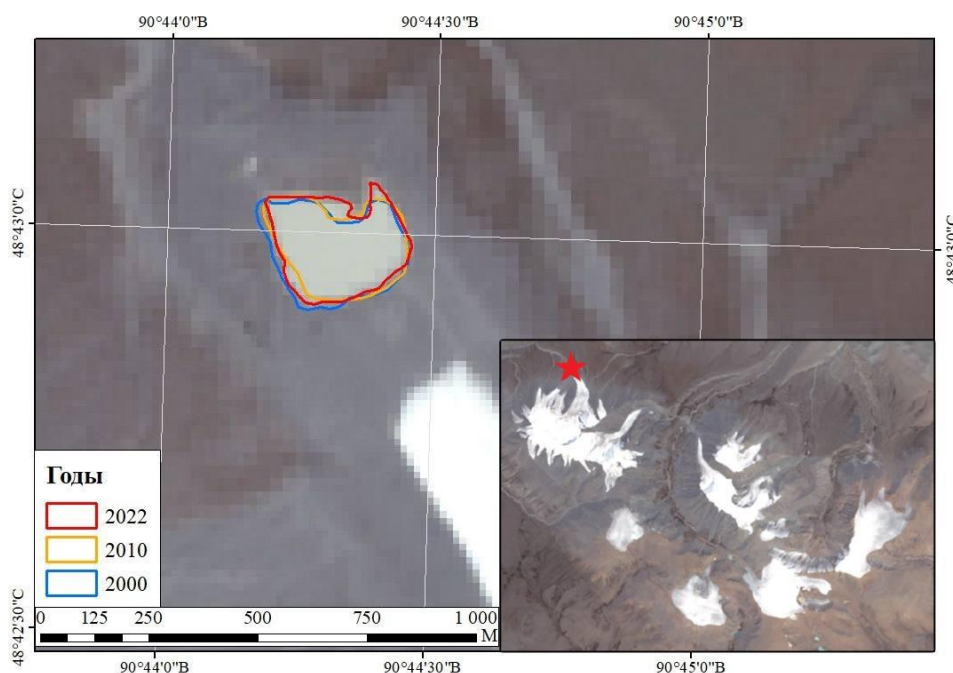


Рис. 16. Изменение площади озера Нурган.



Изменение площади зеркала озера Нурган в период с 2000 по 2022 показано в таблице 12 и рисунке 17.

Таблица 12. Изменение площади зеркала озера Нурган по спутниковым снимкам Landsat.

| Изменение площади зеркала озера Нурган, кв. м. |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Годы   | 2000   | 2002   | 2004   | 2006   | 2008   | 2010   | 2013   |
| Площадь  | 62 342 | 63 411 | 61 747 | 60 842 | 62 516 | 60 346 | 60 332 |
| Годы   | 2015   | 2017   | 2018   | 2020   | 2021   | 2022   |        |
| Площадь  | 59 362 | 60 552 | 62 140 | 60 229 | 59 252 | 59 978 |        |

Площадь зеркала озера Нурган уменьшается в исследуемый период, также присутствуют небольшие колебания в изменении площади в течение всего периода. Само озеро с 2000 года уменьшилось на 4%, а ежегодно его площадь изменялась в среднем на 1,2%. Исходя из низкого разрешения спутникового изображения можно сделать вывод о том, что озеро относительно стабильно.

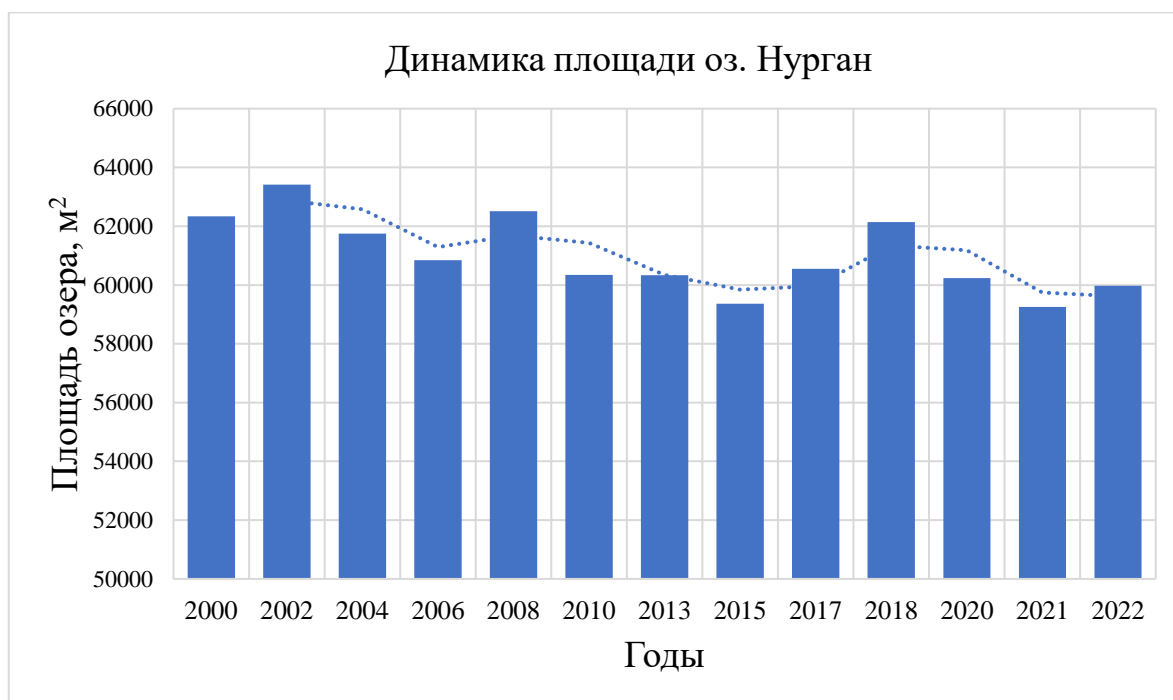


Рис. 17. График изменения площади озера Нурган.

### 5.2.3. Южно-Чуйский хребет.

Для рассмотрения изменения площадей озёр Южно-Чуйского хребта в исследуемый период были использованы следующие спутниковые снимки (таблица 13).

Таблица 13. Используемые спутниковые снимки Landsat для Южно-Чуйского хребта.

| №  | Дата       | Спутник         | №   | Дата       | Спутник         |
|----|------------|-----------------|-----|------------|-----------------|
| 1. | 17-10-1999 | ETM+ Pan        | 6.  | 11-08-2016 | Landsat 8-9 OLI |
| 2. | 22-07-2000 | ETM+ Pan        | 7.  | 14-08-2017 | Landsat 7       |
| 3. | 08-08-2009 | Landsat 7       | 8.  | 04-08-2019 | Landsat 7       |
| 4. | 21-07-2014 | Landsat 8-9 OLI | 9.  | 09-08-2021 | Landsat 8-9 OLI |
| 5. | 08-07-2015 | Landsat 8-9 OLI | 10. | 27-07-2022 | Landsat 8-9 OLI |

В качестве объектов исследования были выбраны озёра, имеющие высокую и среднюю степени прорывоопасности.

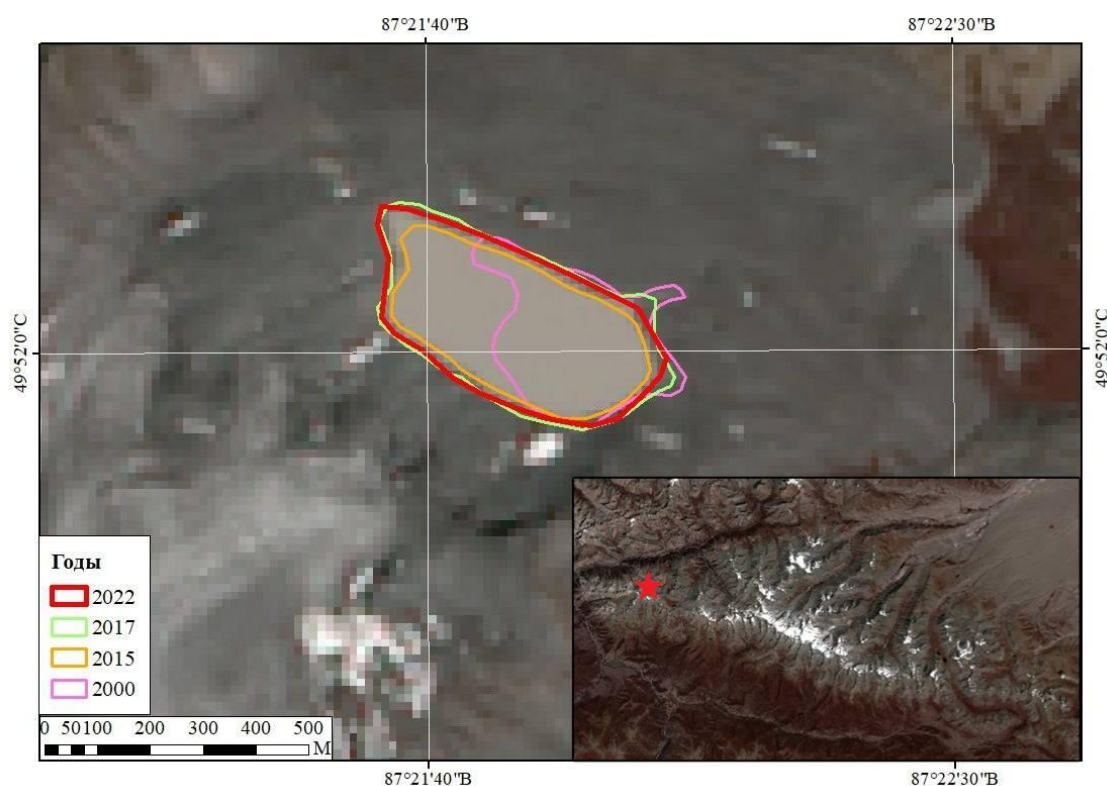


Рис. 18. Изменение площади озера №4.

Озеро № Ч4 расположено в западной части Южно-Чуйского хребта (рисунок 18), оно является перигляциальным и расположено на расстоянии 150 метров от ледника. Изменение его площади в период с 1999 по 2022 гг. зафиксировано в таблице 14.

