

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ И ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ  
ТЯНЬ-ШАНСКИЙ ВЫСОКОГОРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР**

На правах рукописи  
УДК: 556.51:551.583(282)(575.23)

**Сатылканов Рысбек Абылаевич**

**Современные изменения климата в Иссык-Кульской котловине, их  
влияние на водные ресурсы и разработка мер к их адаптации**

25.00.27 - Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**  
доктор технических наук, академик  
НАН КР и АН РТ,  
Маматканов Дюшен Маматканович

**Бишкек-2021**

## Содержание

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	4
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЫК-КУЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ</b> .....	13
1.1. Современное состояние изученности гидрометеорологических особенностей Иссык-Кульской котловины.....	14
1.2. Изученность изменения климатических параметров.....	18
1.2.1. Исследование температуры воздуха .....	20
1.2.2. Изученность влажности воздуха .....	21
1.2.3. Исследование атмосферных осадков .....	23
1.2.4. Изученность испаряемости воды.....	25
1.3. Изученность деградации ледников.....	27
1.4. Общие гидрологические характеристики речного стока Иссык-Кульской котловины.....	35
1.5. Изученность колебаний уровня оз.Иссык-Куль.....	37
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	39
2.1. Методы изучения климата и его параметров.....	39
2.2. Методика гляциогидрометеорологических наблюдений.....	45
2.3. Методы определения баланса массы ледника Кара-Баткак.....	49
2.4. Методы оценки водных ресурсов.....	56
2.5. Методы восстановления прерванных рядов наблюдений климатических изменений.....	59
2.6. Методы изучения колебания уровня озера Иссык-Куль.....	64
<b>ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ИССЫК-КУЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ</b> .....	67
3.1. Влияние климатических изменений на аккумуляцию, абляцию и баланс массы ледников (на примере ледника Кара-Баткак).....	67
3.1.1. Многолетний мониторинг ледников Тянь-Шаня.....	68

3.1.2. Аккумуляция.....	69
3.1.3. Абляция.....	73
3.1.4. Баланс массы ледника.....	89
3.1.5. Восстановление непрерывности ряда наблюдений на леднике.....	93
3.1.6. Колебания фронта и сокращение ледника.....	102
3.2. Влияние климатических изменений на речной сток Иссык-Кульской котловины.....	104
3.2.1. Ледниковый сток р.Кашка-Тор.....	105
3.2.2. Особенности водного режима рек Тескей Ала-Тоо на примере р.Чон-Кызыл-Суу.....	113
3.3. Влияние изменений климата на колебания уровня озера Иссык-Куль.....	120
<b>ГЛАВА 4. АДАПТАЦИЯ К ПРОГНОЗИРУЕМЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ИССЫК-КУЛЬСКОМ БАССЕЙНЕ.....</b>	<b>126</b>
4.1. Использование водных ресурсов в Иссык-Кульском бассейне.....	126
4.2. Оценка негативного влияния климатических изменений на хозяйственную деятельность в Иссык-Кульской котловине на примере бассейна р.Жууку.....	131
4.3. Оценка изменений притока подземных вод в озеро Иссык-Куль под воздействием изменений климата (на примере бассейна р.Чон-Кызыл-Суу).....	135
4.4. Адаптационные меры на примере бассейна р.Жууку.....	145
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>156</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....</b>	<b>158</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>160</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ. ....</b>	<b>182</b>

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Ab	Абляция
Ак	Аккумуляция
АМС	Автоматическая метеостанция
АШТ	Ашуу-Тор
БРД	Борду
ВМЗ	Высотно-морфологические зоны
ВМО	Всемирная метеорологическая организация
ВТШ	Внутренний Тянь-Шань
ГМС	Гидрометеорологический стационар
ИВПиГЭ	Институт водных проблем и гидроэнергетики
ИГАН	Институт географии Академии наук
КНУ	Кыргызский национальный университет
КПД	Коэффициент полезного действия
ЛС	Лысый
МГГ	Международный гидрологический год
МГД	Международного гидрологического десятилетия
МНТЦ	Международный научно-технический центр
МС	Метеостанция
ОГП	Озерный гидрологический пост
СРТ	Сары-Тор
СРЧ	Сары-Чат
ТШФГС	Тянь-Шанская физико-географическая станция
ТШВНЦ	Тянь-Шанский высокогорный научный центр
УГКС	Управление по гидрометеорологии и контролю природной среды
AAR	Доля области аккумуляции
bn	Баланс массы

CHARIS	Contribution to High Asian Run off from Ice and Snow/Вклад льда и снега в сток Высокой Азии
CIRES	Кооперативный институт по исследованиям в области экологических наук
CNES	Национальный центр космических исследований
COM	Комбинированная система
ELA	Положение границы питания (Equilibrium Line Altitude)
FLD	Система плавающих дат (floating -date system)
FXD	Система фиксированные даты
GFO	Geosat Follow On
GPS	Система глобального позиционирования (Global Positioning System)
LEGOS	Лаборатория исследования геофизики и космической океанографии
LIA	Малый ледниковый период (Little Ice Age)
MLS	Средний уровень моря
NSIDC	Национальный центр снега и льда
OTH	Система неопределенно-многозначительное
PEER	Партнерства для расширения участия в исследованиях
RLS	Радар-дистанцетер
STR	Стратиграфическая система отчетности
SWE	Эквивалент воды снега (Snow Water Equivalent)
USAID	Агентство США по международному развитию
WGMS	Всемирная служба мониторинга ледников

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Современные климатические изменения носят характер глобального потепления. Негативные последствия этого процесса являются предметом озабоченности всего человечества. Особенно остро эта проблема стоит перед климато-зависящими Центрально-Азиатскими государствами, в которых велика роль гидроэнергетики и все земледелие является искусственно орошаемым. В их числе и Кыргызская Республика (КР). Как и все государства Центральной Азии (ЦА), КР испытывает серьезную потребность в знаниях о состоянии и эволюции гляциальных систем, поскольку именно ледники являются основным поставщиком пресной воды – важнейшего природного богатства, предопределяющего главные особенности национальной экономики и социальных нужд.

В советское время Киргизия отличалась весьма развитой системой наблюдений за состоянием ледников, однако после 1998 г. на территории КР не осталось ни одного регулярно наблюдаемого ледника. Были утрачены масс балансовые серии наблюдений, в том числе уникальные по своей продолжительности.

Современное развитие экономики КР, во многом ориентированной на горнодобывающую промышленность, гидроэнергетику и сельское хозяйство в зонах орошаемого земледелия, потребовало восстановить разрушенную систему наблюдений за колебаниями ледников и поступлением талых ледниковых вод в основные гидросистемы страны - озеро Иссык-Куль, Чуйскую и Ферганскую впадины. Перспектива восстановления регулярных наблюдений во многом вдохновлялась в последние годы Всемирной службой мониторинга ледников (г. Цюрих, Швейцария) с целью включения ледников Кыргызстана в глобальную базу данных.

Озеро Иссык-Куль имеет огромное значение для экономического развития КР. Иссык-Кульская котловина благодаря своему физико-

географическому расположению и уникальности озера Иссык-Куль является стратегически важной для народного хозяйства КР. Развитие сети санитарно-курортных учреждений и интенсификация хозяйственной деятельности на побережье озера Иссык-Куль, на самом озере и на его водосборе во многом зависят от воздействия изменений климата на водные ресурсы Иссык-Кульской котловины, на водный баланс озера и на его береговую линию.

Современные изменения климата и водных ресурсов Иссык-Кульской котловины уже в ближайшем будущем могут создать ряд серьезных проблем, требующих незамедлительного решения. В связи с этим важными задачами на современном этапе являются: установление закономерностей влияния климатических изменений на динамику ледников и водные ресурсы рек с целью разработки рекомендаций к их адаптации и последствиям.

Для устойчивого развития КР в условиях изменяющегося климата и для принятия своевременных адаптационных мер необходимо обобщение данных по изменению современных климатических условий и связанных с ними ледниковых и водных ресурсов. В связи с этим тема диссертационной работы представляется актуальной и значимой не только для КР, но и для сопредельных государств Центральной Азии. Актуальность темы исследования определяется большой научной и практической важностью принятия научно обоснованных мер по адаптации к климатическим изменениям в Иссык-Кульской котловине с целью сохранения всех ее природных ресурсов.

Однако имеет место явный недостаток исследований по проблеме влияния изменений климата на водные и ледовые ресурсы Иссык-Кульской котловины, не выработаны адаптационные меры в условиях изменяющегося климата. Влияние современного изменения климата заставляет по-новому взглянуть на весь комплекс проблем в Иссык-Кульской котловине, связанных с использованием природных ресурсов и экономической деятельностью. **Связь работы с научными программами и темами.**

Диссертационные исследования проведены в 2008-2018 гг. Они связаны с тематикой Института водных проблем и гидроэнергетики НАН КР по государственным программам "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов", "Стратегия развития Кыргызской Республики до 2020 г.", "Национальная стратегия устойчивого развития на период 2013-2017 гг." и подчинены требованиям Водного Кодекса Кыргызской Республики (2002) и Закону Кыргызской Республики "Об устойчивом развитии эколого-экономической системы «Иссык-Куль», а также с отраслевыми и программами Государственного агентства гидрометеорологии, Государственного агентства водных ресурсов Кыргызской Республики и тематикой исследований Тянь-Шанского высокогорного научного центра (ТШВНЦ). Работа выполнена в рамках проекта CHARIS «Вклад в сток Высокой Азии от льда и снега» USAID с Университетом Колорадо, Кооперативным институтом по исследованиям в области экологических наук (CIRES) и Национальным центром снега и льда (NSIDC) и проекта HYBYSS «Гидрологический баланс бассейна озера Иссык-Куль» совместно с Лабораторией LEGOS (Лаборатория исследования геофизики и космической океанографии) Обсерватории Средних Пиренеев (г.Тулуза, Франция).

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы – выявить влияние климатических изменений, происходящих в Иссык-Кульской котловине, на водные и ледовые ресурсы и выработать меры к их адаптации.

В процессе исследования были поставлены следующие задачи:

1. Обобщить имеющиеся сведения по гидрометеорологическим и гляциологическим параметрам Иссык-Кульской котловины и восстановить прерванные ряды наблюдений для установления динамики изменений климата в Иссык-Кульской котловине.



2. На примере многолетнего мониторинга опорного ледника Кара-Баткак (бассейн р. Чон-Кызыл-Суу) установить влияние современных изменений климата на деградацию оледенения, окружающего Иссык-Кульскую котловину.
3. Оценить влияние современных изменений климата на речной сток Иссык-Кульской котловины.
4. Изучить влияние современных изменений климата на озеро Иссык-Куль на уровень озера.
5. На примере бассейнов рек Чон-Кызыл-Суу и Жууку дать оценку негативного воздействия изменений климата и выработать адаптационные меры к современным климатическим изменениям.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

В работе проведен комплексный анализ и установлен тренд современных климатических изменений Иссык-Кульской котловины и связанных с ними изменений водных и ледовых ресурсов, в частности:

- обобщены и проанализированы основные климатические характеристики (температура и влажность воздуха, атмосферные осадки) по результатам восстановленных 70-летних рядов метеорологических наблюдений и установлены тренды их временных изменений;
- на примере ледника Кара-Баткак изучена динамика ледниковых изменений в Иссык-Кульской котловине (абляция, аккумуляция, снегонакопление, баланс массы ледников и отступление ледников);
- изучена динамика изменений водности рек на примере р.Чон-Кызыл-Суу;
- установлены закономерности колебания уровня озера Иссык-Куль за весь период наблюдений;

- на примере бассейна реки Жууку выработаны адаптационные меры к негативному воздействию на водные ресурсы Иссyk-Кульской котловины.

**Практическая значимость результатов.** Полученные результаты исследования рекомендованы при разработке народнохозяйственных проектов по рациональному использованию природных ресурсов Иссyk-Кульской котловины.

**Экономическая значимость результатов.**

Разработанные адаптационные меры к изменению климатических условий Иссyk-Кульской котловины могут быть полезны при проведении природоохранных мер и позволят сэкономить средства при проектировании строительства рекреационных сооружений.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Восстановленный непрерывный ряд гидрометеорологических параметров и масс-балансовых показателей ледников за период пропуска наблюдений в 1998-2013 гг.
2. Выявленные тренды изменчивости климатических, гляциологических и гидрологических параметров за последние десятилетия.
3. Влияние деградации оледенения на изменение стока рек.
4. Связь изменения уровня озера Иссyk-Куль с деградацией оледенения, стоком рек и изменением климата.
5. Адаптационные меры Иссyk-Кульского региона к ожидаемым изменениям климата.

**Личный вклад соискателя.** Диссертационная работа выполнена автором единолично на основе проведения многолетних исследований. На основе анализа научной литературы и имеющихся гидрометеорологических и гляциологических данных автор лично определил проблему, цели и задачи исследования, выбрал пути их решения, провел большой объем теоретических исследований и их анализ, сформулировал выводы и

рекомендации. Проведенные автором исследования базируются на данных наблюдений сети станций Иссык-Кульской котловины, на многочисленных архивных материалах Тянь-Шанской физико-географической станции (ТШФГС) (1948-2006 гг.) [1-4], а также на полученных инструментальными методами и обработанных автором данных Тянь-Шанского высокогорного научного центра (ТШВНЦ), руководителем которого он является с 2014 г.

**Апробация результатов исследования.** Результаты работы были озвучены автором в докладах на следующих научно-практических конференциях и семинарах: ежегодные доклады на встречах проекта CHARIS (*Contribution to High Asian Run off from Ice and Snow/Вклад льда и снега в сток Высокой Азии* по изучению водно-ледовых ресурсов высокогорных районов): Покхара, Непал, 1-2 декабря 2013 г.; Дехрадун, Индия, 12-14 октября 2014 г.; Алматы, Казахстан, 14-18 мая 2016 г.; Нагаркот, Непал, 8-9 апреля 2017 г.; Тхимпху, Бутан, 5-7 июня 2018 г.; Международная научно-практическая конференция «Влияние изменения климата на состояние снежно-ледовых и водных ресурсов», Чоктал, Иссык-Куль, 10-11 сентября 2014 г.; Международный научный симпозиум "Экология и охрана окружающей среды аридной зоны Центральной Азии - 2014", 07-13 декабря 2014 года, Шэньчжэнь, Китай; семинар STIdays "Изменение климата и управление водными ресурсами в международной перспективе" в рамках проекта INCO-NET CA, Париж, 17-18 марта 2015 г.; Международная научная конференция "Проблемы снижения риска возникновения стихийных бедствий и адаптации к изменениям климата в Центральной Азии", 11-13 августа 2015 г., г.Чолпон-Ата; Международная конференция к 100-летию Института географии РАН "Практическая география и вызовы XXI века", Москва, Россия, 4-6 июня 2018 г.; в Научно-исследовательском институте по предотвращению стихийных бедствий, Университет Киото, Япония, 14-18 июня 2018 г.; Симпозиум Глобальные вызовы «Озеленение Гималаев - последствия таяния льда» Бристольский

гляциологический центр Института Кабот, Университет Бристоль, 26-27 июня 2018 г.; Международный учебно-практический семинар “Мониторинг и изучение экосистемы Центральной Азии: результаты и научно-практическое применение” Бозбешик, Иссык-Куль, 26-30 августа 2018 г.; Международный семинар, посвященного Всемирному дню воды и Международному десятилетию действий «Вода для устойчивого развития 2018–2028 гг.» по результатам выполнения проекта USAID PEER-454 «Отклик водных ресурсов на изменение климата и динамику ледников в трансграничных речных бассейнах Центральной Азии» Бишкек 25-27 марта 2019 г.