*Таблица 14. Изменение площади зеркала озера № Ч4 (Южно-Чуйский хребет) по спутниковым снимкам Landsat.*

| Изменение площади зеркала озера № Ч4, кв. м. |         |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Годы   | 1999    | 2000    | 2007    | 2008    | 2009    | 2014    |
| Площадь                                      | 87 581  | 82 192  | 87 257  | 129 636 | 139 786 | 114 602 |
| Годы   | 2015    | 2016    | 2017    | 2019    | 2021    | 2022    |
| Площадь                                      | 106 743 | 131 963 | 144 485 | 124 494 | 132 994 | 136 149 |

На рисунке 19 построен график изменения площади зеркала озера № Ч4. В период с 1999 по 2009 площадь поверхности озера увеличилась на 60%, далее, до 2015 года озеро потеряло 23% своей площади. Максимальное зафиксированное значение площади поверхности данного озера было в 2017 году; в период с 2019 по 2022 года озеро увеличивалось в размерах, ежегодно прибавляя около 5% своей площади. Таким образом, озеро № Ч4 в 2022 году увеличилось на 55% по сравнению с его состоянием на 1999 год.

Увеличение площади поверхности данного озера связано с отступанием ледника. До 2016 года озеро примыкало к леднику, после чего, в результате интенсивной абляции, ледник отступил и площадь зеркала озера увеличилась. Ежегодно площадь озера изменяется в среднем на 10,9%.

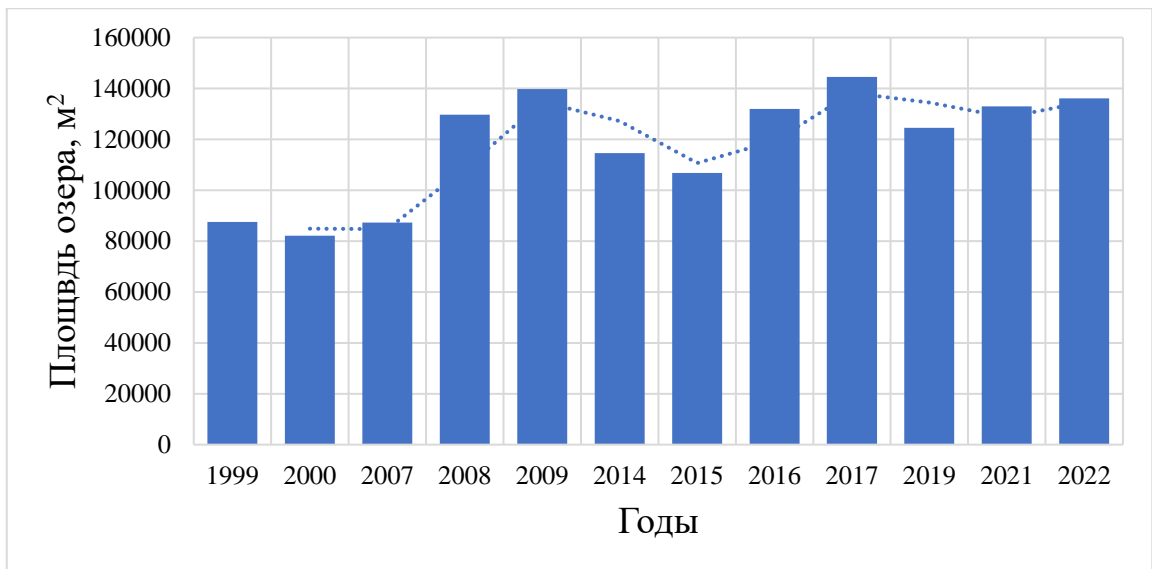


Рис. 19. График динамики площади озера № 44.

Озеро №478 находится в восточной части Южно-Чуйского хребта (рисунок 20), оно расположено на расстоянии 150 метров от ледника и является перигляциальным.

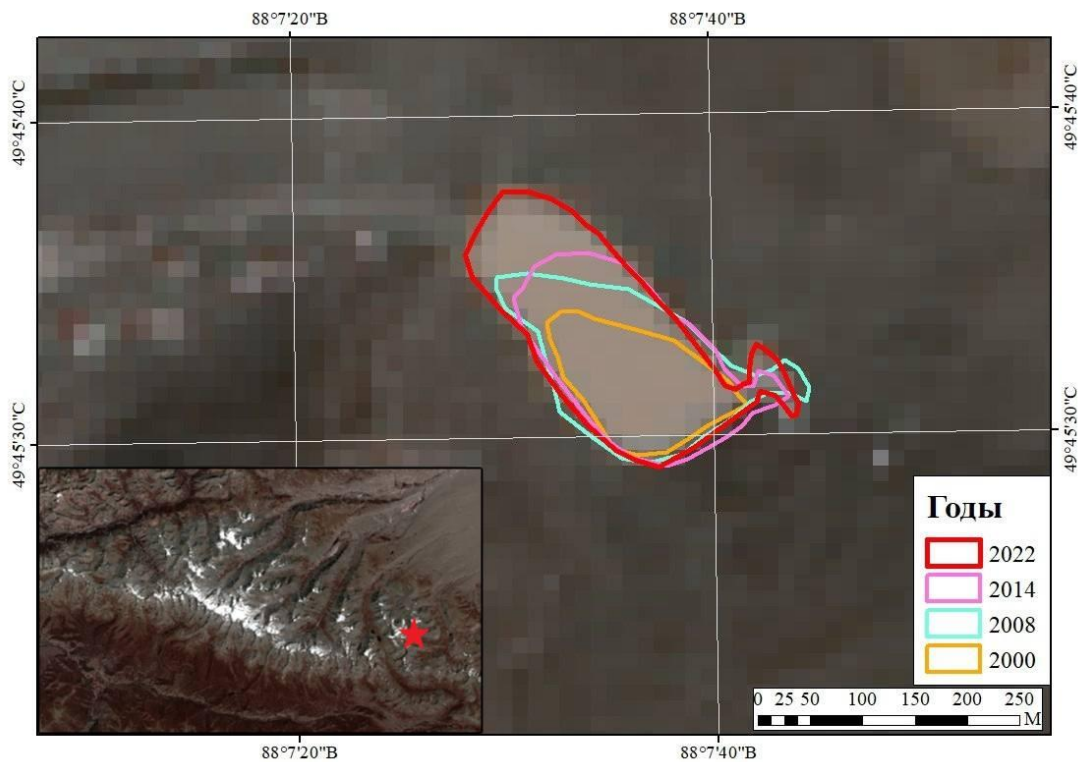


Рис. 20. Изменение площади озера № 478.

Изменение площади зеркала озера № 478 отражено в таблице 15 и рисунке 21.

Таблица 15. Изменение площади зеркала озера № 478 (Южно-Чуйский хребет) по спутниковым снимкам Landsat.

| Изменение площади зеркала озера № 478, кв. м. |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Годы  | 1999   | 2000   | 2008   | 2009   | 2014   |
| Площадь                                       | 15 681 | 15 324 | 27 087 | 24 123 | 28 287 |
| Годы  | 2015   | 2017   | 2019   | 2021   | 2022   |
| Площадь                                       | 32 275 | 34 722 | 32 387 | 39 970 | 36 609 |

Площадь озера № 478 увеличивается в период с 1999 по 2022 года, что связано с таянием ледника. Максимальное зафиксированное значение площади поверхности данного озера пришлось на 2021 год. В 2022 году размер озера № 478 превысил значение 1999 года более чем в 2 раза. Площадь озера ежегодно изменяется на 7,5% в среднем.

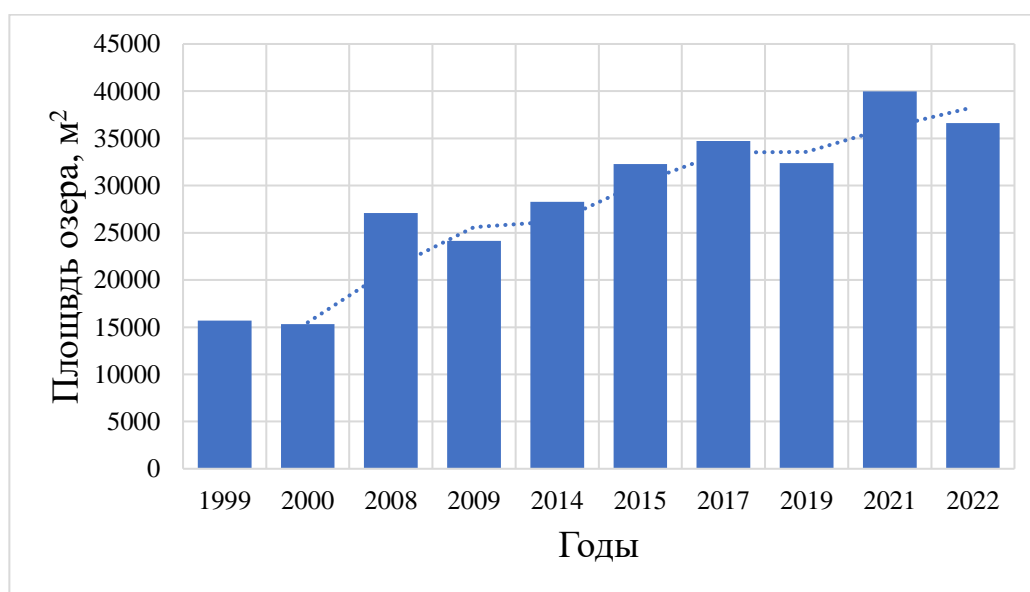


Рис. 21. График изменения площади озера № 478.

Озеро «Таможенное» (№449), расположенное в центральной части Южно-Чуйского хребта (рисунок 22), также было рассмотрено в ходе изучения изменения площадей зеркал водных объектов во времени. В ходе полевых исследований 2022 года было определено, что озеро имеет среднюю степень прорывоопасности.