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** По теме диссертации опубликовано 17 научных статей в научных изданиях КР и за рубежом, рекомендованных ВАК КР, с общим Impact factor 26,067 балла.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы из 203 названий и 3-х приложений. Объем диссертации 186 страниц, включая 15 таблиц и 51 рисунок.

**Благодарности.** Автор выражает свою признательность и благодарность за помощь в подготовке работы к защите своему научному руководителю академику НАН КР и АН РТ д.т.н. Маматканову Д.М.; сотрудникам ТШВНЦ; климатологу Романовскому В.В., математику, картографу и гляциологу к.т.н. Кузьмиченку В.А.; доценту кафедры Криолитологии и гляциологии Географического факультета МГУ к.г.н. Поповнину В.В.; ВРИО директора Сочинский научно-исследовательский центр РАН д.ф.-м.н. Рыбаку О.О.; проф. Ричарду Армстронгу и его команде из Университета Колорадо; проф. Ф. Хёрбрехсту и его команде из Свободного университета, Бельгия; сотрудникам лаборатории Legos; гидрологам лаборатории Hydrosciences; ученым Института экологии и географии АН КНР, Института метеорологии пустынь Администрации

Метеорологии КНР; профессору Кенже Танака и его команде из Университета Киото.

## **ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ИССЫК-КУЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ**

Изучению озера Иссык-Куль и его котловины посвящены многочисленные научные исследования и публикации. Наиболее важными по полученным научным результатам явились Иссык-Кульские экспедиции 1928-1932 гг. Академии наук СССР, Государственного гидрологического института, Отдела прикладной ихтиологии Государственного института опытной агрономии под руководством профессора Л.С. Берга [5-6]. Результаты наблюдений Иссык-Кульских экспедиций были обобщены в сводной работе “Озеро Иссык-Куль” под редакцией И.В. Молчанова [7]. В 1932 г. гидрологическим отрядом Киргизской комплексной экспедиции Академии наук СССР под руководством В.П. Матвеева были выполнены промерные, гидрологические и гидрохимические работы в восточной части оз. Иссык-Куль [8]. В 1933-1935 гг. геологические и геоморфологические исследования в котловине проводились под руководством профессора Ленинградского университета С.С.Шульца [9]. Была выполнена площадная геологическая съемка, установлено, что в формировании современного рельефа решающую роль играет тектоника. В 1947 -1950 гг. донные осадки озера Иссык-Куль и его заливов изучались экспедицией Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Академии

Наук СССР под руководством Д.Г.Сапожникова [10]. Обширный фактический материал по гидрометеорологии, биологии озера, по колебаниям его уровня, береговому рельефу систематизирован в монографии «Озеро Иссык-Куль» под редакцией Р.Д. Забирова [11].

В 1976-1981 гг. исследования водного баланса, гидрологического и гидрохимического режимов озера Иссык-Куль проводит экспедиция Государственного гидрологического института, Киргизское Управление по гидрометеорологии и контролю природной среды (УГКС) и Ново-Черкасский гидрохимический институт. Главный вывод, сделанный на основе этих работ, заключается в том, что современное падение уровня озера, в основном, обусловлено забором воды на орошение. В 70-80-х годах исследовательские работы по изучению палеогеографии Иссык-Куля проводит экспедиция Ленинградского Института озероведения под руководством профессора А.В.Шнитникова [12, 13].

В 1990 г. вышла в свет монография В.В. Романовского [14] «Озеро Иссык-Куль как природный комплекс», где обобщены многолетние гидрологические, геоморфологические, батиметрические и биологические исследования, климат, водообмен, причины падения уровня озера и другие проблемы. Частично влияние изменения климата на Иссык-Кульский бассейн освещено в монографии «Влияние изменений климата на горную экосистему Тянь-Шаня (на примере Иссык-Кульского и Чуйского бассейнов)» [15], изданной в 2014 г. Влиянию изменений климата на озеро Иссык-Куль посвятили свои научные работы Карамолдоев Ж. Ж. [16], Шихотов В. М. [17], Филипповская Л.В. [18], Маматканов Д. М. [19], Диких А. Н. [20].

Коллективом Тянь-Шанской физико-географической станции (ТШФГС) изучены условия таяния, движения и температурный режим высокогорных долинных ледников и их вещественный баланс; впервые даны детальные характеристики крупнейших ледников и ряда доступных

южных районов Тянь-Шаня; составлен первый атлас ледников Тянь-Шаня [20].

### 1.1. Современное состояние изученности особенностей Иссык-Кульской котловины

Начало систематических метеорологических наблюдений в Иссык-Кульской котловине относится к 80-м годам XIX века. В сентябре 1881 г. была открыта метеостанция (МС) Пржевальск (Каракол) [5], а в 1894г. на западе котловины в одноименном населенном пункте была открыта метеостанция Рыбачье (Балыкчи). Работой этих станций ограничивались метеорологические наблюдения на территории Иссык-Кульской котловины до конца 20-х годов XX столетия.

В 1928-1949 гг. а также в период интенсивного проведения гидрометеорологических наблюдений на территории Республики (1962-1979 гг.) в Иссык-Кульской котловине была открыта серия новых метеостанций и их общее количество достигло 15 (рис.1.1, табл.1.1).

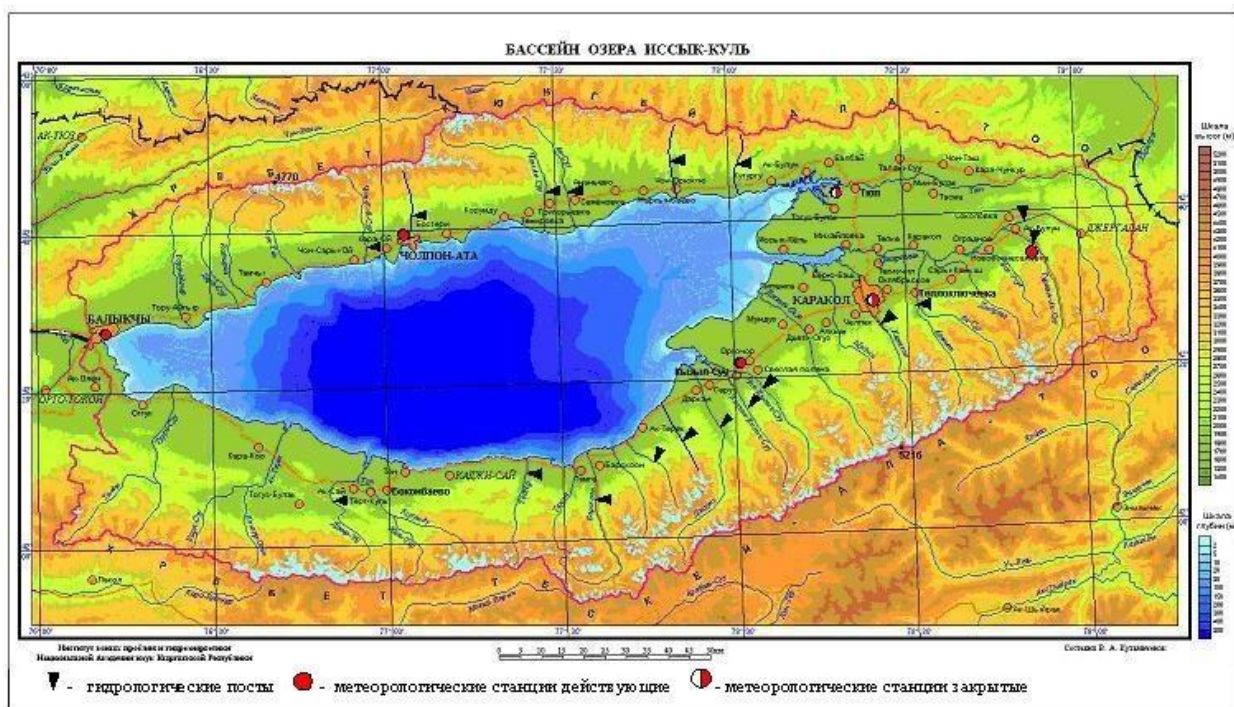


Рисунок 1.1- Гидрологические посты, действующие и закрытые метеорологические станции Иссык-Кульской котловины

Десять метеостанций располагаются на приозерной равнине, пять в зоне предгорий и на склонах, обрамляющих горные хребты, одна - Кара-Баткак 3420 - на леднике, одна – МС Сан-Таш - на перевале, замыкающем восточную оконечность котловины на стыке хребтов Кунгей- и Тескей Ала-Тоо.

Большой объем исследований климатических условий выполнен по программе Международного гидрологического года (МГГ) 1971 Тянь-Шанской физико-географической станцией и Управлением гидрометеослужбы Киргизской ССР [21, 22, 23].

Таблица 1.1.- Список метеостанций (МС), действовавших в Иссык-Кульской котловине в разное время

Метеостанция	Высота, м	Период работы, годы	Расположение
1. Койсары	1612	1928-1938, 1948-1955	Восточная часть котловины, урочище Койсары
2. Балбай (Красный Октябрь)	1645	1932-1999	Северо-восточная часть котловины, с.Балбай
3. Чолпон-Ата	1645	С 1928	Северное побережье оз. Иссык-куль, г. Чолпон-Ата
4. Балыкчы (Рыбачье)	1658	С 1894	Западная часть котловины, г. Балыкчи
5. Михайловка	1660	1935-1938	Восточная часть котловины, с. Михайловка
6. Тамга	1690	1936-1987	Южное побережье оз. Иссык-Куль, с. Тамга
7. Каракол (Пржевальск) (перенос МС №9)	1770 1716	1881-1943 1943-1997	Восточная часть котловины, г. Каракол Восточная часть Иссык-Кульской котловины, г. Каракол
8. Кызыл-Суу (Покровка)	1740	С 1951	Юго - восточная часть котловины, с. Кызыл-Суу
9. Каракол АМСГ (Пржевальск АМСГ)	1771	1932-1953	Восточная часть котловины, г. Каракол
10. Бокомбаевское	1800	1972-1999	Южное побережье оз. Иссык-Куль, с Бокомбаев
11. Теплоключенка	1920	1975-1987	Юго-восточная часть котловины, долина р. Арашан
12. Кырчын	2100	1980-1992	Южный склон хр. Кунгей Ала-Тоо, долина р. Ак-Суу



13. Сан-Таш	2236	1962-1999	Северо-восточная часть котловины, перевал Сан-Таш
14. Чон-Кызыл-Суу	2555	С 1947	Северный склон хр. Тескей Ала-Тоо, долина р. Чон-Кызыл-Суу
15. Чон-Ашуу	2794	С 1968	Юго-восточная часть котловины, долина р. Тургень-Аксу
16. Кара-Баткак 3300	3300	С 2015	Северный склон хр. Тескей Ала-Тоо, долина р. Чон-Кызыл-Суу
17. Кара-Баткак 3420	3420	С 2017	Северный склон хр. Тескей Ала-Тоо, долина р. Чон-Кызыл-Суу

Примечание: *МС Чолпон-Ата с 1933 по 1971 год была расположена в селе Курское (Сары-Ой), а в конце 1971 года была перенесена на 15 км к востоку - в г.Чолпон-Ата ближе к озеру. В 1956 году МС Балыкчи была перенесена от озера на 1 км к горам.и на 1 км.*

В процессе исследований были поставлены на учет 2720 ледников, занимающих площадь в 3908 км<sup>2</sup>. Собранные материалы опубликованы в семи частях каталога ледников 14-го тома всесоюзного издания «Ресурсы поверхностных вод СССР» [24]. В результате выполненной указанной программы взяты на учет все ледники Киргизии, площадь которых оказалось на 30% больше, чем полагали раньше, она составляет 8380,6 км<sup>2</sup>. Количество ледников превышает 40. По проведенным расчетам запасы пресной воды в ледниках достигают 650 – 700 млрд.м<sup>3</sup>, это в 13 раз больше среднегодового стока всех рек Киргизии вместе взятых.

В области изучения водных ресурсов получены данные об условиях формирования стока рек хребта Тескей Ала-Тоо, колебания уровня озера Иссык-Куль, стоке со склонов с поверхностей ледников, данные химизма, распределения атмосферных осадков» [25-30].

Вопросам динамики берегов озера Иссык-Куль посвящена работа В.Н. Коротаяева [31]. Монографии [32, 33], написанные коллективами авторов, обобщают основные результаты работ экспедиций, проводимых на озере.

С 2005 г. исследования уровня оз. Иссык-Куль с помощью спутниковой альтиметрии проводят французские ученые из Лаборатории геофизики океана Обсерватории Средних Перинеев Жан-Франсуа Крето, Стефан

Кальма, Паскаль Боннефонд, Фабрис Фернандез, Флёр Лиард, Феликс Перосанз [34, 35, 36]. Ими установлено, что положение уровенной поверхности озера определяется распределением масс и плотностей в Иссык-Кульской котловине. Окружающие озеро горные хребты Кунгей- и Тескей-Ала-Тоо, сложенные плотными коренными породами, обладают большими гравитационными силами, притягивающими водную массу озера к северу и югу. В связи с этим образуется уклон уровенной поверхности от берегов к центру озера. У северного берега, в районе Чолпон-Аты, градиент падения уровня достигает огромной даже для океанов величины - 20 см на километр, а разность отметок уровня у северного и южного берегов и в центре озера составляет 2,5 м. С помощью французских исследователей для коррекции показаний спутниковых альтиметров в Тянь-Шанском высокогорном научном центре установлена стационарная GPS-станция, а в Чолпон-Ате и на полуострове Кара-Булун - аппаратура для наземного мониторинга за ходом уровня Иссык-Куля.

## **1.2. Изученность изменения климатических параметров**

Климат в широком смысле есть обобщение состояний погоды, он представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и повторяемостей явлений за выбранный период времени. Все эти дескриптивные статистики называются *климатическими переменными*. Наиболее важными и популярными климатическими переменными, часто используемыми как индикаторы состояния и изменения климата, являются температура воздуха у поверхности земли и атмосферные осадки [37-40].

В качестве стандартного (базового) периода для оценивания климатических переменных, характеризующих текущий или современный

климат, по рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) используется период в 30 лет, в частности, период 1961–1990 гг. был сохранен как стандартный опорный период для долгосрочной оценки изменения климата [40]. В настоящее время продолжают использовать данный период в качестве базового, и среднее именно этого периода по умолчанию называют «нормой», а отклонение от нормы – «аномалией», хотя в последние годы в связи с наблюдаемыми изменениями климата активно высказывается мнение о целесообразности приближения базового периода к текущему моменту [40]. В настоящее время общепризнанными считаются три набора глобальных данных о температуре у поверхности земли (рис.1.2).