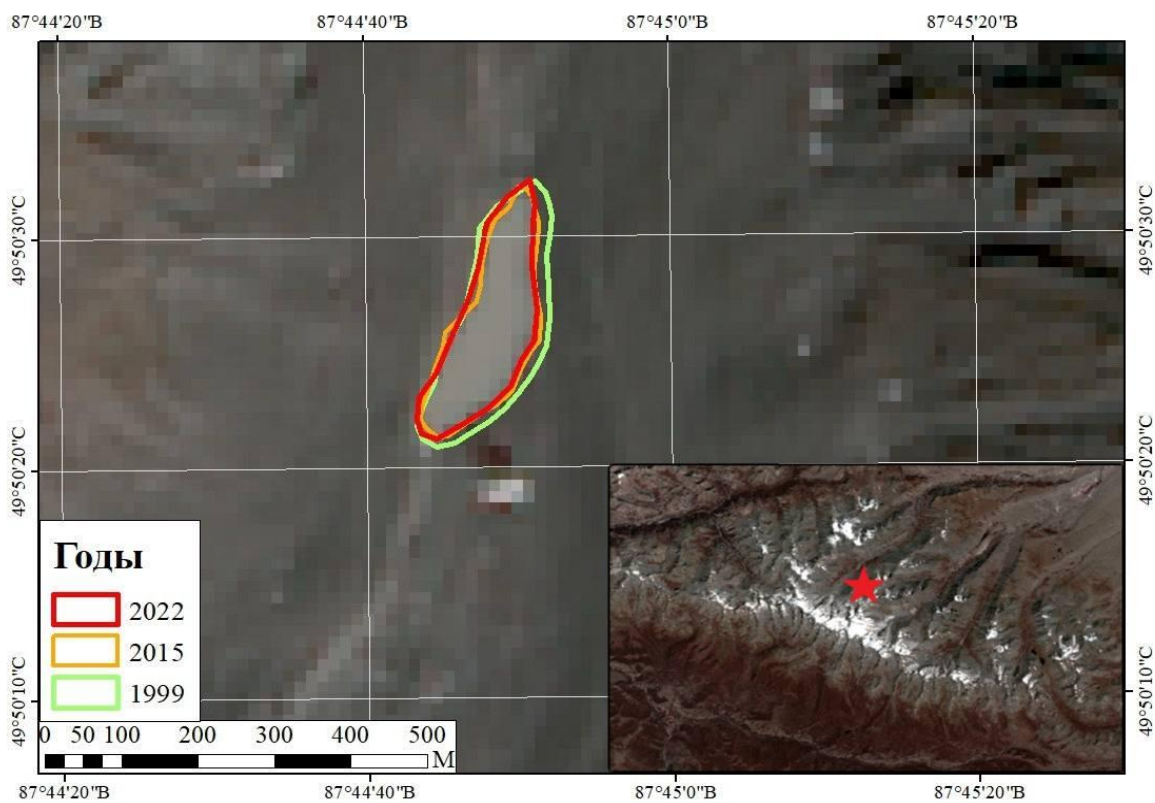


Рис. 22. Изменение площади озера «Таможенное».

Ход площади зеркала озера «Таможенное» отражен в таблице 16 и рисунке 23.



Рис. 23. График изменения площади озера «Таможенное».

Таблица 16. Изменение площади зеркала озера «Таможенное» (Южно-Чуйский хребет) по спутниковым снимкам Landsat.

| Изменение площади зеркала озера «Таможенное», кв. м. |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Годы   | 1999   | 2000   | 2007   | 2009   | 2014   |
| Площадь  | 34 328 | 29 713 | 29 092 | 27 821 | 26 209 |
| Годы   | 2015   | 2019   | 2021   | 2022   |        |
| Площадь  | 26 688 | 26 760 | 26 862 | 26 733 |        |

Площадь поверхности озера «Таможенное» уменьшается в течение всего периода исследования (с 1999 по 2022 года), с 1999 года озеро уменьшилось на 22,1%. В среднем, ежегодно площадь зеркала изменялась на 2,5%.

Ниже представлена сводная таблица (таблица 17), отражающая максимальную и минимальную зафиксированную площадь выбранных для рассмотрения озёр, их площади за 2000 и 2022 года (начало и конец изменений, для озёр №Т11 и №Т10 площади указаны за 2010 год), размах площадей выбранных озёр (максимальное за весь исследуемый период зафиксированное значение в сравнении с минимальным, выраженное в процентах), а также значение площадей озёр за 2022 год в сравнении с 2000 годом.

Таблица 17. Сводная таблица площадей выбранных озёр.

| Озеро (№ в таблице)       | Площадь за 2000 год, м | Площадь за 2022 год, м | Мин. площадь, м     | Макс. площадь, м     | Размах площадей, % | Изменение площади по сравнению с 2000 г, % |
|---------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--|
| X24                       | 56 390                 | 47 436                 | 44 871<br>(2013 г.) | 57 285<br>(2017 г.)  | 127%               | 84%  |
| T11                       | 40 447                 | 88 625                 | 33 648<br>(2015 г.) | 88 625<br>(2022 г.)  | 263%               | 219%                                       |
| T10                       | 13 411                 | 30 279                 | 7 059<br>(2013 г.)  | 30 279<br>(2022 г.)  | 428%               | 225%                                       |
| T12                       | 5 825                  | 14 834                 | 5 825<br>(2000 г.)  | 18 649<br>(2016 г.)  | 320%               | 254%                                       |
| Ц11                       | 53 567                 | 20 869                 | 16 981<br>(2010 г.) | 53 714<br>(2000 г.)  | 316%               | 39%  |
| Ц1<br>(оз. Нурган)        | 62 342                 | 59 978                 | 59 252<br>(2021 г.) | 63 411<br>(2002 г.)  | 107%               | 96%  |
| Ч4                        | 82 192                 | 136 149                | 82 192<br>(2000 г.) | 139 786<br>(2009 г.) | 170%               | 165%                                       |
| Ч78                       | 15 324                 | 36 609                 | 15 324<br>(2000 г.) | 39 970<br>(2021 г.)  | 260%               | 238%                                       |
| Ч49 (оз.<br>«Таможенное») | 29 713                 | 26 733                 | 26 209<br>(2014 г.) | 29 713<br>(2000 г.)  | 113%               | 90%  |

Для большинства исследованных озёр характерен рост площади с течением времени, что может свидетельствовать об увеличении их прорывоопасности. Существуют озёра, которые теряют связь с ледником, за счёт чего сокращается их площадь; также есть озёра, сохраняющие связь с ледником посредством ручьёв, однако, эта связь в перспективе может прерваться из-за дегляциации.

Помимо этого, в процессе исследования были выявлены озёра (№X24, №T12, №Ц11), которые «следуют» за ледником по мере его отступления. Оценка прорывоопасности таких озёр очень сложна, поскольку их смещение может быть обусловлено особенностями рельефа – ледник, питающий такие озёра, вероятно, лежит в понижении, и, при его отступании, озеро продвигается за ним. Такие



озёра могут визуально сокращать свою площадь, однако, их глубина и объём могут расти, что определить по данным дистанционного зондирования невозможно.

### **5.3. Варианты по улучшению существующей методики**

В связи с тем, что существующая методика оценки прорывоопасности озёр не позволяет объективно оценить некоторые параметры водоёма (например, объём) при помощи данных дистанционного зондирования, было принято решение внести определённые дополнения на основе тех критериев, которые возможно с наибольшей точностью визуально оценить при помощи спутниковых снимков.

В качестве критерия для обновлённой методики было выбрано «изменение процентного соотношения площадей озёр во времени» – данный критерий предлагается использовать вместо критерия объёма. Изменение площадей исследуемых озёр происходило неравномерно в течение выбранного периода, поэтому для того, чтобы провести сравнение, был взят средний процент ежегодного приращения площади. Таким образом, озёра, процент ежегодного приращения площадей которых больше, изменяются сильнее, следовательно, их можно считать более прорывоопасными. Однако, данный параметр возможно использовать только для озёр, которые расположены в понижениях рельефа и не меняют своего положения – для таких озёр можно предполагать, что изменение их площади поверхности соответствует изменению объёма, в отличие от озёр, «следующих» за ледником, упомянутых выше.

Для дальнейшей разработки нового критерия был рассчитан (таблица 18) средний ежегодный процент изменения (приращения) площадей выбранных озёр за исследуемый промежуток времени (с 2000 по 2022 года).

Таблица 18. Средний процент ежегодного изменения площадей выбранных озёр.

| Озеро (№ в таблице)    | Средний % ежегодного изменения площади |
|------------------------|--|
| T11                    | 18,5% (30 баллов)                      |
| T10                    | 46,2% (30 баллов)                      |
| Ч4                     | 10,9% (20 баллов)                      |
| Ч78                    | 7,5% (20 баллов)                       |
| Ч49 (оз. «Таможенное») | 2,5% (10 баллов)                       |
| Ц1 (оз. Нурган)        | 1,2% (10 баллов)                       |

Исходя из процентов ежегодного изменения площади исследуемых озёр была разработана следующая градация – площадь поверхности озера ежегодно изменяется на 1-5% - 10 баллов, 5-15% - 20 баллов, более 15% - 30 баллов.

Также дополнительно в рамках оценки прорывоопасности было рассмотрено расстояние от исследуемого объекта до ледника – поскольку максимальная динамика наблюдается у озёр, которые граничат с ледником или находятся вблизи него. По состоянию на 2022 год расстояние от выбранных для исследования озёр до ледника представлено в таблице 19.

Таблица 19. Расстояние от озера до ледника.

| Озеро (№ в таблице)    | Расстояние до ледника, м |
|------------------------|--------------------------|
| T11                    | 0 (30 баллов)            |
| T10                    | 0 (30 баллов)            |
| Ч4                     | 205 (20 баллов)          |
| Ч78                    | 150 (20 баллов)          |
| Ч49 (оз. «Таможенное») | 830 (20 баллов)          |
| Ц1 (оз. Нурган)        | 210 (20 баллов)          |

Данный фактор также предлагается рассмотреть в виде дополнительного критерия в обновленной методике. Так, для озёр, которые граничат с ледником (расстояние от 0 до 100 метров) предлагается дополнительно добавлять 30 баллов; если расстояние до ледника составляет от 100 м до 1 км - 20 баллов, от 1 до 2 км - 10 баллов. «Расстояние до ледника» предлагается внести как дополнительный критерий внешнего триггера, тем самым сдвинув границы прорывоопасности на 30 баллов по оси у.

Помимо этого, для исследуемых озёр при помощи Цифровой модели рельефа SRTM был рассчитан средний уклон долины вокруг озера в пределах 100 метров. В оригинальной методике Д.А. Петракова воздействие возможных обвалов в озеро в качестве внешнего триггера оценивается качественно, в обновлённой методике, в свою очередь, предлагается ввести количественное обоснование данного критерия. Чем больше рассчитанный средний уклон долины вокруг озера, тем выше вероятность обвалов, которые могут выступать в качестве триггерного механизма к прорыву водоёма.

Путём анализа полученных данных об уклоне долины в пределах ста метров для 151 объекта, было выявлено, что средние значения уклона, превышающие 25°, являются выбросами. Таким образом, если средний уклон долины превышал 25 градусов – объекту дополнительно присваивалось 10 баллов за внешний триггер из-за возможности возникновения склоновых процессов, способных привести к обвалам в озеро.

#### **5.4. Результаты**

В целом, оценка прорывоопасности приледниковых озёр представляет собой комплексный подход к анализу различных факторов, включая географические, климатические и др. Важно проводить её регулярно и вести мониторинг состояния ледников и окружающей местности, чтобы своевременно обнаруживать потенциальные угрозы и принимать меры по их предотвращению.

Как уже было сказано ранее, критерий, оценивающий изменение площади зеркала озера, был введён из-за того, что используемый в методике объём воды рассчитывается с большой ошибкой, что может негативно повлиять на объективность дальнейшей оценки. Изменение площади оценивалось в период с 1999-2000 по 2022 год, поскольку более ранние снимки на исследуемой территории не обладали подходящим разрешением и качеством изображения.

Так, в соответствии с обновлённой методикой оценки прорывоопасности с изменёнными критериями – заменой критерия «объём озера» на «средний процент ежегодного изменения площади озера», а также добавлением критерия

«расстояние до ледника», сумма баллов, оценивающая устойчивость плотины и воздействие внешнего триггера составила следующие значения (таблица 20):

Таблица 20. Сравнение количества баллов, полученных в результате использования методики Д.А. Петракова с количеством баллов по обновлённой методике.

| Озеро (№ в таблице)    | Кол-во баллов по методике Петракова | Кол-во баллов по обновленной методике |
|------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| T11                    | 160 / 30                            | 180 / 60                              |
| T10                    | 210 / 30                            | 230 / 60                              |
| Ч4                     | 170 / 30                            | 170 / 50                              |
| Ч78                    | 170 / 30                            | 170 / 50                              |
| Ч49 (оз. «Таможенное») | 110 / 30                            | 100 / 40                              |
| Ц1 (оз. Нурган)        | 120 / 30                            | 110 / 40                              |

Таким образом, графическое представление оценки степени прорывоопасности для выбранных озёр в соответствии с балльной методикой Д.А. Петракова и обновлённой методикой следующее (рисунок 24):

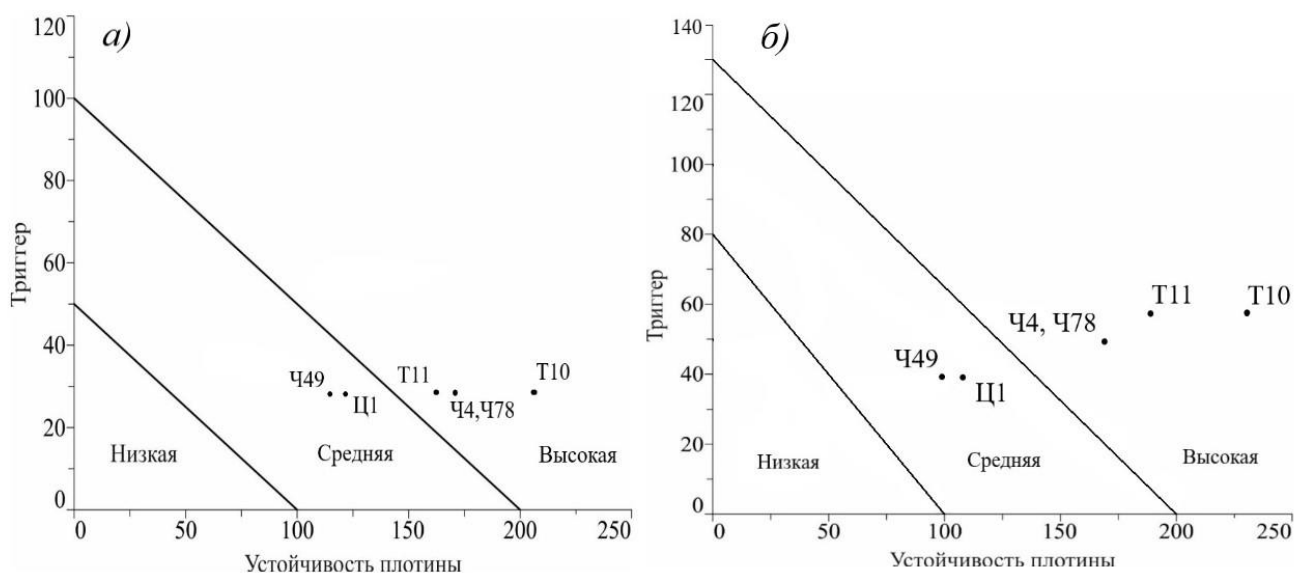


Рис. 24. Графическое представление оценки прорывоопасности выбранных озёр в соответствии с: а) методикой Д.А. Петракова б) обновлённой методикой

Поскольку критерий ежегодного изменения площади озера был введен вместо критерия объёма, ему было присвоено равноценное количество баллов в

общей методике (10-30 баллов в зависимости от скорости приращения). Такое количество баллов, как правило, не может сильно повлиять на изменение общей степени прорывоопасности водоёма, ведь остальные критерии в методике (к примеру, тип подпруживающей плотины, её высота относительно поверхности озера и др.) оцениваются бóльшим количеством баллов. Именно поэтому сама степень прорывоопасности выбранных водоёмов не изменилась при вводе дополнительных критериев.

Благодаря новым введённым критериям, суммарное количество баллов за устойчивость плотины для больших озёр, которые не являются прорывоопасными объектами и практически не изменяются в размере в течение многих лет, будет меньше в сравнении с оригинальной методикой, в то время как для малых озёр, расположенных в непосредственной близости от ледника, площадь которых интенсивно изменяется каждый год, сумма баллов, оценивающих уровень опасности прорыва, будет расти.

## **Глава 6. Сравнение данных дешифрирования с полевыми данными на примере озёр «Таможенное» и Нурган**

### **Озеро «Таможенное».**

Озеро «Таможенное», расположенное в центральной части Южно-Чуйского хребта, относится к бывшим приледниковым водоёмам и является перигляциальным, поскольку оно находится на расстоянии 830 метров от ледника Некрасова. Питание данного озера в основном осуществляется талыми водами ледника, сток из озера «Таможенное» осуществляется в расположенное ниже озеро, которому было дано название «Билли».

В результате полевых исследований 2022 года были получены такие морфометрические характеристики озера «Таможенное», как: площадь зеркала озера, объем воды, длина, ширина, средняя и максимальная глубина озера, и др. Было выявлено, что береговая линия озера «Таможенное» изрезана не сильно, а берега озера везде достаточно крутые, кроме юго-восточной части водоёма. Длина озера «Таможенное» составляет 362 метра, максимальная ширина находится в центральной части озера и составляет 110 метров. Район наибольших глубин находится в северной и южной частях водоёма. Гребень моренной перемычки, подпруживающей озеро «Билли» и, соответственно, озеро «Таможенное», выше настоящего уровня воды озера на 25 м. Заполнение озёрной чаши на такой уровень практически невозможно в настоящее время.

По результатам полевых наблюдений было установлено, что моренная перемычка, подпруживающая озеро, достаточно высокая и широкая. При увеличении объёма водной массы может произойти увеличение диаметров фильтрационных каналов, которые находятся внутри моренной перемычки и теле каменного глетчера, по которым может произойти спуск озера, но без разрушения плотины.

Максимальная зарегистрированная глубина озера «Таможенное» достигает 6.15 м в северной части озера, средняя глубина равна 1,95 м. Площадь

озера на момент проведения батиметрической съёмки составила 25 314 м<sup>2</sup> при соответствующем объёме водной массы 49 581 м<sup>3</sup>.

Согласно полученным полевым данным, устойчивость перемычки к размыву по методике, описанной в работе (Петраков, 2008) составляет 100 баллов (20 – плотина состоит из моренного материала, 10 – высота низшей точки плотины расположена выше 10 м от уреза воды, 0 – отношение ширины плотины к её высоте больше 0.5, 60 – отток воды из озера осуществляется в результате фильтрации, 10 – объём озёр меньше 100 тыс. м<sup>3</sup>), а воздействие внешнего фактора было оценено в 30 баллов (30 – ливень после продолжительной жары). Согласно методу балльной оценки озеро относится к категории водоёмов, обладающих средней вероятностью прорыва.

Для оценки прорывоопасности данного озера с помощью данных дистанционного зондирования был использован спутниковый снимок Landsat от 27.07.2022 и Цифровая модель рельефа SRTM, а также программа ArcMap 10.4.1. Использование цифровой модели рельефа (ЦМР) было необходимо для определения высотных отметок уреза воды озёр над уровнем моря. Цифровая модель рельефа SRTM имеет разрешение 30 метров.

С помощью визуального дешифрирования были получены такие характеристики, как тип плотины и характер стока через плотину. Плотина озера «Таможенное» состоит из моренного материала, сток осуществляется путем фильтрации через морену. Площадь зеркала водного объекта составила 26 733 м<sup>2</sup>. Длина и ширина озера составили 368 и 101 метров соответственно.

При помощи методики (Коновалов, Рудаков, 2016), были рассчитаны остальные характеристики: максимальная рассчитанная глубина оз. «Таможенное» - 9,9 метров, рассчитанный объём озера – 75 480 м<sup>3</sup>.

Исходя из данных, полученных в результате оценки озера дистанционным методом, устойчивость перемычки к размыву составила 100 баллов, что относится к средней вероятности прорыва. Характеристики озера были оценены следующим образом: 20 баллов - плотина состоит из моренного материала, 10 - высота низшей точки плотины расположена выше 10 метров от уреза воды, 0 –

отношение ширины плотины к её высоте больше 0.5, 60 – отток воды из озера осуществляется в результате фильтрации, 10 – объём озёр меньше 100 тыс. м<sup>3</sup>), а воздействие внешнего фактора было оценено в 30 баллов (30 – ливень после продолжительной жары).

Таблица 21. Сравнение полевых и дистанционных данных, полученных для озера «Таможенное».

|                               | Площадь,<br>м <sup>2</sup> | Длина, м | Ширина, м | Макс.<br>глубина, м | Объём,<br>м <sup>3</sup> | Устойчиво<br>сть, баллы | Внеш.<br>Триггер,<br>баллы | Степень |
|-------------------------------|----------------------------|----------|-----------|---------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------|
| Полевые                       | 25314                      | 362      | 110       | 6,15                | 49581                    | 100                     | 30                         | средняя |
| Дистанц.                      | 26733                      | 381      | 119       | 9,9                 | 75480                    | 100                     | 30                         | средняя |
| % от<br>реального<br>значения | 105%                       | 105%     | 108%      | 161%                | 152%                     |                         |                            |         |

Таким образом (таблица 21), для озера «Таможенное», площадь, определенная по спутниковому изображению, составила 106% от реального значения, длина и ширина озера – 101% и 92% соответственно. Объём озера, рассчитанный дистанционно составил 152% от реального объёма.

#### Озеро Нурган

Озеро Нурган также относится к бывшим приледниковым водоёмам, является перигляциальным – находится на расстоянии 210 метров от ледника Эрегтийн. Связь с ледником осуществляется посредством многочисленных ручьёв, наличие которых было зафиксировано в ходе полевых работ 2018 года. Озеро Нурган обладает ледниковым питанием, дождевое питание незначительно. Его прорыв может произойти в весенне-летний период из-за увеличения объемов воды. Для получения морфометрических характеристик озера Нурган были использованы материалы исследования (Боронина и др., 2019).