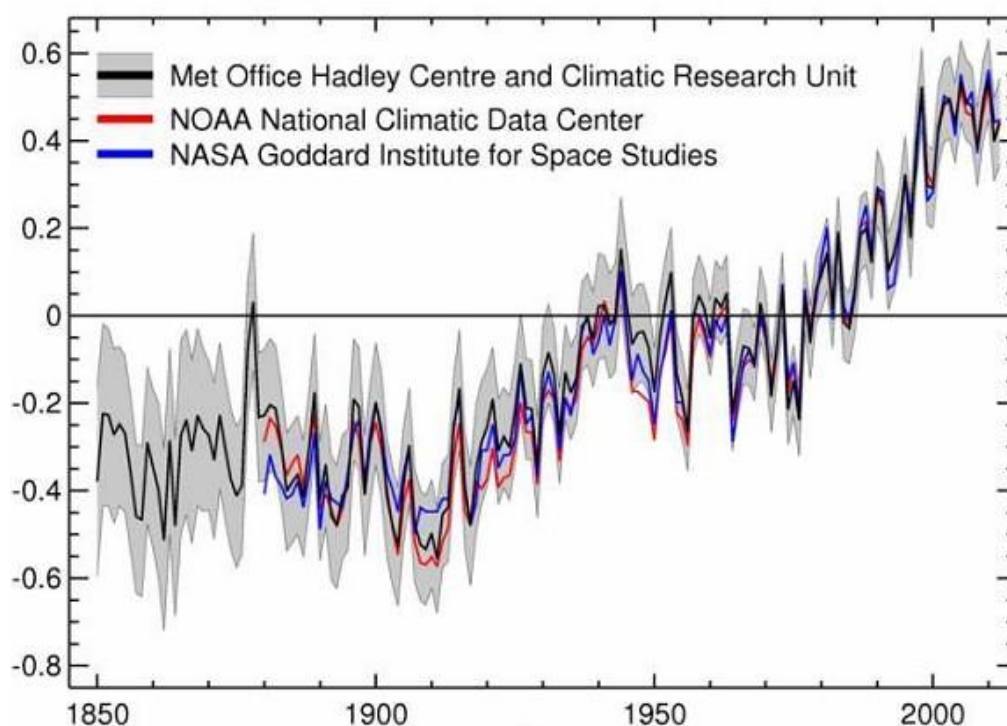


Рисунок 1.2 - Изменение среднегодовой глобально осредненной приповерхностной температуры по данным трех общепризнанных массивов данных (см. легенду). Цитируется по предварительному ежегодному заявлению ВМО о состоянии глобального климата [41] от 28 ноября 2012 г.

В их числе данные Метеорологического центра Хэдли по климатическим наукам и обслуживанию Великобритании [42], данные Национального

климатического центра США [43] и данные Института космических исследований США [44, 45]. Глобальная температура выступает здесь как *индикатор*, т.е. некий индекс, который отражает суммарное влияние всех внешних и внутренних факторов, завершившееся наблюдаемым изменением климата, а представленные региональные оценки характеризуют региональный вклад в одноградусное глобальное потепление.

Глобальная температура выступает здесь как *индикатор*, т.е. некий индекс, который отражает суммарное влияние всех внешних и внутренних факторов, завершившееся наблюдаемым изменением климата, а представленные региональные оценки характеризуют региональный вклад в одноградусное глобальное потепление.

В Иссык-Кульской котловине специальные комплексные климатические наблюдения проводятся в трех местах: в Тянь-Шанском высокогорном научном центре (ТШВНЦ) ИВПиГЭ НАН КР, на станции «Иссык-Куль» Кыргызского национального госуниверситета им. Ж.Баласагына (КНУ) и Лидарной станции в Теплоключенке Кыргызско-Российского Славянского университета (КРСУ).

В настоящее время наблюдения на МС Кызыл-Суу выполняются в системе Кыргызгидромета, а на гидрометеорологическом стационаре (ГМС) Чон-Кызыл-Суу наблюдения выполнялись только в период с 1948 по 1991 гг. С 2007 г. эти наблюдения были восстановлены на базе ТШВНЦ. С этого же времени метеонаблюдения выполняются и на леднике Кара-Баткак (бассейн р.Чон-Кызыл-Суу).

### **1.2.1. Исследование температуры воздуха**

Различия климатических условий разновысотных поясов гор весьма существенны. Так, интенсивность солнечной радиации возрастает примерно на 10% на каждый километр высоты [39]. Однако длинноволновое излучение земной поверхности с высотой увеличивается еще быстрее, поэтому

температура воздуха понижается в среднем на 0,5-0,6<sup>0</sup>С на каждые 100 м подъема в горы.

В таблице 1.2 приведены месячные и годовые высотные градиенты температуры воздуха Иссык-Кульской котловины.

Таблица 1.2. - Месячные и годовые высотные градиенты температуры воздуха в Иссык-Кульской котловине, <sup>0</sup>С/100 м [39]

Регион	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Иссык-Кульская котловина	0,76	0,72	0,7	0,71	0,68	0,7	0,72	0,71	0,7	0,7	0,73	0,75	0,72

Из табл. 1.2 следует, что среднее значение вертикального температурного градиента воздуха Иссык-Кульской котловины колеблется вокруг среднего значения 0,72<sup>0</sup>/100 м. Вероятно, это связано с отсутствием зимних инверсий температуры воздуха в западной части Иссык-Кульской котловины.

По данным Сумароковой В.В [46], на ледниках Ала-Арчинского бассейна на 1<sup>0</sup>С положительной температуры воздуха приходится стайвание льда в среднем 7,2 мм вод.экв. Полученные данные по Ала-Арчинскому бассейну согласуются с данными В.Л.Шульца [9] и других авторов[47], занимающихся аналогичными расчетами (7 мм вод.экв. на 1<sup>0</sup>С положительной температуры). Однако стайвание снега в пересчете на воду на 1<sup>0</sup>С положительной температуры, по данным наблюдений на ледниках Адыгене и Ак-Сай, колеблется в пределах 3,7-4,0 мм [46], что ниже величины (5 мм), которую дает В.Л.Шулец. Это может свидетельствовать как о недостаточно надежном методе теоретических расчетов, не подкрепленных результатами наземных наблюдений, так и о недостаточно продолжительном ряде наблюдений на ледниках Адыгене и Ак-Сай. Подобные расчеты должны быть подтверждены дополнительными наземными наблюдениями.

### 1.2.2. Изученность влажности воздуха

Вопрос о соотношении локальных и региональных осадков в Иссык-Кульской котловине является одним из главных при рассмотрении водного баланса и причин многолетнего понижения уровня озера. Многолетнее падение уровня Иссык-Куля, составившее с 1927 по 1997 гг. 2,56 м [48] позволяет утверждать, что в это время в процессе влагообмена вынос влаги из котловины преобладал над ее поступлением извне, а после 1997 года, наоборот, подъем уровня свидетельствует о том, что вынос влаги из котловины стал меньше ее привноса.

На территории Кыргызстана в тропосфере на высотах свыше 3-5 км преобладает западный перенос воздушных масс. В орографически изолированной Иссык-Кульской котловине внешний влагообмен осуществляется в основном через пониженные участки рельефа в хребте Кунгей Ала-Тоо на западе и через перевал Сан-Таш на востоке. Проникающие в Иссык-Кульскую котловину на западе атмосферные холодные фронты отдают влагу на наветренном склоне хребта Кунгей-Ала-Тоо, обращенного в Кеминскую долину. Преодолев хребет, холодный воздух под воздействием силы тяжести низвергается вниз, приобретая при этом скорость штормового ветра. В городе Балыкчи скорость западного ветра, именуемого местными жителями «Уланом», достигает 35-40 м/с. При спуске с гор холодный воздух иссушается, а при продвижении на восток постепенно насыщается парами озера Иссык-Куль. На востоке котловины в бассейнах рек Тюпа, Джергалана, Тургень-Ак-Суу, Ак-Суу на склонах горного барьера выпадают обильные осадки, а преодолев его через перевалы Сан-Таш и Чон-Ашуу озерная влага выносится за пределы котловины. При этом извне в котловину поступает воздух, менее насыщенный влагой, а выносятся из котловины воздушные массы, обогащенные влагой локального происхождения.

При мощных вторжениях в Северный Кыргызстан холодных фронтов северного и северо-западного направлений, характерных для осеннего

периода, воздушные массы проникают в котловину с запада и востока через перевал Сан-Таш. Западный и восточный штормовые ветры называется местным населением, соответственно, «Улан» и «Сан-Таш». При вторжениях с запада и востока воздушные массы теряют влагу на наветренных склонах, и проникают в котловину иссушенными, а при продвижении над акваторией озера они постепенно восстанавливаются и насыщаются озерной влагой. Таким образом, относительная влажность воздуха может служить хорошим индикатором динамики воздушных потоков в котловине.

Во время западных вторжений при спуске с гор холодный воздух северных румбов иссушается, и продвигаясь на восток котловины, постепенно насыщается парами озера Иссык-Куль. Поэтому метеорологические станции, регистрировали увеличение относительной влажности воздуха в направлении с запада на восток. Например, в 1990 году относительная влажность воздуха закономерно увеличивалась от среднегодового значения в Балыкчы 52% до 64 и 77% в Чолпон-Ате и на Сан-Таше, соответственно (рис.1.3).

### **1.2.3. Исследование атмосферных осадков**

Результатом взаимодействия оз. Иссык-Куль и окружающей его суши являются не только особенные температурные условия окружающей среды, но и своеобразие в распределении атмосферных осадков. В.Л.Шульц установил, что в горных условиях количество выпадающих осадков и величина стока зависят от высоты местности, ориентации хребтов по отношению к влагоносным массам воздуха и местных особенностей синоптических процессов [9]. Воздушные потоки, попадающие в Иссык-Кульскую котловину из Чуйской долины, теряют на склонах гор большую часть переносимой влаги и попадают в котловину озера Иссык-Куль сухими, не доходя г.Балыкчы. По мере продвижения на восток воздушные фронты

постепенно насыщаются влагой. В г.Балыкчы выпадает за год 119 мм осадков, в 60-70 км на восток их количество удваивается, а на северо-востоке Иссык-Кульской котловины на метеостанции Балбай (Красный Октябрь) количество осадков увеличивается до 583 мм и достигает 860 мм в районе перевала Сан-Таш [37]. Во всех случаях по мере увеличения высоты увеличивается количество осадков локального.

Во внутригодовом распределении осадков Иссык-Кульской котловины имеются значительные различия. На метеостанциях, расположенных в предгорной и горной частях котловины (Чон-Кызыл-Суу и Кара-Баткак), наблюдается одномодальное распределение осадков с максимумом в июле, а на метеостанциях, расположенных в приозерной равнине (Кызыл-Суу, Чолпон-Ата и Балыкчы), отмечается безмодальное распределение осадков [37]. Для этой территории, особенно для высокогорного и нивального поясов, характерен максимум осадков в летнее время и незначительное их количество зимой. Последнее связано с тем, что низкие зимние облака, образующиеся на высотах менее 3000 м, задерживаются горными хребтами и почти не проникают в Иссык-Кульскую котловину.

Есть данные о том, что увеличение альбедо, наблюдаемое при уничтожении лесного покрова, приводит к уменьшению атмосферных осадков. В результате природная среда деградирует по схеме: обезлесение, осаваннивание, опустынивание [49]. В горных лесах Прииссыккуля изучались гидрологические последствия облесения водосборных бассейнов [49]. Здесь в условиях горного климата и выраженной цикличности влажных и засушливых лет проявилась своеобразная специфика гидрологических последствий изменения лесистости. Для влажных циклов прослеживалась тенденция снижения стока с ростом лесистости, а для засушливых, наоборот, отмечалось снижение эвапотранспирации и рост суммарного стока.

П.Н.Пономаренко [50] и А.А.Григорьев [51] выявили сложную зависимость количества атмосферных осадков от высоты. В бассейне р.Чон-



Кызыл-Суу наблюдается закономерное увеличение количества осадков по мере увеличения высоты в направлении от прибрежной зоны оз.Иссык-Куль к гляциально-нивальному поясу. Годовая сумма осадков в интервале высот от 1740 до 2555 м увеличивается на 28-31 мм на каждые 100 м, в интервале высот от 2555 до 3300 м высотный градиент осадков составляет 29-30 мм/100 м (рис.1.11) [52, 53, 54].

Определение доли местной влаги в осадках Иссык-Кульской котловины было выполнено сотрудниками Института водных проблем РАН по уравнению изотопного баланса [55]. По их данным, содержание влаги, испарившейся только с поверхности озера Иссык-Куль, составляет в атмосферных осадках бассейна озера от 22 до 52%.

Изучение содержания радиоактивного изотопа водорода - трития( $^3\text{H}$ ) в атмосферных осадках позволило сделать вывод, что в летние месяцы доля озерного пара в осадках, выпадающих в предгорной области котловины, составляет 30-50%, в то время как в высокогорной области, являющейся основной областью питания рек котловины, не превышает 5%. По результатам распределения изотопа кислорода  $^{18}\text{O}$  в водах Иссык-Кульской котловины был сделан вывод о том, что влагооборот котловины носит незамкнутый характер и что вклад местной (озерной) влаги в атмосферные осадки котловины не превышает 20% [55]. На вертикальном профиле МС Кызыл-Суу – МС Чон-Кызыл-Суу – ледник Кара-Баткак отмечается следующее процентное содержание озерной влаги: в с. Кызыл-Суу (высота 1740 м) – 35%, на ГМС Чон-Кызыл-Суу (2555 м) – 38%, на леднике Кара-Баткак (3400 м) – 6%.

#### **1.2.4. Изученность испаряемости воды**

В долинных и предгорных районах, где отмечаются высокие температуры воздуха и низкая влажность, величина испарения лимитируется количеством атмосферных осадков. В горных районах с высотой

увеличивается количество осадков, но понижается температура воздуха, возрастает его влажность и уменьшается величина испарения [57, 58]. Прибрежная равнина озера Иссык-Куль находится в различных ландшафтных зонах, определяемых величиной увлажненности.

Расчет величины годового испарения, выполненный В.А.Новаком [56], показал, что наименьшие ее значения (620-650 мм) отмечаются в центре озера, а наибольшие (930-960 мм) – в заливе Рыбачий. На востоке озера величина годового испарения составляет 780-840 мм. Одним из факторов, определяющим испарение с акватории озера является температура воды. Испарившаяся с акватории озера влага обогащает влагой западные потоки воздуха и выпадает в виде атмосферных осадков на восточную территорию котловины. Одним из факторов, определяющим испарение с акватории озера является температура воды. На западе озера в районе Балыкчи коэффициент увлажненности, рассчитываемый по соотношению атмосферных осадков и испаряемости, - как в пустынях, составляет 0,10, а на востоке озера в районе МС Балбай он - как в лесостепной зоне, составляет 0,80. В 1956 году МС Балыкчи была перенесена от озера на 1 км к горам. В связи с переносом изменился внутригодовой ход температуры и относительной влажности воздуха, определяющих расчетные значения испаряемости.

Перенос МС Чолпон-Ата в 1971 году вызвал в основном увеличение испаряемости во второй половине года – с июля по декабрь (рис.1.13). В первой половине года с марта по июнь изменения испаряемости были незначительными. До переноса станции в период 1933-1971 гг годовая испаряемость на МС Чолпон-Ата составляла 785 мм, а после переноса на 1 км ближе к озеру с 1972 по 2015 гг. она увеличилась до 951 мм [59].

На МС Кызыл-Суу в периоды 1961-1971 гг. и 1972-2015 гг. испаряемость не изменилась, что объясняется постоянным нахождением станции на одном и том же месте.

В холодном 1972 г. большая испаряемость наблюдалась на МС Кызыл-Суу, Тамга, Чолпон-Ата, расположенных в средней части озера с большими теплозапасами, низкая испаряемость наблюдалась на станциях, расположенных на западе и востоке озера (Балыкчи, Каракол и Балбай) с небольшими глубинами и малыми теплозапасами [59]. Испаряемость в центральной части озера составляла 907 мм, а на западе и востоке озера - 712 мм [59].

В холодном 1972 г. расхождения кривых внутригодового хода испаряемости на МС Балбай и Балыкчи и были незначительными, что составило 84 мм. В жарком 1997 г. месячные значения испаряемости на МС Балыкчи были значительно выше на 546 мм, чем на МС Балбай. Наибольшее расхождение испаряемости между холодным 1972 г. и жарким 1997 г. наблюдалось на менее увлажненной части Иссык-Кульской котловины -МС Балыкчи (601 мм), а наименьшее - на более увлажненной МС Балбай - 139 мм [59].

Согласно В.А.Ковде [59, 60], по величине коэффициента увлажнения (0,13), суммарному количеству осадков (133 мм), относительной влажности (56%), средней многолетней температуре воздуха (7,6<sup>0</sup>С) и испаряемости (1088 мм) западная часть Иссык-Куля относится к экстрааридной зоне, а Кызыл-Суу и Чолпон-Ата – в аридной зоне (перечисленные показатели 0,32-0,42; 59-65%; 7,0-7,8<sup>0</sup>С; 873-985 мм, соответственно). Чем выше испаряемость, тем ниже уровень озера. Таким образом, можно сделать вывод, что при глобальном потеплении климата наблюдается тенденции ксерофикации.

### **1.3. Изученность деградации ледников**

В последние десятилетия практически во всех районах Земного шара наблюдается существенное увеличение темпов сокращения ледников [61, 62]. При этом сравнительно небольшие по размерам горные ледники

зачастую оказываются более чувствительными к изменениям климата и реагируют на них гораздо быстрее, чем ледниковые покровы. Именно по этой причине вклад «малых» ледников в повышение уровня мирового океана в современных условиях наиболее значителен. За период 1994-2004 гг. он составлял 0,77-0,22 мм/год, в то время как вклад Гренландии и Антарктиды оценивается в 0,2-0,1 мм/год и 0,2-0,35 мм/год соответственно [63].

В ходе своей эволюции ледники претерпевают изменения колебательного характера. Колебания ледников, согласно [64], – это изменения геометрии (площади, толщины, длины) и морфологии ледников, сопровождающиеся отступанием или наступанием их языков. Вышеперечисленные показатели эволюции ледников зависят от климатических тенденций. Согласно С.В. Калеснику [65], изменчивость ледника является в большей степени продуктом климата. Рельеф же определяет распространение и форму оледенения. М.В. Тронов [66] приводит принцип соответствия, определяющий благоприятность форм рельефа для оледенения при соответствующих климатических условиях с коэффициентом соответствия:

$$A = \frac{S}{P}, \quad (1.1)$$

где,  $S$  – площадь снеговых поверхностей выше ELA, отнесенная к единице положения хребта, а  $P$  – положительная разность оледенения. Таким образом, чем выше  $A$ , тем более благоприятна для оледенения форма рельефа.

Основными причинами колебаний ледников являются:

- временная и пространственная изменчивость гляциоклиматических показателей при изменениях атмосферной циркуляции;
- направление (тренд) вековых изменений климата;
- размеры и типы ледников, их географическое положение;

- индивидуальная специфика (экспозиция, моренный покров, высота расположения бассейнов питания, положительная разность оледенения, инерция сохранения, пульсации и т.д.).

Индивидуальная специфика ледников объясняет несинхронность эволюции ледников в пределах одной ледниковой системы. Ледники неодинаково реагируют на изменения климата, проявляя «чувствительность». Малые формы оледенения реагируют быстрее крупных. Реакция выражается в периоде запаздывания отклика параметров ледника на изменения климата [67].

Отклик ледников на изменения климата наиболее ярко проявляется в колебаниях показателей годового баланса их массы, поэтому мониторинг баланса массы ледников является основой оценки современных и прогнозных изменений оледенения и их возможного влияния на окружающую среду и водные ресурсы. Определение баланса массы ледника в конечном итоге является основной задачей комплексных гляциологических исследований, так как появляется возможность прогнозировать тенденции развития оледенения на ближайшее будущее. Баланс складывается из прихода твердого вещества, куда входят твердые осадки, метелевый перенос снега, конденсация водяных паров, и расхода, основную часть которого составляет таяние ледниковой поверхности и испарение. Накопление твердого вещества тесно связано с процессом льдообразования. Обоснование выделения типов льдообразования и процессов, происходящих при этом, дано Г.А.Авсюком [68]. В дальнейшем, опираясь на материалы исследований, полученных в период МГГ, более детальную классификацию зон льдообразования дали Е.Н. Цыкин [69] и П.А.Шумский [70]. Известно, что накопление твердого вещества тесно связано с процессом льдообразования, так как только метаморфизм твердых осадков приводит к образованию льда, идущего на увеличение массы ледника.

Современный этап развития оледенения Внутреннего Тянь-Шаня характеризуется отступанием краевых частей ледников и уменьшением их

объема. Эта тенденция значительно ускорилась с 1977 г. [71]. В связи с этим особенно остро встает проблема изменения оледенения в аридных районах Центральной Азии, где ледниковое питание имеет существенную долю в стоке рек. Во внутренних районах Тянь-Шаня количество атмосферных осадков составляет всего лишь 300-400 мм, поэтому там ледниковое питание рек приобретает особую значимость. Согласно расчетам А.Н.Диких [72], для ледниковой составляющей в стоке р. Большой Нарын достигает 31,9%. По современным оценкам [19, 73], после 1972 г объем речного стока в пределах Киргизии увеличился в среднем на 6,2%. При расчете и моделировании стока необходимы точные сведения об изменении размеров оледенения. Такие сведения позволят реально оценить вклад различных составляющих уравнения водного баланса.

Для горного оледенения Земли характерна высокая чувствительность к климатическим изменениям. Они динамично реагируют на перемены в циркуляции или радиационном балансе. Климат района определяется положением Тянь-Шаня внутри Евразийского континента на 40-х широтах. Основное направление приноса влаги – северо-западное и западное. Для Внутреннего Тянь-Шаня большую роль играет барьерная составляющая окружающих его хребтов, которая формирует собственный микро- и мезоклимат [74]. Колебания климата отражаются на характеристиках внешнего массообмена самих ледников.

Первые работы по исследованию ледников Внутреннего Тянь-Шаня были начаты во второй половине XIX века [75], целенаправленно они проводились с начала XX века [76]. Во второй половине XX века стали проводить стационарные наблюдения за ледниками, включая измерения баланса массы [77].

В последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к изменениям оледенения Центральной Азии. Это связано в первую очередь с проблемой нехватки пресной воды, для решения которой требуются самые

современные оценки динамики оледенения. Такие оценки для Северного Тянь-Шаня были получены несколькими авторами [77, 78]. Средняя величина уменьшения площади ледников Заилийского Ала-Тоо оценивается в 30-35% за период с 1950 г. до конца XX века [79]. Для китайской части Тянь-Шаня величины отступления ледников несколько ниже - 13% за последние 37 лет [80, 81]. Для ледников Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня также существует ряд оценок изменения площади оледенения [82, 83, 84]. Однако у разных авторов в силу использования различной методики результаты существенно различаются. Так, для массива Акшыйрак сокращение ледников за период 1977-2003 гг. оценивается от -8,6% [83] до -23% [4].

Вопрос о влиянии на таяние загрязненности поверхности ледников золовым мелкоземом поднимался и исследовался многими авторами. На Центральном Тянь-Шане этим занимались Г.А.Авсюк [68] и Л.Д.Долгушин [84], в Джунгарском и Заилийском Ала-Тоо - Н.Н. Пальгов [85], А.Н.Диких и другие [53]. По данным В.Е.Сочеванова [86], щебень на поверхности ледников поглощает в 2,1-2,4 раза больше солнечной радиации, чем чистый глетчерный лед. Загрязненный лед плохо пропускает лучи и стлавает в основном с поверхности. Однако по мере того, как толщина моренного чехла возрастает и превосходит 2-7 см (вариация этого критического порога зависит от петрографии и гранулометрии морены, а также плотности её упаковки), эффект меняется на противоположный. При сплошном покрытии льда моренным материалом его таяние постепенно уменьшается с возрастанием мощности моренного покрова вплоть до полного прекращения таяния [87, 88, 89, 90]. Это объясняется тем, что наличие морены на льду способствует изменению структуры радиационного баланса: а) уменьшается альbedo, что приводит к росту поглощенной солнечной радиации; б) нагретые частицы морены излучают длинноволнового тепла больше, чем чистый лед. При увеличении степени заморенности до определенного

предела радиационный баланс поверхности льда возрастает, что вызывает усиление стаивания подморенного льда. Когда же моренный покров становится сплошным и мощным, существенная часть радиационного баланса затрачивается на нагревание моренного материала и таким образом не доходит до льда. Современные сведения об изменениях ледников Тянь-Шаня далеко недостаточны.

Сокращение масштабов горного оледенения в Центральной Азии обсуждается в научном сообществе на протяжении последних десятилетий, и этой теме посвящено огромное количество работ [91-95]. Характерно, что проблема привлекает внимание исследователей из стран, географически очень удаленных от региона, и, в отличие от России, не связанных с Центральной Азией ни общим прошлым, ни общим культурно-историческим пространством. В частности, интерес к оледенению Центральной Азии проявляют исследователи из Швейцарии, Германии, Австрии [92, 96, 97]. Это, с одной стороны, свидетельствует о глобализации научных исследований, а с другой – об осознании трансграничности проблемы сокращения горного оледенения, которая, в конечном итоге затрагивает экономику и социальную сферу многих государств региона, характеризующегося политической нестабильностью. Как одно из последствий ожидаемого к концу 21-го столетия сокращения в регионе осадков и ледникового стока возможно возникновение напряженной ситуации в средне- и долгосрочной перспективе. Изменение климата влияет и на ресурсы пресной воды, вызывает наводнения, оползни, засуху и другие стихийные бедствия. Ускоренное таяние ледников создает дополнительные риски для устойчивого развития и региональной водной, энергетической и продовольственной безопасности [98]. С учетом того, что, реки, берущие начало на склонах Тянь-Шаня, обеспечивают водой около 100 млн. человек [91], становится понятной обеспокоенность, связанная с текущим и прогнозируемым сокращением горного оледенения, так как последнее



обеспечивает значительную долю (до 70% в засушливые годы) речного стока [99].

Между тем в научном мире на повестку дня встали вопросы: как изменяется вклад талых ледниковых и снеговых вод в речной сток на фоне климатических изменений; насколько важно таяние снега и льда в сравнении с изменением осадков вследствие потепления климата? Для ответа на эти вопросы в Тянь-Шанском высокогорном научном центре при Институте водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Кыргызской Республики с 2007 г. начаты комплексные гляциологические и гидрометеорологические исследования в бассейне р. Чон-Кызыл-Суу (северный склон хребта Тескей-Ала-Тоо), позволяющие изучить процессы формирования стока с ледника Кара-Баткак, вывести закономерности и факторы, а также доли генетических составляющих стока, увязав их с метеорологическими условиями каждого конкретного года. Эти работы проводились под руководством автора.

Отступление долинных ледников северного склона хр. Тескей-Ала-Тоо началось в конце малого ледникового периода (Little Ice Age, LIA) – в середине XIX века [100]. Они находятся в стадии деградации и в настоящее время, т.е. отмечается повсеместное отступление их концов. Крупномасштабные карты, построенные по материалам фототеодолитных съемок 1955-1959 гг., позволяют судить о характере колебаний концов ледников. По данным Р.Д.Забирова [101] ледники бассейнов рек Каракол и Аксуу в 1956-1959 гг. в среднем за год отступали на 8-10 м. При этом за счет отступления невосполнимо терялось от 642 тыс.м<sup>3</sup> (ледник Колтор Восточный) до 1493,8 тыс.м<sup>3</sup> льда (ледник Аксуу).

Темпы деградации оледенения различных районов значительно различались. Существенны и временные различия. Так, скорость сокращения площади оледенения массива Акшыйрак в Центральном Тянь-Шане изменялась от 0,12% в год в период 1943-1977 гг. до 0,33% в 1977-2003

гг. [83]. Минимальными для гор Азии темпами сокращения площади (0,01-0,06% в год) в последние десятилетия XX в. отличалось оледенение Тибетского плато [102], а максимальными (0,80-0,83% в год) – оледенение северной периферии Тянь-Шаня [99]. В значительной мере это объясняется тем, что на юго-востоке Тибетского плато интенсивность солнечной радиации в зоне абляции ледников составляет лишь 1/6 от теоретически возможной, а конденсация превышает испарение, вследствие чего, интенсивность таяния льда составляет лишь около 3,2 мм/1°С, тогда как в Центральном Тянь-Шане она превышает 12,5 мм/1°С [103]. За период наблюдений 1957-1968 гг. на леднике Кара-Баткак средняя величина стаивания, приходящаяся на 1°С положительной температуры, составляет 7 мм [52]. Частые летние осадки, подавляющая часть которых в ледниковом диапазоне выпадает в твердом виде, способствуют «консервации ледников», поскольку то удельное таяние, которое приходится на 1°С, затрачивается в большей степени на стаивание летнего снега, существенно снижая тем самым интенсивность чистой абляции льда.

Основательную работу по анализу отступления, наступания и стационарности фронта ледников центрального региона Тянь-Шаня провел М.К. Кошоев [104], сопоставивший данные Каталога ледников СССР [105, 106, 107] 1970-ых гг. с Каталогом ледников Средней Азии [108] 1930 г. Автор указал на причины трудностей получения достоверных результатов, но, благодаря скрупулезному анализу, сделал вывод о том, что в первой половине XX века изменение ледников указанного региона происходило неоднозначно с преобладанием неярко выраженной тенденции к отступанию. Таким образом, с начала XX в. до 40-х годов происходило отступление ледников, которое усилилось к концу 50-х годов. С начала 1960-х до середины 1970-х гг. отступление замедлилось, и отмечались периоды короткого временного наступания (1962-1964 и 1974-1977 гг.). Гляциологическими наблюдениями в период МГД (1965-1974) руководил д.г.н. М.Б.Дюргеров, и

вот уже более 30 лет эти работы возглавляет доцент МГУ В.В.Поповнин. Под его руководством проведено изучение баланса массы горных ледников Кавказа, Тянь-Шаня и др.