По результатам батиметрической съёмки, выполненной 4-го августа 2019 года, площадь акватории водоёма оценена величиной 62 140 м<sup>2</sup>, при объёме водной массы 513 620 м<sup>3</sup>. На момент выполнения съёмки длина озера составляла



350 м, при максимальной ширине равной 315 м. Максимальная измеренная глубина водоёма составляет 31,5 м при средней глубине 8,3 м. В придонной части водоёма было зафиксировано два углубления: наиболее крупное располагается в центре водоема, второе – в его западной части. Также было определено, что в северо-западной части озеро Нурган имеет сток в виде ручья, однако, на расстоянии около 70 метров от истока, происходит фильтрация ручья через морену, таким образом, при превышении скорости оттока воды из озера Нурган над интенсивностью фильтрации, возможно формирование новых озёр в понижениях рельефа путём скопления воды в них (Боронина и др., 2019).

Согласно полученным полевым данным, устойчивость перемычки к размыву по методике, описанной в работе (Петраков, 2008) составляет 120 баллов (50 – плотина состоит из моренного материала с ледяным ядром, 40 – высота низшей точки плотины расположена на высоте в диапазоне 1-10 м от уреза воды, 0 – отношение ширины плотины к её высоте больше 0.5, 10 - сток через морену по руслу с отстойкой, 20 – объём озера больше 100 тыс. м<sup>3</sup> и меньше 1 млн м<sup>3</sup>), а воздействие внешнего фактора было оценено в 30 баллов (30 – ливень после продолжительной жары). По методу балльной оценки озеро Нурган следует отнести к категории озёр со средней вероятностью прорыва.

Для оценки прорывоопасности данного озера с помощью данных дистанционного зондирования был использован спутниковый снимок Landsat от 14.08.2019 и Цифровая модель рельефа SRTM, также использовалась программа ArcMap 10.4.1.

С помощью визуального дешифрирования были получены такие характеристики, как тип плотины и характер стока через плотину. Плотина озера Нурган определена как состоящая из моренного материала с ледяным ядром. Сток из озера Нурган по спутниковому снимку определяется как поверхностный (по руслу с отстойкой). Определенная по спутниковому снимку длина озера составила 340 метров, ширина – 302 метра. Площадь озера Нурган составила 58 394 м<sup>2</sup>, рассчитанные значения максимальной глубины и объема составляют 24 м и 324 781 м<sup>3</sup> соответственно.

Исходя из данных, полученных в результате оценки озера дистанционным методом, устойчивость перемычки к размыву составила 120 баллов (50 – плотина состоит из моренного материала с ледяным ядром, 40 – высота низшей точки плотины расположена на высоте в диапазоне 1-10 м от уреза воды, 0 – отношение ширины плотины к её высоте больше 0.5, 10 - сток через морену по руслу с отмошкой, 20 – объём озера больше 100 тыс. м<sup>3</sup> и меньше 1 млн м<sup>3</sup>), а воздействие внешнего фактора было оценено в 30 баллов (30 – ливень после продолжительной жары). Таким образом, было выявлено, что озеро Нурган имеет среднюю степень прорывоопасности.

*Таблица 22. Сравнение полевых и дистанционных данных, полученных для озера Нурган.*

|                               | Площадь,<br>м <sup>2</sup> | Длина, м | Ширина, м | Макс.<br>глубина, м | Объём,<br>м <sup>3</sup> | Устойчиво<br>сть, баллы | Внеш.<br>Триггер,<br>баллы | Степень |
|-------------------------------|----------------------------|----------|-----------|---------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------|
| Полевые                       | 62 140                     | 350      | 315       | 31,5                | 513620                   | 120                     | 30                         | средняя |
| Дистанц.                      | 58 394                     | 340      | 302       | 24                  | 324781                   | 120                     | 30                         | средняя |
| % от<br>реального<br>значения | 94%                        | 97%      | 95%       | 76%                 | 63%                      |                         |                            |         |

Выполненная оценка показала, что степень прорывоопасности озёр, определенная как при полевых исследованиях, так и при дистанционных, совпадает (объекты относятся к категории озёр со средней прорывоопасностью). Было выявлено, что при помощи дистанционных методов с достаточно большой точностью можно определить такие параметры, как длина, ширина, площадь озера, а также характер стока через плотину, её тип. Так, для озера Нурган площадь, рассчитанная дистанционно, составила 94% от полевых измерений, длина и ширина водоёма – 97% и 95% соответственно. Для озера «Таможенное» измеренная площадь водоёма составила 105% от реального значения, а длина и ширина – 105% и 108% соответственно.

Такие рассчитанные характеристики, как максимальная глубина и объём озера значительно отличаются от их реальных показателей (для озера

«Таможенное» значение объема на 52% превышает значение, полученное в ходе полевых исследований, а для озера Нурган значение рассчитанного объема составляет 63% от реального значения), однако эти рассчитанные значения попадают в тот же подкласс характеристик устойчивости плотины к размыву (объем озера <100 тыс. куб. м. - 10 баллов, 100 тыс. куб. м. - 1 млн. куб. м. - 20 баллов, более 1 млн. куб. м - 30 баллов), что позволяет сделать вывод о том, что использование методов дистанционного зондирования позволяет оценивать с достаточной точностью параметры, которые могут повлиять на степень прорывоопасности водного объекта. Расхождение с реальными данными можно связать со сложностью в определении абсолютной высоты подошвы подпруживающей плотины.

Преимуществом данной системы оценки является возможность использования данных, полученных на основе дистанционного зондирования озёр без необходимости проведения подробных наблюдений. Однако использование единых шкал – это субъективный подход, который не позволяет учитывать особенности конкретных объектов.

Нельзя не отметить, что оценивание опасности является одним из начальных этапов при проведении расчёта потенциального риска от опасных гидрологических природных явлений. При высокой степени возможности образования прорыва озера необходимо проведение детальных исследований для разработки мер по обеспечению безопасности и снижению возможных рисков.

## Заключение

В данной работе на основе методов дистанционного зондирования Земли были выявлены приледниковые озёра четырёх горных массивов на территории Юго-Восточного Алтая (Южно-Чуйский хребет, горные массивы Хархираа, Тургэн, Цамбагарав), было проведено определение морфометрических характеристик выбранных озёр (151 объект) в соответствии с методикой балльной оценки прорывоопасности приледниковых озёр Д.А. Петракова. Каждому из озёр была присвоена степень опасности прорыва (низкая, средняя, высокая) в зависимости от устойчивости подпруживающей плотины и воздействия внешнего триггера. Общее количество озёр со средней степенью прорывоопасности на территории четырёх массивов - 112, с высокой степенью - 39. Были выявлены озёра, которые теряют связь с ледником, за счёт чего сокращается их площадь, а также озёра, площадь которых растёт из-за интенсивного таяния ледника. Помимо этого, были обнаружены водоёмы, которые меняют своё местоположение в пространстве – они перемещаются, «следуя» за ледником по мере его отступления.

В рамках работы были проведены полевые исследования (в июле 2022 года) в район Южно-Чуйского хребта (Центральный Алтай, Россия). В результате полевых работ были получены морфометрические характеристики озера «Таможенное», такие как: площадь и объём водной массы, максимальная глубина и конфигурация озёрной чаши по результатам батиметрической съёмки. Было проведено сравнение оценки прорывоопасности, полученной как на основе дистанционных методов, так и в результате полевых исследований, которое показало определённые расхождения полученных значений и недостатки использования дистанционных методов – параметры, которые можно оценить визуально (площадь, характер стока, и т.д.), определяются с высокой точностью, в то время как рассчитанные значения (глубина водоёма, объём водной массы) определяются с большой ошибкой.

Помимо этого, были сформулированы и внесены предложения по улучшению существующей методики оценки прорывоопасности – в частности, критерий объёма озера, определяющийся при помощи дистанционных методов с большими ошибками, был заменён на критерий «скорости приращения площади зеркала озера». Изменение площадей озёр рассматривалось за период с 2000 по 2022 года. Предлагается также дополнительно оценивать расстояние от рассматриваемого озера до ледника и учитывать средний уклон поверхности в пределах 100 метров вокруг озера в качестве количественной оценки возможности обвалов в озеро.

Методика с внесёнными изменениями была применена к шести выбранным озёрам исследуемых массивов, в результате чего была оценена применимость обновленной методики, а также влияние новых критериев на общую оценку устойчивости плотины по балльной методике.

## Список источников

Алейникова А.М., Анацкая Е.Е. Динамика ледников и приледниковых озёр бассейна реки Ала-Арча, Успехи современного естествознания №9, 2019 г – с. 42-47.

Алёшин Ю.Г., Торгоев И.А., Лосев В.А., Ерохин С.А. Геофизическое изучение дамб прорывоопасных озёр, Институт физики и механики горных пород НАН КР – с. 378-383.

Бакарасова Т.В., Зиневич Ю.Н., Хожаназаров Е.К. Проектирование и строительство селезащитных сооружений в Казахстане. Современный этап 2008-2018 – с. 271-282.

Благовещенский В.П., Капица В.В., Касаткин Н.Е. Оценка опасности прорыва приледниковых озёр в Иле Алатау (Казахстан), Институт географии МОН РК, Алматы, Казахстан – с. 120-125.

Богаченко Е.М., Зимницкий А.В., Ильичев Ю.Г. Исследование гляциальных озёр Приэльбрусья на предмет их потенциальной селевой опасности Труды Всероссийской конференции по селям: 26-28 октября 2005 г. - М.: Издательство ЛКИ, 2008

Бондаренко А.В., Малков Н.П., Манеев А.Г. и др. Горы снежных барсов. Природа и биологическое разнообразие национального парка на юге Республики Алтай. – Бийск – с. 229

Боронина А. С., Четверова А. А., Попов С. В., Пряхина Г. В. Обзор потенциально прорывоопасных озёр и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида), Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 2019 г – с. 307-318.

Боронина А.С., Волкова Д.Д., Панютин Н.А., Распутина В.А. Проведение гидрологических исследований в районах Монгун-Тайги (республика Тыва, Российская Федерация) и ледника Эрегтийн (Аймак Баян-Улгий, Монголия), 2019 г.

Бузруков Д.Д., Ботуров К.Б. и др. Оценочные доклады по возникающим экологическим проблемам Центральной Азии «Устойчивость горных озер Центральной Азии: риски воздействия и принятие мер», 2006

Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. - М.: Изд. Центр «Академия», 2008

Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. -Л.: Гидрометеиздат, 1977

Ганюшкин Д. А., Чистяков К. В., Москаленко И. Г. Современное оледенение Северо-Запада внутренней Азии и его динамика, Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2011. Вып. 2 – с. 94-110

Ганюшкин Д.А., Отгонбаяр Д., Чистяков К.В. и др. Современное оледенение хребта Цамбагарав (Северо-Западная Монголия) и его изменение с максимума малого ледникового периода, Лед и снег, 2016, т. 56, № 4, - с. 437–452, Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 4 – с. 26–35

Дайыров М.А., Молдобеков Б.Д., Усупаев Ш.Э., Нарама Ч. Инвентаризация состояния и динамика высокогорных ледниковых озёр Кыргызского хребта, Известия вузов Кыргызстана, №1, 2019 г – с. 17-25.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Шагин С.И. Приледниковые озёра в бассейне р. Зедегондон (Республика Северная Осетия – Алания): динамика и потенциальная опасность. Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2022. Том 7. №3 (29). – с. 12- 19.