Баланс массы ледников Тянь-Шаня принято рассчитывать с помощью либо стратиграфической системы STR, либо методом фиксированных дат FXD [109]. Однако Котляков В.М. и др. [110, 111] показали, что указания только системы явно недостаточно для анализа имеющихся данных. В каждой из этих двух систем баланс массы можно рассчитать разными подходами: 1. через зимний и летний балансы -  $(b_w, b_s)$  при STR,  $(b_x, b_y)$  при FXD; 2. через общую аккумуляцию и общую абляцию -  $(c_t, a_t)$  при STR,  $(c_a, a_a)$  при FXD; 3. через чистую аккумуляцию и чистую абляцию -  $(b_{nf}, b_{ni})$  при STR,  $(b_{af}, b_{ai})$  при FXD. Необходимость ссылки на использованный подход (не только на систему) вызвано тем, что как составляющие баланса, так и сам баланс массы, вычисленные разными подходами, не годятся для сравнения и совместного анализа без вынужденного пересчета, требующего к тому же дополнительной информации. И если ранее расчет через "зимний баланс" - "летний баланс" однозначно, но неоправданно относился к STR системе, а через "чистую" аккумуляцию - "чистую" абляцию - к системе FXD, то теперь отказ от такой жесткой приуроченности разных подходов к той или иной системе видится абсолютно верным [111]. Стратиграфическая система STR предполагает получение необходимых данных путем измерения полустационарных исследований, когда ежегодно смена "балансовых" лет происходит в один и тот же день - 1 октября, в отличие от системы фиксированных дат FXD. Принятая система охватывает не три варианта - STR, FXD и неопределенно-многозначительное ОТН ("иная система"), - а четыре: наряду с STR, FXD и ОТН выделяется комбинированная система СОМ. Основы СОМ заложены в работе Л.Мэйо, М.Майера и У.Тенгборна [112]. СОМ отличается от других систем максимально детальным измерением прихода и расхода вещества всего в переходные периоды

(весной и осенью). В канадско-норвежском масс-балансовом руководстве [74, 113] представлена еще одна система плавающих дат (floating -date system) FLD, которая также более приближена к реалиям полевых работ. В.Г.Ходаков [114] оценил точность масс-балансовых измерений в лучшем случае  $\pm 200-300$  мм.

Для наших условий Внутреннем Тянь-Шане (ВТШ) производство работы на ледниках из двух общепринятых в мире схем формирования баланса массы- стратиграфической STR и фиксированных дат FXD [109] - приемлема только первая.

#### **1.4. Общие гидрологические характеристики речного стока**

##### **Иссык-Кульской котловины**

Количество рек и временных водотоков, впадающих в Иссык-Куль, колеблется от 84 до 118. По подсчетам В.В.Романовского [39], основанным по карте масштаба 1:100000, на приозерную равнину втекает 101 рек и ручьев. Непосредственно в Иссык-Куль впадает 56 рек и ручьев. В один только Тюпский залив помимо самой реки Тюп впадает 19 ручьев. В связи с забором воды на орошение только 30 рек питают озеро в течение всего года.

Водность рек Иссык-Кульской котловины обусловлена не только площадью их водосборов и имеющихся там ледников, но и различием типов питания и местных климатических условий. Следует сказать, что в этой котловине имеет место резко выраженная различие климатических условий в широтном направлении: засушливая западная часть котловины и влажная восточная часть. С большими различиями этих особенностей связаны значительные различия гидрологических характеристик рек, и в первую очередь их водоносность

Согласно цифровой модели модуля стока рек, построенной Кузьмиченком В.А., в центральной части северного склона хр.Тескей Ала-

Тоо модуль общего стока на высотах 2000 м, 3000 м и 4000 м, соответственно, возрастает от 2,5 до 9,6 и 34,0 л/с/км<sup>2</sup> [115].

Суммарный среднегодовой приток из зоны формирования стока всех рек Иссык-Кульской котловины в период 1942-1972 гг. составил 118 м<sup>3</sup>/с [116], а в период 1973-2008 гг. - 128 м<sup>3</sup>/с [39]. Увеличение притока в последний период на 10 м<sup>3</sup>/с или на 8,5% можно отнести на счет увеличения ледникового стока.

Горный участок бассейна, расположенный выше выхода рек на приозерную равнину, называемая зоной формирования стока занимает участок гор от высот 2100-2000 м и выше площадью 12860 км<sup>2</sup>. Нижний участок бассейна, занимающий приозерную равнину, называется зоной рассеивания стока. Площадь этой зоны – 2762 км<sup>2</sup>.

Реки, стекающие с наиболее высокой центральной части этого хребта (р.Ак-Суу, Каракол, Джеты-Огуз, Чон-Кызыл-Суу, Джууку, Барскоон и др.), имеют среднемноголетние расходы воды 6,5-4,7 м<sup>3</sup>/сек при водосборной площади 300-560 км<sup>2</sup>. В западной части хребта гидрографическая сеть развита слабо. На северном макросклоне хр. Тескей Ала-Тоо площадь частных речных водосборов изменяется от 7,53 до 307 км<sup>2</sup>, в которых оледенение занимает от 0 до 62%; средневзвешенная высота водосборов варьирует от 2710 до 3840 м. Высокогорный пояс (3100-3500 м) занимает 54% площади зоны формирования стока. Слой суммарного стока рек в пределах этого пояса изменяется от 400 мм на западе котловины до 800-820 мм за год на ее востоке. Величина стока высокогорного пояса составляет около 80% от суммарного стока зоны формирования. Среднегорный пояс (2500-3100 м) занимает 29% зоны формирования стока. Здесь речной сток изменяется от 194 мм на западе до 325 мм/год на востоке котловины. Величина стока в этом поясе составляет 15% от суммарного стока зоны формирования. Низкогорный пояс (ниже 2500 до выхода рек из гор) занимает

17% площади зоны формирования. Слой стока рек колеблется здесь от 23-30 мм на западе котловины до 50-58 мм/год на ее востоке.

### 1.5. Изученность колебаний уровня оз.Иссык-Куль

Изучение процессов, определяющих колебания уровня Иссык-Куля, и прогнозирование его уровня важно для рекреационного использования прибрежных земель. В советский период регулярные наблюдения за уровнем и температурой воды озера Иссык-Куль проводились на озерных гидрологических постах (ОГП) и в открытом озере на термических вертикалях с измерениями температуры воды по глубине. В настоящее время наблюдения за уровнем озера и поверхностной температурой воды у берегов производятся Агентством по гидрометеорологии при МЧС КР на четырех ОГП - Тамга, Чолпон-Ата, Балыкчи, Койсары (рис. 1.3).

Регулярные ежемесячные наблюдения за температурой воды верхнего 100-метрового слоя воды на термических вертикалях, расположенных в различных частях озера производились в 1960 - 70-х годах. В 1980-х годах эти наблюдения были дополнены ежедекадными измерениями температуры верхнего 200-метрового слоя на разрезе Чолпон-Ата – Кольцовка.



Рисунок 1.3 - Пункты гидрометеорологических наблюдений на озере Иссык-Куль: МС – метеорологические станции, АМС – автоматические

метеорологические станции, ОГП – озерные гидрологические посты, 1-9 – станции наблюдений за температурой воды.

В 1981-1988 гг. регулярные наблюдения за температурой воды на больших глубинах выполнялись Кыргызским Управлением по Гидрометеорологии с борта научно-исследовательского судна «Молтур».

С 2010 г. Лаборатория береговых процессов ТШВНЦ выполняет работы по теме «Спутниковый мониторинг за уровнем озера Иссык-Куль» совместно с Лабораторией LEGOS Обсерватории Средних Перинеев (г.Тулуза, Франция) и с Лабораторией ВиГЭР ИВПиГЭ НАН КР. Целью работ было исследование хода уровня с помощью спутниковых радаров и разработка методов калибровки спутниковой информации. Использовались данные со спутников Topex-Poseidon, Jason, Jason-2, Sentinel-3, Jason-3, Jason-CS и SWOT. Для этого в офисе ТШВНЦ с. Кызыл-Суу установлены антенна и прибор GPS, на берегу озера Иссык-Куль в бухте Чолпон-Ата (западная) – лимниграф. На полуострове Кара-Булун - радар-дистанцетр RLS и на полуострове Кара-Ой установлены метеорологическая станция Vantage Pro и GPS-станция Topcon GB-1000. Эти приборы в автономном режиме регистрируют положение уровня озера и поверхностную температуру воды. В связи с тем, что колебания уровня бессточного озера Иссык-Куль определяются изменениями климата, было исследовано влияние современного потепления климата на составляющие водного баланса и на уровень озера.

С момента запуска спутников Topex / Poseidon и ERS-2 в 1992 году к настоящему времени спутниковой альтиметрии была подвержена поверхность озера Иссык-Куль следующими спутниками: GFO (GeosatFollowOn), Jason-1,2,3, Envisat, Cryosat-2, Saral / AltiKa, Icesat-1 и Sentinel-3A. В настоящее время Sentinel-3B, Jason-CS / Sentinel-6 и IceSat-2 также измеряют уровень озера Иссык-Куль. Для миссии спутника SWOT, которая будет запущена в 2021 году, озеро Иссык-Куль выбрано NASA и CNES (Национальный центр космических исследований - французское космическое

агентство) в качестве специализированного сайта Калибровки / Валидации [36].

### **Заключение по первой главе**

1. Проведен критический анализ изученности климатических особенностей Иссык-Кульской котловины.
2. Показана недостаточная изученность деградации оледенения ЦА в условиях изменяющегося климата.
3. Обоснована актуальность проведения детальных исследований для установления влияния климатических изменений на динамику оледенения, водные ресурсы и уровень озера Иссык-Куль.



## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных задач использованы как классические методы оценок влияния климатических изменений на природные процессы, так и инновации, разработанные в процессе выполнения исследований.

Объектом исследований является Иссык-Кульская котловина.

Предмет исследования - влияние климатических изменений на водные ресурсы бассейна оз. Иссык-Куль.

Методическая поддержка и научная консультация по гляциологии, гидрологии, геофизике и моделированию динамики ледников была оказана ведущими российскими (МГУ, РАН) и бельгийскими (Свободный университет Брюсселя) учеными.

### 2.1. Методы изучения климата и его параметров

Климат в широком смысле есть обобщение состояний погоды, и представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и повторяемостей явлений за выбранный период времени. Все эти дескриптивные статистики называются *климатическими переменными*. Наиболее важными и популярными климатическими переменными, часто используемыми как индикаторы состояния и изменения климата, являются температура воздуха у поверхности земли и атмосферные осадки [39].

Для обнаружения изменений климата использован статистический анализ всех накопленных за исторический период данных. Однако из-за отсутствия наблюдений за ряд лет на имеющихся метеостанциях и

гидропостах их пришлось либо восстанавливать классическими методами по рекам-аналогам, либо рассматривать отдельно разные периоды наблюдений.

В наших исследованиях были привлечены данные действующих в настоящее время и ранее существовавших метеостанций (см. табл. 1.1). Из всех вышеперечисленных метеостанций в настоящее время работают только 4: Балыкчи (Рыбачье), Чолпон-Ата, Кызыл-Суу (Покровка), Чон-Ашуу. На станциях Балыкчи и Чолпон-Ата ряды наблюдений были нарушены в связи с их переносом, соответственно, в 1958 и 1971 гг.

Длительные наблюдения в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу за метеорологическими параметрами и атмосферными явлениями проводятся с помощью специальных приборов на метеорологических площадках: МС Кызыл-Суу (1740 м, с 1951 г.); ГМС Чон-Кызыл-Суу (2550 м, с 1948 г.); МС Кара-Баткак (3300 м, с 1956 г.) и МС Кара-Баткак (3415 м, с 1956 г.).

На этих метеостанциях проводятся метеорологические измерения в стандартные сроки с дискретностью 3 ч. на следующей классической неавтоматизированной аппаратуре:

- термограф для непрерывной регистрации температуры воздуха;
- барометр для измерения давления;
- гигрограф для непрерывной регистрации влажности воздуха;
- анеморумбометр (или флюгер) для измерения скорости и направления ветра;
- суточный осадкомер Третьякова для измерения осадков.

Весь указанный выше перечень метеорологических наблюдений в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу параллельно реализовался установкой нами и использованием автоматических метеостанций (АМС): Кара-Баткак (3420 м); Кара-Баткак (3300 м); Чон-Кызыл-Суу (2555 м); Кара-Булун (1609 м), приведенных на рис.2.1-2.3. Дискретность круглосуточных измерений на них составляет 60 минут. Результаты наблюдений классических (аналоговых)

метеорологических станциях и постах при их сравнении с АМС должны обладать достаточной степенью точности и достоверности.



Рисунок 2.1- АМС WUSH-2010, 3300м



Рисунок 2.2- АМС Campbell Scientific, 3420м



Рисунок 2.3 - ГМС Чон-Кызыл-Суу: Метеобудка, суточный осадкомер Третьякова, АМС Vaisala, Li-cor и Campbell Scientific с SWE, 2555 м

Это достигалось нами путем использования однотипных, проверенных, одинаково на всех пунктах установленных приборов, проведением наблюдений по единой методике, в строго определенные сроки и в

определенной последовательности. Количество выпавших осадков и наблюдение за состоянием почвы проводятся в 8.00 и 20.00 ч по декретному времени. В 8.00 ч декретного времени ведутся наблюдения за снежным покровом [40].

Датчики современных АМС довольно надежны и долговечны, в случае выхода из строя они легко заменяются. Современные АМС могут измерять метеорологические величины с высокой временной частотой, вплоть до нескольких секунд, и без участия наблюдателя. Это открывает возможности для всестороннего анализа временной структуры метеорологических временных рядов. Получаемая с АМС информация обычно представляет собой совокупность синхронизированных временных рядов метеорологических величин. Поэтому параллельно с развитием систем измерения совершенствовался и математический аппарат, используемый для анализа временных рядов, получаемых от АМС.

Анализ временных рядов — это совокупность математико-статистических методов анализа, предназначенных для выявления структуры временных рядов и для их прогнозирования. К настоящему времени накоплены очень большие объемы данных, позволяющих проводить их всесторонний статистический анализ. Выполнение статистических расчетов, особенно для больших выборок, в настоящее время немыслимо без использования различных пакетов прикладных статистических программ. Особое место среди статистических пакетов занимают пакет «Statistica» и табличный процессор «Microsoft Excel». Библиотека последнего, содержащая 78 статистических функций, вполне достаточна для выполнения большинства стандартных методов статистической обработки данных [40]. Некоторые из них были использованы нами.

Использование АМС общего назначения увеличивает надежность информации о метеорологических величинах благодаря применению новых технологий и объективности результатов наблюдений и их обработки,

значительно сокращающих ошибки при ручном наборе и анализе данных. Кроме того, АМС позволяют получать метеорологические данные в труднодоступных и малообжитых районах. Станция имеет модульное строение, поэтому существует возможность расширять число датчиков в зависимости от поставленных задач.

Датчики и промежуточные измерительные преобразователи устанавливались нами на метеорологической площадке в соответствии с требованиями [40] для измерений: параметров ветра; температуры и влажности воздуха; атмосферного давления; солнечной радиации; температуры поверхности почвы; температуры почвы; атмосферных осадков; метеорологической оптической дальности; высоты нижней границы облаков.

В 2013 г. нами полностью восстановлен мониторинг современных изменений климата в 3-х разновысотных стационарах бассейна р.Чон-Кызыл-Суу:

1. Озерный Кара-Булун, приозерная зона, 1609 м;
2. Гидрометеорологический Чон-Кызыл-Суу, лесная зона, 2555 м;
3. Гляциологический Кара-Баткак, нивально-гляциальная зона, 3300 м.

Наблюдения на этом вертикальном профиле позволят изучить современную динамику изменения климата на различных высотах и уточнить разработанные глобальные климатические модели изменения климата в Центрально-Азиатском регионе. Следует отметить, что в настоящее время наблюдения на МС Кызыл-Суу выполняются в системе Кыргызгидромета, а на гидрометеорологическом стационаре Чон-Кызыл-Суу наблюдения выполнялись только в период с 1948 по 1991 гг. С 2007 г. эти наблюдения были восстановлены на базе ТШВНЦ. С этого же времени метеонаблюдения выполняются и на леднике Кара-Баткак (бассейн р.Чон-Кызыл-Суу).

Для мониторинга температуры и влажности воздуха на ГМС Чон-Кызыл-Суу с 1948 г. и леднике Кара-Баткак ещё в 1956 г. на высоте 3415 м была установлена метеобудка с недельными термографами и гигрографами, с

помощью которых велись и продолжаются в настоящее время наблюдения, а также с 2013 г. параллельно выполняются с помощью АМС. Для замера сезонных осадков нами используются суммарные осадкомеры, для суточных измерений - осадкомеры Третьякова, установленные на разных высотах бассейна р. Чон-Кызыл-Суу.

Основным материалом для анализа распределения атмосферных в Иссык-Кульской котловине служили данные наблюдений по 35 суммарным осадкомерам, установленным нами в бассейне р. Чон-Кызыл-Суу на высотах от 2000 до 4000 м, а также данные по осадкомерам сети гидрометслужбы.

Суммарные осадкомеры использовались для измерения общего количества сезонных осадков. Они состоят из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, объем которого достаточен для того, чтобы вместить сезонный сбор.

## 2.2. Методы гляциогидрометеорологических наблюдений

Одной из главных задач гляциологических исследований является изучение современного состояния оледенения и его эволюции в условиях изменяющегося климата.

Основной измеряемой величиной на леднике Кара-Баткак является его баланс массы за год. Эта величина вычисляется как алгебраическая сумма прихода вещества (аккумуляция) и его расхода (абляция) за период между двумя последовательными минимумами массы, обычно приходящимися в условиях ЦА на конец сентября.

При постановке масс балансовых наблюдений мы ориентировались на все имеющиеся в гляциологической практике схемы расчетов баланса массы, а именно [117] при стратиграфической системе отчетности STR:

- по годовым значениям аккумуляции  $c_t$  и абляции  $a_t$ ;
- по зимнему  $b_w$  и летнему  $b_s$  балансам;
- по чистой аккумуляции  $b_{nf}$  и чистой абляции  $b_{ni}$ .

Продолжительность периодов аккумуляции и таяния на ледниках ВТШ весьма существенно изменяется по годам. Для определения границ этих периодов использовались данные по МС Кара-Баткак, Сары-Тор и Борду. За начало периода абляции снега принималась дата устойчивого перехода через  $0^{\circ}\text{C}$  средней суточной температуры воздуха на нижней границе ледников. Абляция льда начинается несколько позже, когда обнажается конец языка от сезонного снега. Окончание периода абляции (или начало нового балансового года) соответствует времени полного покрытия ледника устойчивым снежным покровом и переходом средней суточной температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  в сторону отрицательных значений. В этот период, в последующие несколько дней, нередки возвраты тепла, которые, в целом, способны только увеличить влажность снежного покрова при отсутствии талого стока с ледника. Этот снег - начальная стадия формирования зимнего баланса массы ледника последующего балансового года.

Приходная статья баланса (аккумуляция) опирается на измерения максимальной высоты сезонного снежного покрова  $h$ , измеряемой при весенней снегосъемке в многочисленных промерных пунктах, и интегральной по вертикали плотности  $\rho$  снега в опорных шурфах. Обработка данных по 100 точкам зондирования и 8 снежным шурфам, выкопанным в разных высотных зонах, приводит к вычислению водного эквивалента в накопившемся снежном покрове и дальнейшей систематизации данных по 100-метровым высотным зонам (рис.2.13).

В 1956-1968 гг. на леднике Кара-Баткак поверхностная абляция измерялась реечным методом. Количество реек в отдельные годы на языке варьировало от 58 в 1958 г. до 15 в 1964 г. В 1961-63 гг. абляция измерялась и в фирновой зоне до высоты 3900 м [48, 118].

Аккумуляция в 1956-1997 гг. вычислялась косвенным путём, исходя из замыкания водного баланса [49]. В то время считали, что определение баланса ледника возможно только при наличии данных о стоке с фирновой

области. Авсюк Г.А. [68] объем стока с фирновой области принимал равным объему стока с языка ледника. При определении величины стока с фирновой зоны применялся метод водного баланса. Таяние в фирновой зоне определялось как разность между суммарным объемом воды, прошедшей через гидрологический створ, и объемом воды, образовавшейся в результате таяния льда на языке ледника и выпавших осадков на языке и склонах [49]. При определении баланса твердого вещества ледника за основу расхода принимались данные по стоку со всей поверхности ледника, а за основу накопления – количество осадков в фирновой зоне. Из 13-летней серии наблюдений на леднике Кара-Баткак (1985/86-1997/98 гг.), подход к расчётам компонентов баланса был идентичен нынешнему, а в остальные годы внутри периода 1957-1998 гг. до приостановки мониторинга применялся иной подход, делавший несопоставимыми величины аккумуляции и абляции с рассчитанными теперь.

В 2013 г. на леднике Кара-Баткак как наиболее изученном и репрезентативном для Тескей Ала-Тоо были возобновлены наблюдения: *гляциологические* (максимальные снегозапасы, абляция по всему леднику и линейное смещение фронтальной отметки ледника), *метеорологические* (температура, влажность воздуха и осадки) и *гидрологические* (измерение уровней и расходов воды в период абляции у истока р. Кашка-Тор).

Для расчёта баланса массы в конце весны и в начале осени предпринимались площадные снегомерные съёмки, охватывающие всю доступную площадь ледника и осуществляемые путём зондирования толщи сезонного снега металлическими щупами. В разные годы число промерных пунктов варьировало от 18 до 75 в области питания и 24 до 183 на языке.

Абляционные рейки на леднике Кара-Баткак забуривались на глубину от 4,5 до 6 м, в зависимости от высоты их расположения и скорости таяния льда. По мере вытаивания рейки перезабуривались на том же месте, и таким образом к концу абляционного периода получали суммарную величину



стаявшего льда на данном участке. Количество рек в отдельные годы на языке ледника Кара-Баткак было разным, и с 2007 по 2016 гг. оно было увеличено с 12 до 21 в высотном диапазоне 3300-3500 м. Кроме того, в 2015 г. в верхней части ледника, включая зону его аккумуляции, на высотах от 3600 до 4100 м было забурено еще 13 абляционных рек. Суммарные за сезон по каждой рейке величины абляции систематизировались по высотным 100-метровым зонам, после чего из массива зональных значений абляции выводилось итоговое значение абляции для всего ледника по принципу средневзвешенного, где в качестве весов выступали площади ортогональной проекции каждой высотной зоны. Положение фронтальной отметки ледника ежегодно в конце балансового года фиксировалось посредством детальной GPS-метрии по маршруту вдоль линии фронта. Схема расположения рек на леднике Кара-Баткак приведена на рис.2.4.

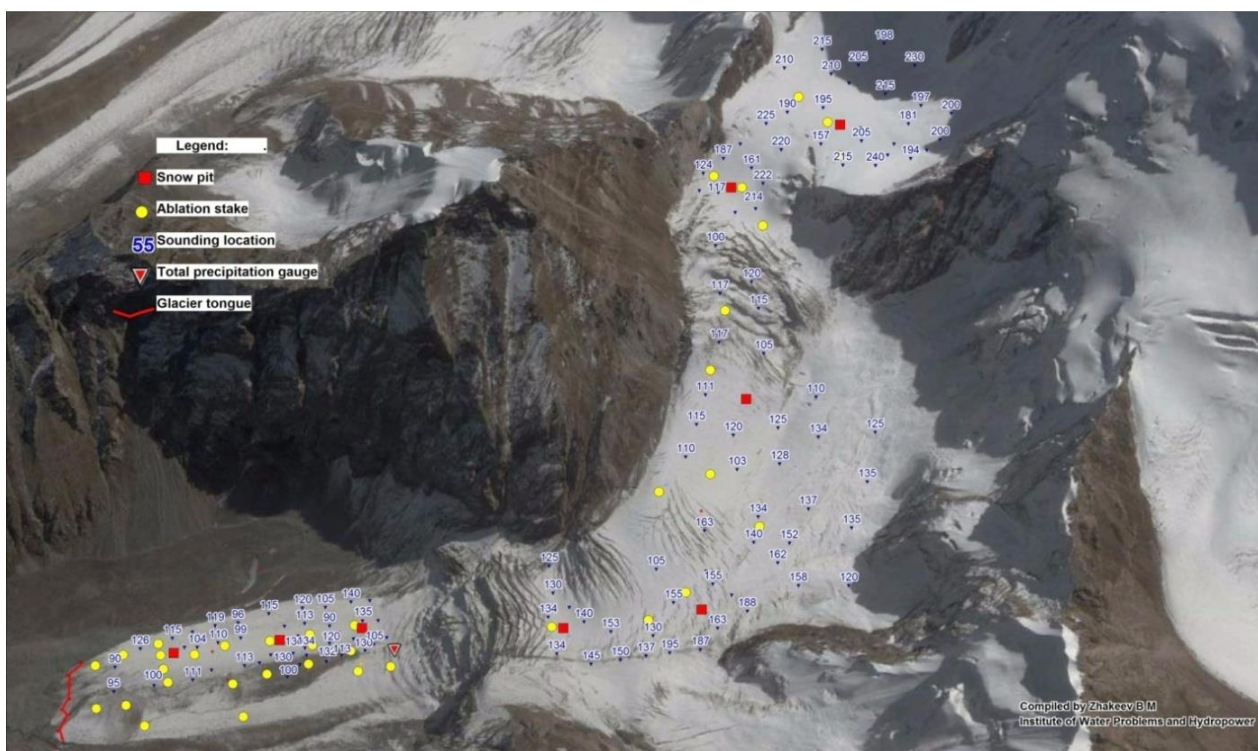


Рисунок 2.4 - Сеть пунктов измерений компонентов баланса массы на леднике Кара-Баткак

Для мониторинга температуры и влажности воздуха на леднике Кара-Баткак ещё в 1956 г. на высоте 3415 м была установлена метеобудка с недельными термографами и гигрографами, с помощью которых велись до 1998 г. и восстановлены наблюдение нами с 2008 г. в течение всего периода абляции. В сентябре 2016 г. на высоте 3300 м нами на месте ранее существующей (1961-1983 гг.) аналоговой МС УГМС Киргизской ССР была установлена автоматическая метеостанция WUSH-2010 (Jiangsu Radio Scientific Institute Co., Ltd) - рис. 2.1.

На самом леднике Кара-Баткак на высоте 3500 м в 2014 г. был установлен суммарный осадкомер, а в июле 2017 г. на высоте 3400 м - АМС Campbell Scientific, снабжённая ультразвуковым регистратором понижения тающей поверхности Sonic Ranger и видеокамерой, функционирующей в онлайн-режиме (рис.2.2).

На гидрометеостанции Чон-Кызыл-Суу на высоте 2555 м в 2012 г. установлена и функционирует АМС Vaisala и Li-cor с 3D акустическим анемометром и газоанализатором, а с 2017 г. - АМС Campbell Scientific (рис. 2.3), снабжённая ультразвуковым регистратором понижения тающей поверхности (Sonic Ranger), видеокамерой, функционирующей в онлайн-режиме, и регистратором водного эквивалента снега (Snow Water Equivalent sensor CPU).

### **2.3. Методы определения баланса массы ледника Кара-Баткак**

Для наших условий ВТШ производство работы на ледниках из двух общепринятых в мире схем формирования баланса массы-стратиграфической STR и фиксированных дат FXD [109] - приемлема только первая. После возобновления масс-балансового мониторинга в 2013/14 балансный год предпочтение было отдано подходу «зимний баланс – летний баланс» стратиграфической системы отчетности STR.

С 1956 года в долине Чон-Кызыл-Суу проводятся комплексные гидрологические и гляциологические работы по программе МГГ, ледник Кара-Баткак избран объектом постоянных масс-балансовых наблюдений. Велись работы по определению компонентов баланса массы гляциогидрологическим методом, особое внимание оказывалось гидрометеорологическим наблюдениям. Аккумуляция определялась по градиенту осадков ледниковой и неледниковой частей долины, а абляция вычислялась путем определения величины стока на замыкающем створе и величине таяния, измеряемой стационарно в средней части языка ледника. Соответственно, баланс массы ледника получали как остаток между величиной осадков в зоне накопления и стоком, определенном на замыкающем гидропосте Кашка-Тор-исток в 200 м от фронтальных морен [20, 52]. В 1956-1998 гг. на леднике Кара-Баткак поверхностная абляция измерялась речным методом через "чистую аккумуляцию" и "чистую абляцию" - ( $b_{nf}$ ,  $b_{ni}$ ) при STR [119].

В 1973 году программа наблюдений была скорректирована в рамках МГД. Комплекс работ, помимо гидрологических и гляциометеорологических наблюдений, дополнили ежегодные фототеодолитные съемки и геодинамические измерения и расчёты. Метеорологические наблюдения стали вести круглогодично (зимой с помощью самописцев), в летние периоды проводились актинометрические наблюдения и альбедосъемки поверхности ледника [120]. С 1973 года фототеодолитные работы проводились ежегодно, обновлена сеть базисов, плановая точность повысилась с  $\pm 4$  до  $\pm 0,21$  м. В 1975 году составлен план ледника Кара-Баткак в масштабе 1:5 000, по которому впервые точно установлена площадь ледника, зон аккумуляции и абляции, заморенных и открытых участков

Принятая ныне методика через "зимний" и "летний" балансы - ( $b_w$ ,  $b_s$ ) стратиграфической STR отчётной системы выполняется в следующем порядке. Методика расчёта баланса массы на опорных ледниках Кара-

Баткак, Сары-Торе и Борду относятся к категории стандартных и по идее не требуют дополнительных комментариев за исключением приведения базовых количественных показателей при организации наблюдений – числа реек, шурфов, снегомерных точек, периода и частоты измерений и т.д. В целом схема расчёта баланса массы сводится к методу площадных маршрутных снегосъёмов шурфах для вычисления приходной составляющей и методу реек для вычисления расходной. При выведении итоговых значений для отдельных высотных зон и для ледника в целом применялись вспомогательные приёмы географической экстраполяции на недоступные участки с привлечением данных о динамике снеговой линии и статистической базы данных предыдущих лет для использования гипотезы подобия полей балансовых характеристик. Параметры ледника, такие как площадь, аккумуляция, абляция, положение границы питания (ELA - equilibrium line altitude) и другие, измеряются множеством методов. Аккумуляция – совокупность процессов, ведущих к увеличению массы ледника, абляция – сумма процессов, ведущих к потере массы ледником [121].