Докукин М.Д., Шагин С.И. Особенности динамики ледниковых озёр с подземными каналами стока (анализ разновременной аэрокосмической информации), Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 47–56.

Ерохин С.А. Мониторинг прорывоопасности горных озер Кыргызстана//Автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. -Бишкек, 2012.

Ерохин С.А., Загинаев В.В. Тенденции прорывоопасности в развитии горных озер Кыргызстана. 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. 194–207.

Капица В., Шахгеданова М., Усманова З., Северский И., Благовещенский В., Касаткин Н., Мишенин В., Ребров Ю., Голенко А. Ледниковые озера Иле (Заилийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита, 2018 г. – с. 357.

Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям, Доклады ТУСУРа, том 20, № 4, 2017 – с. 105-108.

Кобялко Р.А. Анализ распределения и изменения ледников Центрального Алтая, Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН № 5 (73), 2016 – с. 19-26.

Коновалов В.Г. Дистанционный мониторинг прорывоопасных озёр на Памире, Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 80–89.

Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Дистанционное определение резервного объёма прорывоопасных высокогорных озёр, Лёд и Снег, т. 56, №2, 2016 г – с. 235-245.

Кубанычбек уулу Н., Ерохин С.А., Загинаев В.В. Организация мониторинга за прорывоопасными озёрами (на базе высокогорной станции Адыгене), Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, №4, 2021.

Маматканов Д.М., Эрменбаев Б.О. Высокогорные озера бассейна р. Тон и оценка их прорывоопасности. Известия НАН КР, 2010, № 3 – с. 45-47.

Манилюк Т.А., Маслова А.В. Исследование водных поверхностей озёр путём использования водных индексов по данным дистанционного зондирования // Вестн. Забайкал. гос. ун-та, 2017, т. 23 №3 – с.4-11.

Медеу А.Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. Том 1. Алматы, 2011.

Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Ранова С.У., Касаткин Н.Е., Касенов М.К., Раймбекова Ж.Т. Система противоселевых мероприятий в Заилийском Алатау. 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. 39–48.

Мильков Ф.Н. Основные проблемы физической географии. - Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1967.

Морозова В.А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования, современные проблемы территориального развития: электрон. журн., 2019 – с. 1-10.

Нарожный Ю.К., Окишев П.А. Динамика ледников Алтая в регрессивную фазу малого ледникового периода. – МГИ, –1999. Вып. 87 – с. 119-123.

Нарожный Ю.К., Паромов В.В., Отгонбаяр Д. Тенденции изменения среднелетних температур воздуха и осадков в Западной Монголии, Томский государственный университет – с. 55-59.

Наумов И. В. Флора Южно-Чуйского хребта: специальность 03.00.05: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, Барнаул, 2009 – с. 240.

Никитин С.А. Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамики, Материалы гляциологических исследований. – 2009. – Вып. 107. – с. 87-96.

Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал Тео", 2004 – с. 313.

Огуреева Г. Н. Ботаническая география Алтая. М.: Наука, 1980. 186 с.

Окишев П.А., Нарожный Ю.К. Рельеф и оледенение Русского Алтая, вопросы географии Сибири, Выпуск 26, 2006 – с. 39-53.

Осипов А.В., Игловская Н.В., Никитин С.А. Распределение площади оледенения Центрального Алтая по высотным зонам (Катунский, Северо-Чуйский и Южно-Чуйский хребты), Русское географическое общество, Томский отдел, Томский государственный университет. Томск, 2001 – с. 155-168.

Отгонбаяр Д. Водно-ледниковые ресурсы бессточных районов Западной Монголии: современная оценка и тенденции изменения: Дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2012 – с. 170.

Отгонбаяр Д. Пространственная изменчивость и распределение ледникового стока в бассейнах рек хребтов Цамбагарав, Мунххайрхан и Сутай (Монгольский Алтай), мир науки, культуры, образования. № 1 (38), 2013 – с. 336-338.

Отгонбаяр Д., Батсүрэн Б., Билгүүн Ц., Баярмаа М., Золбаяр Ж. Изменение климата и эволюция горных ландшафтов горного узла Цамбагарав (Монгольский Алтай) – с. 34-37.

Петраков Д. А. Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды Международной конференции. Пятигорск, Россия, 22-29 сентября 2008 г. – с. 309-312.

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 озёр 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.

Пряхина Г.В., Кашкевич М.П., Попов С.В., Распутина В.А., Боронина А.С., Ганюшкин Д.А., Агатова А.Р., Непоп Р.К. Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, Северо-Западная Монголия, 2021 г – с. 26-35.

Раимбеков Ю.Х., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О., Зикиллобеков И.И., Гуломайдоров А.Г., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Куровская В.А., Висхаджиева К.С., Бобов Р.А. Оценка потенциального прорыва озера Варшезкуль Нижнее (Памир, Таджикистан) по результатам батиметрической съемки и моделирования. 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. 303–312.

Распутина В.А., Ганюшкин Д.А., Банцев Д.В., Пряхина Г.В., Вуглинский В.С., Свирепов С.С., Панютин Н.А., Волкова Д.Д., Николаев М.Р., Сыроежко Е.В. Оценка прорывоопасности малоизученных озер массива Монгун-Тайга, Вестник СПбГУ, Науки о Земле, 2021, т. 66, вып. 3 – с. 487-504.

Ресурсы поверхностный вод СССР. Том 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Верхний Иртыш и Горный Алтай. Часть 1. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969 – с. 316.

Свирепов С.С. Систематизация прорывоопасных озёр на территории горного Алтая (с помощью методов ДЗЗ), Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург – с. 353-357.

Свирепов С.С., Глушко А.А., Рыженкова И.В., Корнаузов И.Д., Акилов Е.В., Землянскова А.А., Кузнецова М.Р. Выявление и оценка риска прорыва горных озёр Берегового Хребта Кордильер и Патагонских Анд, Санкт-Петербургский государственный университет – с. 347-352.

Севастьянов и др., 1994 Севастьянов Д.В., Дорофеюк Н.И., Лийва А.А. 1994. Палеоэкология озер в голоцене // Там же. СПб.: Наука. С. 248-262.

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) – с. 185-199.

Сэр-Од Ц., Даш Д., Хадбаатар С., Лхагвасүрэн Ч. Монгол Алтайн Нурууны Хархираа-Тургэний дэд мужийн ландшафтын онцлон, Улаанбаатар, Ховд, Монгол – с. 142-146.

Тавасиев Р.А. Ледники и приледниковые озёра бассейнов рек Фастагдон и Искадон, Центральный Кавказ, Вестник Владикавказского научного центра, том 19 №4, 2019 г – с. 65-71.

Тебиева Д.И. База данных «Горные озера Северной Осетии», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2017 г.

Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г. Оценка вероятности и последствий возможного прорыва моренно-ледникового озера Петрова, современные проблемы механики сплошных сред, выпуск пятнадцатый, 2012 г – с. 112-128.

Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г., Ерохин С.А. Эволюция ледниково-озёрного комплекса Петрова (Тянь-Шань) и оценка риска его прорывоопасности, Лёд и Снег · 2013 · № 2 – с. 137-144.

Умарова М. Состояние использования земельно-водных ресурсов Кыргызской Республики, Кыргызский национальный аграрный университет имени К.И. Скрябина, 2016

Усубалиев Р.А., Ерохин С.А. Формирование высокогорных озер как следствие деградации современного оледенения Тянь-Шаня, Материалы гляциологических исследований, 2020. – с. 134-137.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Тарбеева А.М. Динамика ледниково-озёрного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ), Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 1, с. 72–84.

Четырёхязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. Редактор: Спиридонов А.М.: «Советская энциклопедия», 1980

Шафиев Г.В. Анализ состояния прорывоопасных озёр по долине реки Гунд в Юго-Западном Памире, «Фокус Гуманитарная помощь» в Таджикистане., - с. 250.

Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., Bantcev D., Kunaeva E., Terekhov A., Rasputina V. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum Remote Sens. 2022. Vol. 14, 1508

Ganyushkin D.A., Konkova O.S., Chistyakov K.V., Ekaykin A.A., Volkov I.V., Bantcev D.V., Terekhov A.V., Kunaeva E.P., Kurochkin Yu.N. The state of the Shapshalsky glacierization center (Eastern Altai) in 2015. Led i Sneg. Ice and Snow. 2021. 61 (1): 38–57. [In Russian]

Hironori Yabuki. The recent 50 years glacier changes in Mongolian Altai Mountains, 2nd Asia CliC Symposium the state and fate of Asian Cryosphere, Lanzhou, China, 2007.

Reynolds J.M. (ed.). Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment. Report No R7816, Reynolds Geo-Sciences LTD, UK, 2003, 36 p

Электронные ресурсы:

1. Галерея индексов – ArcGIS Pro – документация: [сайт] URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm> (дата обращения: 25.11.2022)

2. Earth Explorer – U.S. Geological Survey / Архив Геологической службы США <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 03.12.2021). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