Нами был использован наиболее точный и популярный метод определения аккумуляции и абляции, предложенный М.Б. Дюргеровым [122]. Он заключается в снегомерной съёмке по сети точек и денсиметрии в шурфах в период аккумуляции и в отсчетах по рейкам в период абляции.

Для анализа распределения массы по всей площади ледника его разбивают на высотно-морфологические зоны (ВМЗ). Это элементарные участки, которые характеризуются определенным высотным протяжением и однородностью условий рельефа по крутизне и экспозиции [123]. На рис 2.5 приведена схема такой разбивки для ледника Кара-Баткак по работам в 2017г.

Измерив аккумуляцию и абляцию в точках поверхности ледника, рассчитывались составляющие баланса для ВМЗ, а затем для всего ледника.

Баланс массы равен разнице суммарной аккумуляции и суммарной абляции:

$$bn = A_k - (A_b - F), \quad (2.1)$$

где,  $F$  – поправка на внутреннее питание [122].

**Зимний баланс (Аккумуляция).** Приход вещества  $A_k$  – это совокупность процессов, приводящих к нарастанию массы ледника:

$$A_k = X_t \pm L \pm V \pm D, \quad (2.2)$$

где,  $X_t$  – сумма твердых осадков;  $L$  – баланс процесса «испарение/конденсация» (изморозь, нарастающие осадки);  $V$  – поступление массы со склонов (лавинная подпитка, обрушение карнизов, псевдовязкое течение снега и пр.);  $D$  – метелевый перенос.

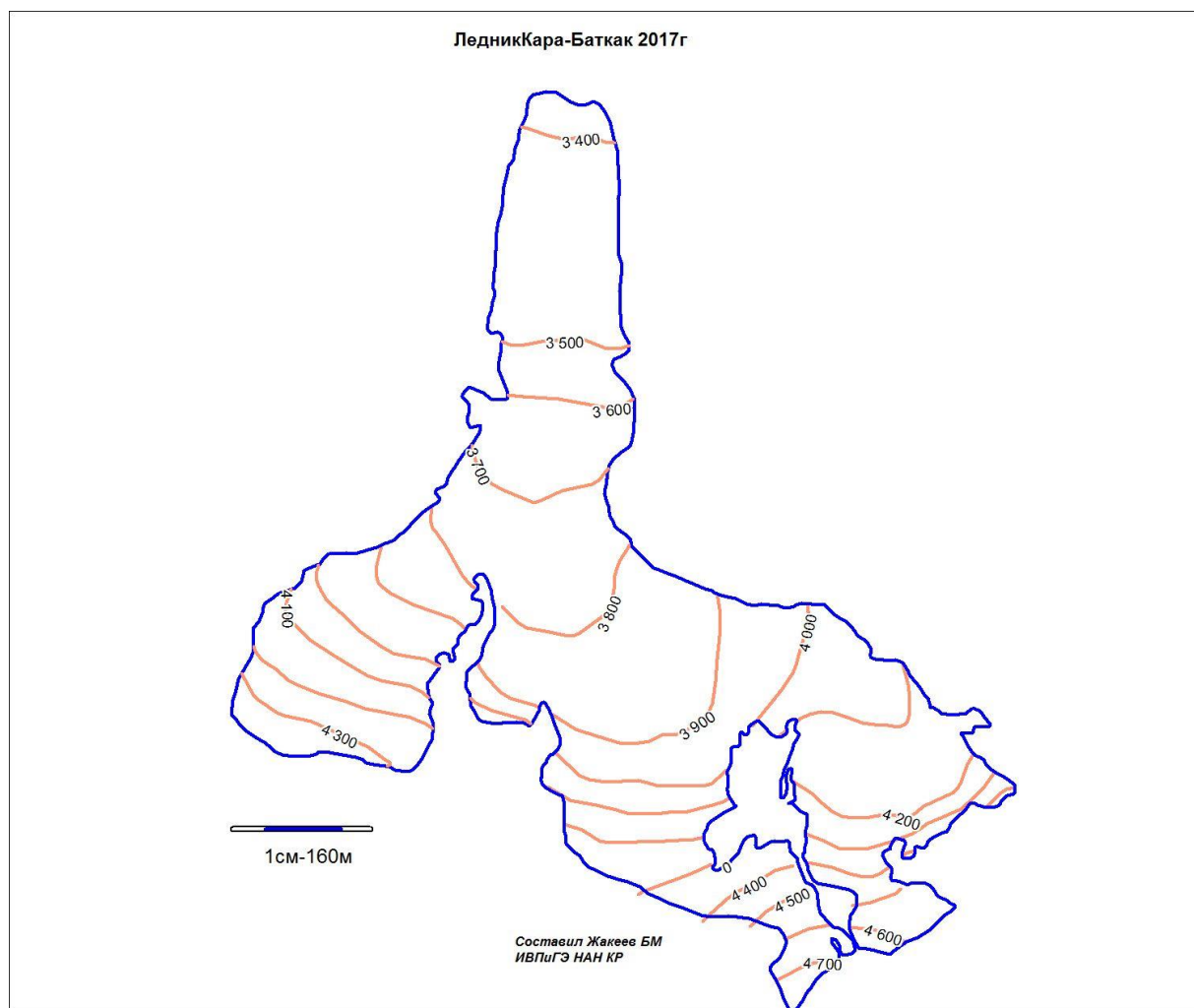


Рисунок 2.5- Высотно-морфологические зоны ледника Кара-Баткак, 2017 г.

Для определения величины аккумуляции проводилось снегомерное профилирование. Измерение высоты слоя снежного покрова определялось по нормали к склону с помощью металлических зондов-щупов. Реальную площадь поверхности склона для вычисления аккумуляции в единицах объема принимали в расчет с учётом косинуса среднего угла наклона [121]. Снегомерные работы в шурфе позволяли определить среднюю плотность снежной толщи для последующего пересчета аккумуляции в мм водного эквивалента. В шурфах уточняли толщину снежного покрова, тем самым уменьшая ошибки в определении границы «снег-фирн», связанные с наличием прослоев льда. С помощью зондов визуально контролировали толщину снега по обнажениям в трещинах и ледниковых мельницах. Измерения, резко отличающиеся от общего фона, отбраковывались и измерения проводились повторно. Так как снег на леднике подвержен процессам перераспределения, вариация мощности снежного покрова в пределах одной ВМЗ существенна. Поэтому шаг, с которым следует делать точки снегосъёмки, является функцией изменчивости аккумуляции.

Среднее значение абсолютной ошибки снегозапаса ( $\delta$ ) для конкретной ВМЗ определялось по формуле, предложенной Г.Н. Голубевым и М.Б. Дюргером [124]:

$$\delta = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (2.3)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение массива измерений,  $N$  – число промерных пунктов. Большое количество точек измерений увеличивает точность определения аккумуляции по высотно-морфологической зоне.

В области накопления ледника к концу балансового года остается нестаявший снежный остаток. Для замера его величины проводится снегомерная съёмка в конце сезона [122].

**Летний баланс (Абляция).** Абляция (Аб) – расходная составляющая баланса массы. Она зависит от множества факторов. Прежде всего это ряд

климатических факторов: суммарная солнечная радиация, зависящая от нее температура воздуха, влажность и осадки. Играют заметную роль и другие факторы: свойства поверхности ледника (альbedo, структура льда, микрорельеф, наличие трещин), площадь и мощность моренных отложений, экспозиция ледника, крутизна окружающих склонов, подток внутреннего тепла Земли и др.

Чистая абляция – общая потеря массы ледника за балансовый год. Режим ледников Тянь-Шаня преимущественно холодный, что обуславливает минимальный вклад подледниковой и внутриледниковой абляции. Поверхностная абляция является основным параметром измерений. Другая особенность режима Тянь-Шанских ледников – летние снегопады, которые могут затормаживать или даже прерывать процессы абляции [125]. Причем эта особенность все ярче проявляется с усилением степени континентальности.

Поверхностную абляцию определяли наиболее распространенным и точным методом – реечным. Суть метода состоит в наблюдении за понижением относительной поверхности снега, фирна или льда относительно уровня рейки [126, 127]. Точность измерения по рейкам  $\pm 5$  см. На леднике в конце зимнего сезона устанавливались рейки (по узлам сетки и ВМЗ). По сети наблюдается скорость истончения снежной толщи и изменения в её стратиграфии и плотности, что одновременно наблюдается и в шурфах. По мере освобождения поверхности ледника от снега, односекционные простые рейки заменяются на составные, многосекционные. Абляционные рейки на ледниках Кара-Баткак, Сары-Тор и Борду забуривались на глубину от 4 до 6 м, в зависимости от высоты их расположения и скорости таяния льда. Забуривание в лед производилось в начале теплого сезона сквозь еще лежащий снежный покров посредством парогенераторного бура HeuckeIce Drill. Схема расположения реек ледника Кара-Баткак приведена на рис.2.4. Количество реек в отдельные годы на языке ледника Кара-Баткак было

разным, и с 2007 по 2017 гг. оно было увеличено с 12 до 21 в высотном диапазоне 3300-3500 м. Кроме того, в 2015 г. в верхней части ледника, включая зону его аккумуляции, на высотах от 3600 до 4100 м было забурено еще 13 абляционных реек. Помимо наблюдений за абляцией на языке, рейки установлены в зоне аккумуляции, где наблюдается поверхностное таяние снега и фирна. Отсчёт по рейкам старались снимать раз в пентаду [128].

Для каждой высотно-морфологической зоны  $j$  рассчитывалась средневзвешенная по типу поверхности абляция ( $a_j$ ) [124]:

$$a_j = \frac{a_s S_s + a_i S_i + a_f S_f + a_m S_m}{S_j} \quad (2.4)$$

где  $S$  – площадь таяния разных типов поверхностей (лед  $i$ , фирн  $f$ , снег  $s$ , поверхностная морена  $m$ ).

По полученному набору зональных значений находилась абляция, средневзвешенная по всему леднику

$$A = \sum_{j=1}^n \frac{1 \cdot a_j S_j}{S_j} \quad (2.5)$$

Рассчитанные по приведенной схеме величины абляции по дробным интервалам времени в пределах периода таяния суммировались, и в итоге определялась величина абляции за сезон для всего ледника. Точность метода напрямую зависит от количества точек наблюдения (реек). Полученные данные о фактической величине стаявшего слоя льда пересчитывались в водный эквивалент по коэффициенту объемного веса 0,9.

**Внутреннее питание** (*декремент абляции, internal feeding*)  $F$  – компонент баланса массы, главный источник прогрева активного слоя ледника. Это повторное льдообразование за счет процессов инфильтрации ниже слоя аккумуляции текущего года, сублимации водяного пара и конжеляции [129]. Численные определения внутреннего питания ледников холодного фирнового типа льдообразования весьма сложны. В области аккумуляции проследить внутреннее питание можно с помощью сети



опорных шурфов, в которых необходимо регулярно определять мощность активного слоя и глубину инфильтрации вод. Наиболее точно она определяется по положению нижнего уровня нулевых температур путем термометрического зондирования толщи по главной стенке шурфа. Данные можно получить непосредственно при выработке шурфа и во время снегомерных съемок (по разности плотностей прослоев льда в толще).

Существует ряд формул для расчета льдообразования и оценки внутреннего питания ледников [23, 130]. Однако формулы носят оценочный характер и выводились относительно теплой фирновой зоны. Для холодных континентальных ледников Тянь-Шаня целесообразность её применения сомнительна.

По физической и гляциологической сути процесса внутреннее питание предпочтительнее рассматривать как недорасход абляции (именно поэтому в вышеприведенном уравнении баланса внутреннее питание вычитается из абляции). На ледниках морского и умеренно-морского типов внутреннее питание составляет 5-10% величины аккумуляции/абляции [110]. С ростом степени континентальности возрастает значение внутреннего питания: ледники Внутреннего и Восточного Тянь-Шаня находятся преимущественно в холодной инфильтрационно-рекристаллизационной (холодной фирновой) зоне, внутреннее питание здесь может достигать до 30-40% от годового прихода вещества [110].

Вопрос о количественной оценке внутреннего питания на данный момент плохо проработан. Для определенного ледника можно оценить величину декремента абляции на основе многолетних наблюдений за компонентами баланса массы. Например, во время мониторинга баланса массы ледника Сары-Тор велись ежегодные оценки внутреннего питания [131]. По полученным данным, внутреннее питание может достигать 35%, а наложенный лед – 15% от чистой аккумуляции.

Для холодных внутриконтинентальных ледников внутреннее питание и наложенный лед играют заметную роль. Если  $b_n$  положителен, то возрастает значение наложенного льда (идет инфильтрационно-конжеляционное льдообразование). В годы с отрицательными значениями баланса массы возрастает роль внутреннего питания, достигая величин 30-40% от чистой аккумуляции [110].

Положение фронтальной отметки ледника ежегодно в конце балансового года фиксировалось посредством детальной GPS-метрии по маршруту вдоль линии фронта для определения изменения нижней зоны ледника.

#### **2.4. Методы оценки водных ресурсов**

Систематические гидрологические наблюдения в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу велись ТШФГС с 1954 по 1968 г. на пяти гидрометрических створах, которые оборудованы на притоках р.Чон-Кызыл-Суу и находятся в зоне формирования стока в интервале высот 2650-3300м. Кроме того, в бассейне имеются два гидрометрических створа, принадлежащих УГМС Киргизской ССР (Лесной кордон 2000 м). На гидрометрическом створе Кашка-Тор-исток (3260 м) наблюдение велись в период 1956-1969 гг. В 2013 г. нами восстановлены гидрологические наблюдения на гидрометрическом створе Кашка-Тор-исток (рис.2.6) и в 2015 г. Кашка-Тор-устье (рис.2.7).

Основная цель гидрологических наблюдений – изучение гидрологического режима р.Кашка-Тор, в питании которой подавляющую роль играют талые воды ледника Кара-Баткак, а основным фактором, определяющим величину годового стока, является температура воздуха. Гидрологический режим изучался в анализе суточных, сезонных и многолетних колебаний уровня и расходов воды, температуры воды, ледовых явлений и т.д.



Рисунок 2.6 - ГП Кашка-Тор-исток, 3260 м      Рисунок 2.7 - ГП Кашка-Тор-устье, 2550 м

Поскольку р.Кашка-Тор вытекает из небольшого приледникового озера, расположенного у ледника, сток его несколько зарегулирован, т.е. талая вода сначала попадает в озеро, а затем в реку. Глубина и объём озера небольшие, ход уровня воды в озере и реке синхронный, они имеют тесную связь.

На указанных выше створах были установлены автоматические датчики уровня воды (логгеры), а параллельно продолжают наблюдения за уровнем по сваям. Частота измерений расходов воды зависит от амплитуды изменения уровня воды в реке, и должна освещать каждые 2-3 см роста или спада уровня. Результаты наблюдений на этих гидрометрических створах были использованы для построения гидрографов стока этой реки.

Для генетического вертикального расчленения гидрографа стока на источники формирования жидкой фазы была заимствована расчётная методика Г.Н.Голубева [123].