## Приложения

### Приложение I

| №                           | Площадь, м <sup>2</sup> | Длина, м | Ширина, м | Максимальная глубина, м | Объём, м <sup>3</sup> | Абсолютная высота, м | Положение относительно ледника | Тип стока     | Тип плотины            | Каскадность | Уклон долины в пределах 100 метров, ° | Сумма баллов (по методике Петракова) | Степень прорывоопасности |
|-----------------------------|-------------------------|----------|-----------|-------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| <b>1. Массив Цамбагарав</b> |                         |          |           |                         |                       |                      |                                |               |                        |             |                                       |                                      |                          |
| Ц1                          | 59978                   | 334      | 281       | 36                      | 203395                | 2972                 | перигляциальное                | поверхностный | морена с ледяным ядром | нет         | 16,7                                  | 120 / 30                             | средняя                  |
| Ц2                          | 26950                   | 242      | 176       | 22                      | 96285                 | 3020                 | перигляциальное                | поверхностный | морена с ледяным ядром | нет         | 17,4                                  | 110 / 30                             | средняя                  |
| Ц3                          | 21275                   | 180      | 166       | 19                      | 76009                 | 2987                 | экстрагляциальное              | поверхностный | морена                 | есть        | 9,9                                   | 80 / 30                              | средняя                  |
| Ц4                          | 24158                   | 260      | 167       | 8                       | 86309                 | 3273                 | перигляциальное                | поверхностный | морена с ледяным ядром | нет         | 8,2                                   | 110 / 30                             | средняя                  |
| Ц5                          | 33805                   | 254      | 196       | 56,5                    | 120776                | 3193                 | перигляциальное                | подземный     | морена                 | есть        | 22,3                                  | 140 / 30                             | средняя                  |

|                         |        |     |     |      |        |      |                   |               |                        |      |      |          |                |
|-------------------------|--------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|----------|----------------|
| <b>Ц6</b>               | 110245 | 621 | 259 | 29   | 393874 | 3065 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 23,6 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>Ц7</b>               | 39536  | 351 | 126 | 21,5 | 141251 | 2985 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 14,9 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>Ц8</b>               | 115497 | 754 | 247 | 31,5 | 412638 | 2862 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 17,6 | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>Ц9</b>               | 49518  | 257 | 255 | 8    | 176913 | 3148 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | нет  | 16,4 | 120 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>Ц10</b>              | 95804  | 432 | 271 | 26,5 | 342281 | 3072 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | нет  | 18,3 | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>Ц11</b>              | 20 869 | 281 | 146 | 11   | 107460 | 3202 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 19,1 | 170 / 30 | <b>высокая</b> |
| <b>Ц12</b>              | 31573  | 281 | 135 | 11,5 | 112801 | 3144 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | нет  | 13,9 | 120 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>2. Массив Тургэн</b> |        |     |     |      |        |      |                   |               |                        |      |      |          |                |
| <b>Т1</b>               | 55524  | 450 | 201 | 5    | 50967  | 2869 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | есть | 16,5 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>Т2</b>               | 132529 | 544 | 354 | 58,5 | 473494 | 2909 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 15,6 | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>Т3</b>               | 62283  | 388 | 228 | 8    | 57171  | 2928 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 10,3 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>Т4</b>               | 97636  | 500 | 275 | 25,5 | 89623  | 2986 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | есть | 14,3 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |

|            |       |       |       |      |       |      |                   |               |                        |      |      |          |                |
|------------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|----------|----------------|
| <b>T5</b>  | 87955 | 519   | 242   | 8    | 80736 | 3155 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 19,1 | 160 / 30 | <b>высокая</b> |
| <b>T6</b>  | 39749 | 319   | 222   | 14,5 | 36486 | 3071 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 27,7 | 130 / 40 | <b>средняя</b> |
| <b>T7</b>  | 28382 | 270   | 152   | 25,5 | 26052 | 2980 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | нет  | 24,6 | 130 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>T8</b>  | 20063 | 183   | 164   | 14,5 | 18416 | 2830 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | есть | 13,9 | 110 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>T9</b>  | 37340 | 262   | 193   | 25   | 34275 | 2956 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | нет  | 27,4 | 130 / 40 | <b>средняя</b> |
| <b>T10</b> | 30279 | 258   | 188   | 18,5 | 29265 | 3054 | прогляциальное    | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 13,8 | 210 / 30 | <b>высокая</b> |
| <b>T11</b> | 88625 | 598   | 242   | 21,5 | 56854 | 2885 | прогляциальное    | поверхностный | морена с ледяным ядром | есть | 16,4 | 160 / 30 | <b>высокая</b> |
| <b>T12</b> | 14834 | 165   | 124   | 13   | 13253 | 3140 | прогляциальное    | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 14,6 | 210 / 30 | <b>высокая</b> |
| <b>T13</b> | 32619 | 432   | 105   | 13   | 29942 | 2845 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 29,6 | 130 / 40 | <b>средняя</b> |
| <b>T14</b> | 39691 | 266   | 177   | 10,5 | 36433 | 2836 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 14,3 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>T15</b> | 38567 | 357,8 | 138,8 | 10,6 | 35401 | 2918 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | есть | 19,5 | 180 / 30 | <b>высокая</b> |



### 3. Массив Хархираа

|            |        |     |     |      |        |      |                   |               |                        |      |      |          |                |
|------------|--------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|----------|----------------|
| <b>X1</b>  | 35264  | 296 | 150 | 13,5 | 125988 | 3059 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | есть | 8,2  | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X2</b>  | 57213  | 289 | 250 | 28,5 | 204406 | 3171 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | есть | 19,7 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X3</b>  | 24019  | 388 | 99  | 20,5 | 85813  | 3170 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | есть | 16,8 | 160 / 30 | <b>высокая</b> |
| <b>X4</b>  | 58242  | 432 | 185 | 13,5 | 208082 | 3119 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 14,0 | 170 / 30 | <b>высокая</b> |
| <b>X5</b>  | 18441  | 191 | 120 | 18   | 65884  | 3009 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | есть | 10,4 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X6</b>  | 82753  | 388 | 324 | 30,5 | 295653 | 3478 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 20,9 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X7</b>  | 19083  | 189 | 125 | 23   | 68178  | 3091 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 18,7 | 130 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X8</b>  | 105826 | 547 | 265 | 13,5 | 378086 | 2985 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 23,8 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X9</b>  | 36714  | 326 | 129 | 12,5 | 131168 | 2906 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 12,9 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X10</b> | 212314 | 743 | 339 | 9,5  | 758538 | 2934 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 20,8 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X11</b> | 52601  | 524 | 170 | 14,5 | 187928 | 3027 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 24,4 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |

|            |        |     |     |      |        |      |                   |               |                        |      |      |          |                |
|------------|--------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|----------|----------------|
| <b>X12</b> | 49144  | 385 | 160 | 17,5 | 175577 | 2934 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 27,2 | 140 / 40 | <b>высокая</b> |
| <b>X13</b> | 62773  | 390 | 188 | 22   | 224270 | 2862 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 15,5 | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X14</b> | 62710  | 423 | 207 | 20,5 | 224045 | 2831 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 17,3 | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X15</b> | 100204 | 456 | 263 | 11,5 | 358000 | 2892 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 7,9  | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X16</b> | 17619  | 233 | 131 | 10,5 | 62947  | 2901 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 12,1 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X17</b> | 14534  | 233 | 114 | 14,5 | 51926  | 2978 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 15,8 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X18</b> | 12460  | 181 | 95  | 16,5 | 44516  | 2986 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 5,6  | 130 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X19</b> | 13893  | 145 | 129 | 18   | 49635  | 2986 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 5,6  | 180 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X20</b> | 6980   | 135 | 60  | 7,5  | 24937  | 2987 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 13,4 | 80 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X21</b> | 20186  | 256 | 127 | 2,5  | 72118  | 2994 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 20,1 | 130 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X22</b> | 17 915 | 283 | 109 | 8,5  | 64005  | 3007 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 7,3  | 130 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X23</b> | 33 469 | 243 | 241 | 17,5 | 119575 | 3124 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 15,1 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X24</b> | 47 436 | 256 | 144 | 61,5 | 124035 | 3066 | прогляциальное    | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 16,6 | 170 / 30 | <b>высокая</b> |

|                               |        |      |     |      |         |      |                   |               |                        |      |      |          |                |
|-------------------------------|--------|------|-----|------|---------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|----------|----------------|
| <b>X25</b>                    | 95383  | 434  | 326 | 12,5 | 340776  | 2914 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | нет  | 18,9 | 140 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>X26</b>                    | 104581 | 493  | 320 | 16,5 | 373638  | 2926 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | есть | 23,6 | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X27</b>                    | 269764 | 1076 | 360 | 30   | 963791  | 2752 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | нет  | 14,5 | 90 / 30  | <b>средняя</b> |
| <b>X28</b>                    | 383248 | 1047 | 553 | 24,5 | 1369238 | 2876 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 16,8 | 100 / 30 | <b>средняя</b> |
| <b>4. Южно-Чуйский хребет</b> |        |      |     |      |         |      |                   |               |                        |      |      |          |                |
| <b>Ч1</b>                     | 16623  | 196  | 102 | 3    | 59389   | 2929 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | есть | 19,6 | 110/30   | средняя        |
| <b>Ч2</b>                     | 7550   | 153  | 61  | 2,5  | 26973   | 2921 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | есть | 12,1 | 110/30   | средняя        |
| <b>Ч3</b>                     | 29214  | 334  | 116 | 18,5 | 104373  | 2965 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | нет  | 20,2 | 90/30    | средняя        |
| <b>Ч4</b>                     | 136149 | 610  | 281 | 15,5 | 487947  | 2803 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 14,6 | 170/30   | высокая        |
| <b>Ч5</b>                     | 104440 | 628  | 291 | 17,5 | 373135  | 2536 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 18,2 | 90/30    | средняя        |
| <b>Ч6</b>                     | 59174  | 564  | 197 | 28   | 211412  | 2384 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 26,3 | 90/30    | средняя        |
| <b>Ч7</b>                     | 27936  | 386  | 145 | 21,5 | 99807   | 2272 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 23,7 | 80/30    | средняя        |

|            |        |     |     |      |        |      |                   |               |                              |      |      |        |         |
|------------|--------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч8</b>  | 198253 | 821 | 293 | 21   | 708302 | 2551 | экстрагляциальное | подземный     | морена                       | нет  | 19,2 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч9</b>  | 30757  | 226 | 164 | 14   | 109886 | 2730 | перигляциальное   | поверхностный | морена                       | есть | 18,2 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч10</b> | 177220 | 673 | 308 | 19   | 633157 | 2601 | экстрагляциальное | подземный     | морена                       | есть | 15,3 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч11</b> | 122028 | 422 | 406 | 31   | 435972 | 3153 | прогляциальное    | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | нет  | 22,4 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч12</b> | 30284  | 290 | 130 | 28,5 | 108196 | 2677 | перигляциальное   | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | есть | 22,8 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч13</b> | 27960  | 240 | 144 | 13   | 99893  | 2555 | перигляциальное   | поверхностный | морена                       | есть | 9,9  | 80/30  | средняя |
| <b>Ч14</b> | 14197  | 159 | 114 | 20,5 | 50722  | 2971 | прогляциальное    | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | нет  | 22,1 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч15</b> | 18636  | 173 | 131 | 19,5 | 66581  | 2652 | перигляциальное   | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | нет  | 34,9 | 160/40 | высокая |
| <b>Ч16</b> | 21246  | 187 | 144 | 17,5 | 75906  | 2793 | перигляциальное   | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | нет  | 15,7 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч17</b> | 17641  | 180 | 128 | 10   | 63026  | 2537 | экстрагляциальное | подземный     | морена                       | есть | 19,4 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч18</b> | 19405  | 258 | 131 | 10   | 69328  | 2773 | экстрагляциальное | подземный     | морена                       | нет  | 10,7 | 130/30 | средняя |

|            |       |     |     |      |        |      |                   |               |                        |      |      |        |         |
|------------|-------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч19</b> | 77212 | 412 | 249 | 17   | 275857 | 2625 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 20,4 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч20</b> | 8838  | 173 | 72  | 24,5 | 31575  | 2875 | экстрагляциальное | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 13,1 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч21</b> | 40953 | 332 | 140 | 8    | 146313 | 2888 | экстрагляциальное | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 14,4 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч22</b> | 30769 | 274 | 165 | 16,5 | 109929 | 2851 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 19,5 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч23</b> | 29481 | 265 | 180 | 19   | 105327 | 2796 | экстрагляциальное | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 19,8 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч24</b> | 65986 | 530 | 179 | 25,5 | 235749 | 2808 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | есть | 18,2 | 120/30 | средняя |
| <b>Ч25</b> | 89641 | 499 | 227 | 14   | 320262 | 2553 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | нет  | 12,7 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч26</b> | 30292 | 221 | 148 | 18,5 | 108225 | 2944 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 28,3 | 140/40 | высокая |
| <b>Ч27</b> | 23375 | 260 | 127 | 23   | 83512  | 2736 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 15,2 | 80/30  | средняя |
| <b>Ч28</b> | 21957 | 224 | 140 | 16   | 78446  | 2663 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | нет  | 15,8 | 80/30  | средняя |
| <b>Ч29</b> | 24071 | 297 | 104 | 20,5 | 85999  | 2805 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 20,4 | 130/30 | средняя |

|            |       |     |     |      |        |      |                   |               |                        |      |      |        |         |
|------------|-------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч30</b> | 48024 | 460 | 161 | 59   | 171577 | 2747 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 24,3 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч31</b> | 35996 | 245 | 193 | 23,5 | 128603 | 2681 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 16,9 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч32</b> | 58950 | 456 | 196 | 41   | 210612 | 2584 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | есть | 13,6 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч33</b> | 19245 | 201 | 145 | 13,5 | 68757  | 2626 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 8,4  | 80/30  | средняя |
| <b>Ч34</b> | 11742 | 125 | 101 | 15   | 41951  | 2825 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 11,6 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч35</b> | 12293 | 153 | 111 | 14,5 | 43919  | 2822 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 17,8 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч36</b> | 70271 | 484 | 177 | 18,5 | 251058 | 2751 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 12,9 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч37</b> | 91314 | 569 | 236 | 27,5 | 326239 | 2767 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 11,4 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч38</b> | 50068 | 359 | 148 | 17,5 | 178879 | 2808 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 22,1 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч39</b> | 15086 | 222 | 102 | 16,5 | 53898  | 2744 | перигляциальное   | поверхностный | морена с ледяным ядром | есть | 11,6 | 110/30 | средняя |
| <b>Ч40</b> | 21127 | 227 | 156 | 12,5 | 75480  | 2823 | прогляциальное    | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 9,1  | 160/30 | высокая |

|            |       |     |     |      |        |      |                   |               |                        |      |      |        |         |
|------------|-------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч41</b> | 31059 | 231 | 194 | 31   | 110965 | 3063 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 16,2 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч42</b> | 14969 | 222 | 103 | 32   | 53480  | 2985 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 15,3 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч43</b> | 19583 | 287 | 100 | 14   | 69964  | 2821 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 19,3 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч44</b> | 47664 | 217 | 275 | 20,5 | 170290 | 2839 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 17,1 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч45</b> | 27656 | 223 | 143 | 10,5 | 98807  | 2808 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 15,1 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч46</b> | 11033 | 241 | 66  | 12   | 39417  | 2779 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 16,9 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч47</b> | 10947 | 187 | 74  | 8    | 39110  | 2754 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 15,8 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч48</b> | 40659 | 396 | 106 | 21   | 145263 | 2537 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 16,5 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч49</b> | 26733 | 368 | 101 | 16   | 134959 | 2771 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | нет  | 16,4 | 110/30 | средняя |
| <b>Ч50</b> | 36703 | 538 | 95  | 18,5 | 131129 | 3057 | прогляциальное    | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 17,3 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч51</b> | 53947 | 317 | 199 | 22   | 192737 | 2911 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | нет  | 18,9 | 140/30 | средняя |

|            |        |     |     |      |         |      |                   |               |                        |      |      |        |         |
|------------|--------|-----|-----|------|---------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч52</b> | 371090 | 867 | 628 | 27   | 1325801 | 2447 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | нет  | 10,1 | 100/30 | средняя |
| <b>Ч53</b> | 121677 | 623 | 359 | 23   | 434718  | 2948 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 20,9 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч54</b> | 189721 | 893 | 283 | 24   | 677820  | 2710 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 20,9 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч55</b> | 22263  | 211 | 151 | 33,5 | 79539   | 3090 | прогляциальное    | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 20,2 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч56</b> | 78776  | 395 | 272 | 19,5 | 281444  | 2789 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | нет  | 16,6 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч57</b> | 58703  | 463 | 206 | 28,5 | 209729  | 2934 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 26,5 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч58</b> | 172012 | 847 | 339 | 30,5 | 614551  | 2848 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | нет  | 21,5 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч59</b> | 52852  | 450 | 147 | 25,5 | 188825  | 2702 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 15,1 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч60</b> | 49217  | 599 | 149 | 33,5 | 175838  | 3058 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | есть | 28,9 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч61</b> | 58629  | 316 | 213 | 23,5 | 209465  | 2763 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 12,7 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч62</b> | 25752  | 307 | 121 | 19   | 92004   | 3009 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | нет  | 19,2 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч63</b> | 20674  | 289 | 119 | 16   | 73862   | 2919 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | нет  | 23,2 | 80/30  | средняя |



|            |        |      |     |      |         |      |                   |               |                        |      |      |        |         |
|------------|--------|------|-----|------|---------|------|-------------------|---------------|------------------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч64</b> | 106123 | 548  | 305 | 29,5 | 379148  | 2787 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | нет  | 16,4 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч65</b> | 10255  | 131  | 96  | 16,5 | 36638   | 2831 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | есть | 21,3 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч66</b> | 517122 | 1545 | 491 | 42   | 1847532 | 2794 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | есть | 22,1 | 100/30 | средняя |
| <b>Ч67</b> | 86653  | 422  | 288 | 13,5 | 309587  | 2817 | перигляциальное   | поверхностный | морена                 | нет  | 17,2 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч68</b> | 23441  | 282  | 117 | 19   | 83748   | 3031 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | нет  | 19,7 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч69</b> | 41288  | 365  | 296 | 20   | 147510  | 2767 | перигляциальное   | подземный     | морена с ледяным ядром | нет  | 18,0 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч70</b> | 311605 | 888  | 540 | 36   | 1113277 | 2738 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 22,0 | 100/30 | средняя |
| <b>Ч71</b> | 463774 | 1001 | 569 | 12,5 | 1656934 | 2763 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 23,4 | 100/30 | средняя |
| <b>Ч72</b> | 32637  | 251  | 181 | 40   | 116603  | 2816 | экстрагляциальное | подземный     | морена                 | есть | 19,2 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч73</b> | 37196  | 277  | 221 | 22   | 132891  | 2843 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | есть | 19,3 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч74</b> | 18299  | 220  | 120 | 12,5 | 65377   | 2770 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                 | нет  | 17,1 | 80/30  | средняя |
| <b>Ч75</b> | 8278   | 126  | 83  | 11,5 | 29575   | 2792 | перигляциальное   | подземный     | морена                 | есть | 15,1 | 130/30 | средняя |

|            |              |     |     |      |        |      |                   |               |                              |      |      |        |         |
|------------|--------------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|------------------------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч76</b> | 24971        | 207 | 155 | 16   | 89214  | 2722 | перигляциальное   | подземный     | морена                       | есть | 16,9 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч77</b> | 36 609       | 228 | 199 | 20,5 | 119282 | 2808 | перигляциальное   | поверхностный | морена                       | нет  | 13,8 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч78</b> | 41290,<br>48 | 326 | 170 | 15   | 147519 | 3019 | прогляциальное    | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | нет  | 20,8 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч79</b> | 29068        | 232 | 134 | 22   | 103852 | 3188 | прогляциальное    | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | есть | 21,3 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч80</b> | 33218        | 306 | 182 | 76   | 118679 | 2965 | перигляциальное   | поверхностный | морена                       | есть | 22,7 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч81</b> | 11993        | 154 | 156 | 13   | 42847  | 3007 | перигляциальное   | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | нет  | 19,8 | 160/30 | высокая |
| <b>Ч82</b> | 70182        | 353 | 266 | 20,5 | 250740 | 2752 | экстрагляциальное | подземный     | морена                       | нет  | 21,2 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч83</b> | 78727        | 451 | 286 | 22,5 | 281269 | 2738 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                       | нет  | 23,1 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч84</b> | 62930        | 379 | 271 | 19   | 224831 | 2744 | экстрагляциальное | поверхностный | морена                       | нет  | 14,7 | 90/30  | средняя |
| <b>Ч85</b> | 60719        | 253 | 284 | 16,5 | 216932 | 2940 | прогляциальное    | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | нет  | 19,1 | 170/30 | высокая |
| <b>Ч86</b> | 80327        | 323 | 318 | 49   | 286986 | 2906 | перигляциальное   | подземный     | морена с<br>ледяным<br>ядром | есть | 25,4 | 170/40 | высокая |

|            |       |     |     |      |        |      |                   |               |        |      |      |        |         |
|------------|-------|-----|-----|------|--------|------|-------------------|---------------|--------|------|------|--------|---------|
| <b>Ч87</b> | 12947 | 162 | 88  | 10,5 | 46256  | 2795 | перигляциальное   | поверхностный | морена | есть | 29,9 | 80/40  | средняя |
| <b>Ч88</b> | 65503 | 484 | 208 | 8    | 234023 | 2760 | перигляциальное   | подземный     | морена | есть | 24,3 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч89</b> | 63773 | 427 | 182 | 17   | 227843 | 2735 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 26,4 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч90</b> | 13280 | 155 | 132 | 26   | 47446  | 2950 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 17,6 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч91</b> | 56711 | 409 | 191 | 21,5 | 202612 | 2941 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 14,9 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч92</b> | 41012 | 304 | 189 | 19   | 146524 | 2983 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 22,2 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч93</b> | 13691 | 163 | 103 | 31   | 48914  | 2794 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 14,1 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч94</b> | 10854 | 120 | 136 | 7,5  | 38778  | 2814 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 11,7 | 130/30 | средняя |
| <b>Ч95</b> | 59322 | 352 | 245 | 28   | 211941 | 2769 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 14,5 | 140/30 | средняя |
| <b>Ч96</b> | 28072 | 288 | 194 | 4,5  | 100293 | 2546 | экстрагляциальное | подземный     | морена | есть | 17,6 | 130/30 | средняя |