По данным двусрочных (8:00 и 16:00) наблюдений за уровнем подсчитывались среднесуточные уровни воды и по зависимости рассчитывались среднесуточные расходы воды ( $m^3/c$ ).

$$Q=f(H) \quad (2.6)$$

По расходам воды, среднесуточной температуре воздуха и суточным суммам осадков строился комплексный график, который позволил выделить источники формирования стока – снеговое питание (питание за счет

снегозапасов зимнего периода), ледниковое (за счет таяния ледника Кара-Баткак и питание за счет осадков теплого периода (июнь-сентябрь)).

Для целого ряда гидрологических задач большое значение имеет информация о генезисе вод, поступающих в русло реки в характерные фазы водного режима, за конкретные годы или многолетний период. От источников питания рек, их соотношения зависят: водность рек в период межени, половодья и паводков, экстремальные расходы воды и режим стока рек. Проблема изменчивости источников питания важна для прогноза характерных расходов воды в условиях изменчивости климатических условий. Особую сложность данная задача приобретает для горных рек с большой долей оледенения в бассейне. В этом случае в формировании стока реки участвуют воды, образующиеся в результате таяния льда и фирна с различных частей ледника; таяния сезонного снега как с ледниковой, так и с неледниковой части бассейна; летние дождевые осадки; подземные воды. Оценка роли и режима каждого из источников питания необходима для понимания механизмов формирования стока в высокогорных речных бассейнах. Для решения данной задачи в гидрологии рек часто используется метод расчленения гидрографа реки [132].

Метод генетического расчленения гидрографа на источники формирования стока заключается в следующем. По климатической классификации по источникам питания р.Кашка-Тор относится к смешанному типу, т.е. в формировании стока участвуют все источники питания – снеговое, ледниковое, дождевое и подземное. По гидрологическому режиму река относится к Тянь-Шанскому типу с двумя ярко выраженными пиками – половодье (июнь-сентябрь) и межень (октябрь-май).

Величина каждого источника питания определена в слое стока (мм) с поверхности (площади) ледника. Среднесуточный расход воды переведен в слой стока по формуле:

$$h = \frac{Q * T}{F * 10^3}, \quad (2.7)$$

где, Q - среднесуточный расход воды, м<sup>3</sup>/с; T- число секунд в расчетном периоде; F – площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Рассчитанный слой стока по среднесуточным расходам воды затем просуммирован за период снегового половодья, ледникового – июль-сентябрь. Дождевое питание определено как сумма всех осадков, выпавших на поверхность ледника за период июнь-сентябрь [133].

## **2.5. Методы восстановления прерванных рядов наблюдений климатических изменений**

Для восстановления полной картины влияния климатических изменений на природные процессы Иссык-Кульской котловины потребовалось провести анализ данных действующих в настоящее время и ранее существовавших метеостанций (см. табл.1.1).

Для расчета вертикальных градиентов температуры воздуха Иссык-Кульской котловины были использованы средние месячные значения температуры воздуха 11-ти метеостанций, находящихся на различных высотах, включая и МС Тянь-Шань, которая расположена за пределами котловины, но в непосредственной близости от ее южной границы ( см. рис.1.1).

Для изучения влияния глобального потепления на повышение температур воздуха в Иссык-Кульской котловине в разновысотных поясах была восстановлена температура воздуха по уравнениям связи МС Кызыл-Суу, МС Чон-Кызыл-Суу и МС Кара-Баткак. Для восстановления пропущенных дат МС Кара-Баткак (3300 м) нами были построены графики и рассчитаны уравнения связи средних месячных и годовых температур воздуха с МС Чон-Кызыл-Суу (2550 м). Пропущенные даты МС Чон-Кызыл-Суу восстановлены по уравнениям связи с большими коэффициентами

корреляции с использованием длинного ряда наблюдений на МС Кызыл-Суу (1740 м), которая действует с 1951 года.

По уравнению связи месячных осадков МС Кызыл-Суу и Чон-Кызыл-Суу нами были восстановлены значения месячных сумм осадков на МС Чон-Кызыл-Суу в период с 1992 по 2007 гг., когда наблюдения на этой МС были прерваны.

Испаряемость рассчитывалась по формуле Иванова Н.Н. [134]:

$$E=0,0018(25+t)^2*(100-a), \quad (2.8)$$

где  $t$ - средняя месячная температура воздуха,  $a$  – средняя месячная влажность воздуха. С 1957 г. на леднике проводились определения баланса массы гляциогидрологическим методом [135]. Однако в 90-е годы второй по продолжительности ряд масс-балансовых наблюдений был прерван. Восстановить наблюдения удалось только в 2013 году объединенными силами ТШВНЦ при ИВПиГЭ НАН КР и гляциологов МГУ им. М.В. Ломоносова. С 2017 года на леднике работает автоматическая метеостанция на высоте 3420 м. Она позволяет уточнить метеорологические условия существования ледника. По уравнению связи с МС Чон-Кызыл-Суу реконструирован ряд основных метеоэлементов на уровне языка ледника. Средняя многолетняя температура там составляет  $-3,3^{\circ}\text{C}$ , зимой температуры опускаются до  $-12-15^{\circ}\text{C}$ , а летом редко превышают  $+5..8^{\circ}\text{C}$ . Среднее многолетнее количество осадков 862 мм, что на 35% больше, чем на уровне МС Чон-Кызыл-Суу, что связано с высотным градиентом и благоприятствующей к воздушным массам экспозицией ледника.

В классическом представлении не существует ни одного метеорологического элемента, точно характеризующего основной результирующий параметр – баланс массы [136, 137]. В большинстве реконструкций восстановление  $bn$  опирается на независимую реконструкцию его компонентов – аккумуляции  $Ак$  и абляции  $Аб$ . Однако, в резко континентальных условиях Внутреннего и Восточного Тянь-Шаня основным

параметром, характеризующим и аккумуляцию, и абляцию выступает температура воздуха. В реконструкции пробела значений баланса массы на Леднике №1 1967-1979 гг. использовалась прямая связь баланса массы с температурой воздуха [138]. В реконструкции ледника Сары-Тор [139] отмечалась высокая степень связи между температурой воздуха и аккумуляцией (до 0,6), абляцией (0,9) и экспериментально напрямую с балансом массы (до 0,84).

Первичной информацией для реконструкции служили результаты прямых измерений компонентов  $b_n$  и длинные ряды метеонаблюдений МС Чон-Кызыл-Суу (2555 м), скоррелированные с данными АМС ледника Кара-Баткак (3420 м) и приведенные к единому ряду 1956-2018 гг. Годовые показатели основных метеорологических величин показывают определенные тенденции: несильное снижение осадков и небольшое повышение температуры воздуха за период 1956-2018 гг. Для классических реконструкций среднемесячные данные по температуре воздуха и осадкам подходят как нельзя лучше: чаще всего именно они используются для реконструкции значений абляции и аккумуляции.

Для расчета **аккумуляции** можно использовать сумму зимних осадков  $\Sigma X_w$ , средnezимнее атмосферное давление  $P_w$  и средnezимнюю температуру воздуха  $T_w$  [140]. Для повышения точности выходных данных возможно применение двухпараметрической зависимости. Например, для ледника ИГАН (Полярный Урал) аккумуляция рассчитана по  $T_w$  и  $P_w$ , для Туюксу – по  $T_w$  и  $X_w$ .

**Абляция** обычно лучше коррелирует с метеорологическими элементами. Однопараметрические соотношения  $Ab$  в основном связывают абляции с суммой положительных температур  $\Sigma(+T)$  за календарный год или со средnezимней температурой воздуха  $T_s$ . Для большинства ледников Земли именно баланс коротковолновой радиации  $B_k$  играет важную роль в формировании теплового баланса поверхности, однако такие наблюдения

проводятся не на каждой метеостанции, тогда как температура воздуха  $T$  наблюдается на всех метеостанциях. Она является показателем интенсивности всех составляющих прихода тепла и определяет продолжительность периода аблиции. Наиболее удачна и популярна формула Кренке-Ходакова для расчета аблиции:

$$A=(kt_s+c)^{n+\varphi}, \quad (2.9)$$

где,  $k$ ,  $c$ ,  $n$ ,  $\varphi$  – эмпирические параметры; по оригинальным данным [141]  $k = 1$ ,  $c = 9,5 \pm 1,5$ ,  $n = 3$ ,  $\varphi = 0$ . Возведение суммы в степень  $n \approx 3$  является следствием кубического соотношения между среднегодовой температурой и суммой положительных температур за год.

Различные исследователи модифицировали стандартную формулу Кренке-Ходакова. Модификация стандартной формулы предложена В.Р. Барбашем [142]:

$$A=1,33 (t_n+9,66)^{2,85} \quad (2.10)$$

однако по математической логике для её использования температура воздуха должна быть измерена до сотых долей градуса, что подразумевает использование современных приборов.

Для изучения влияния глобального потепления на повышение температур воздуха в Иссык-Кульской котловине в разновысотных поясах была восстановлена температура воздуха по уравнениям связи МС Кызыл-Суу, МС Чон-Кызыл-Суу и МС Кара-Баткак. Для восстановления пропущенных дат МС Кара-Баткак (3300 м) нами были построены графики и рассчитаны уравнения связи средних месячных и годовых температур воздуха с МС Чон-Кызыл-Суу (2550 м). Пропущенные даты МС Чон-Кызыл-Суу восстановлены по уравнениям связи с большими коэффициентами корреляции ( $R^2=0,808$ )

$$y=1,079x-5,391 \quad (2.11)$$

с использованием длинного ряда наблюдений на МС Кызыл-Суу (1740 м), которая действует с 1951 года (рис.2.8). По уравнению связи месячных



осадков МС Кызыл-Суу и Чон-Кызыл-Суу нами были восстановлены значения месячных сумм осадков на МС Чон-Кызыл-Суу в период с 1992 по 2007 гг., когда наблюдения на этой МС были прерваны.

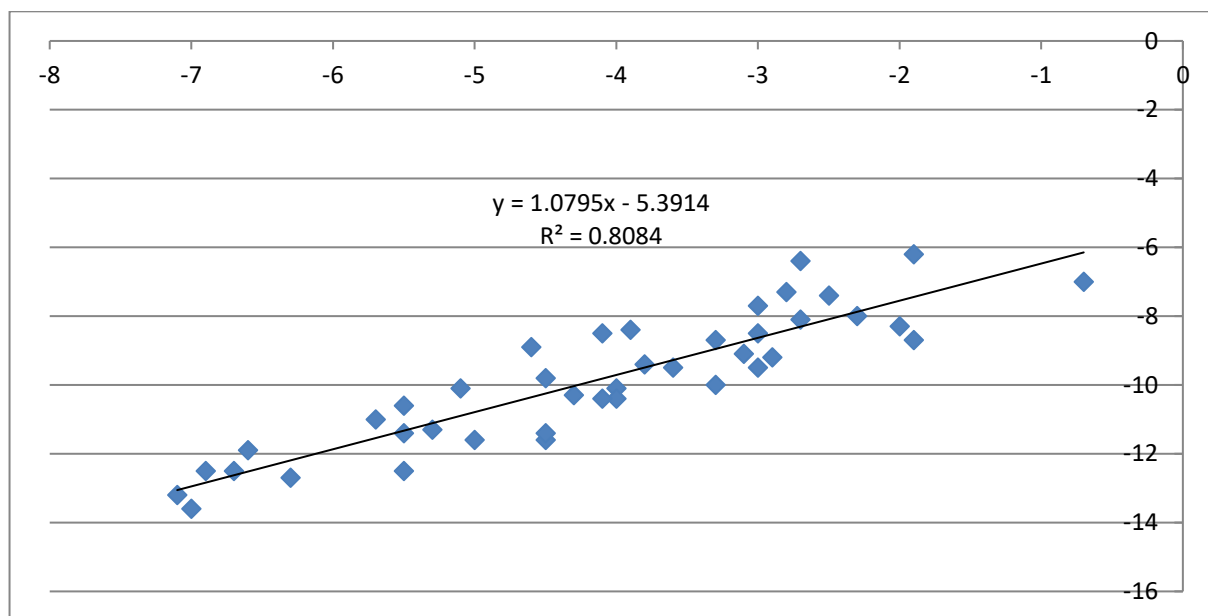


Рисунок 2.8 - Связь температуры воздуха ГМС Чон-Кызыл-Суу и МС Кызыл-Суу за период 1992-2006 гг.

**Испарение с акватории озера.** За рассматриваемый период испарение с акватории озера рассчитывалось по уравнениям В.А.Кузьмиченка [143] в несколько этапов. Сначала была рассчитана испаряемость по формуле (2.12), полученной для озера Иссык-Куль по цифровой математической модели:

$$E = [0,00005581(27,24 + T)^{3,0889}] [0,7956 + 0,1155Ne^{0,3279 * H}] [0,3622 + 0,00483P^{-0,9043}] \quad (2.12)$$

где,  $E$  - годовая испаряемость (мм);  $T$  – средняя годовая температура воздуха по метеостанциям ( $^{\circ}\text{C}$ );  $H$  – высота уровня озера (км);  $P$  – годовая сумма атмосферных осадков на акваторию озера (мм);  $e$  – основание натурального логарифма, равное 2,71828.

Доступность этого уравнения в том, что в него входят климатические параметры, которыми мы располагаем на современном этапе массового сокращения наблюдательной сети и объёма информации.

Но по этой формуле рассчитывается испаряемость в одной точке, а для расчета испаряемости с площади (акватории) озера В.В.Кузьмиченком выведена формула:

$$E_{\text{АКВ}} = E^*(1 - 0,029S), \quad (2.13)$$

где,  $E^*$ - испаряемость в одной точке (м), рассчитанная по формуле (2.12);  
 $S$  –площадь водоёма (тыс.км<sup>2</sup>), т.е. акватории озера = 6236,6 км<sup>2</sup>.

Средняя годовая температура воздуха, используемая в уравнении (2.12) рассчитывалась как средняя из данных наблюдений по действующим метеостанциям, перечисленным выше.

## **2.6. Методы изучения колебания уровня озера Иссык-Куль**

ТШВНЦ совместно с сотрудниками LEGOS проводит исследования уровня озера Иссык-Куль с помощью спутниковой альтиметрии. Эти работы заключаются в калибровке показаний спутниковых радаров [34]. Они включают GPS-измерения положения уровня с борта научно-исследовательского судна «Молтур», определение поправок на состояние атмосферы (температура и влажность воздуха, скорость ветра), определение поправок на состояние атмосферы по показаниям стационарной GPS-станции, установленной в офисе ТШВНЦ.

Мы использовали алгоритм, разработанный в LEGOS для определения высоты воды вдоль трассы спутника для корректирования измерения дальности от волнистости геоида с использованием техники повторного следа, поскольку наша цель - использовать уровень воды над эллипсоидом для определения средний уровень моря (MLS). В качестве системы отсчета в вертикальной плоскости используется принятый за базу MLS, который обеспечивает связь зависящих от гравитации относительных высот (превышений) с поверхностью, называемой геоидом. Первым шагом является вычисление среднего вертикального профиля вдоль дорожки спутника. Мы определяем для каждой дорожки площадью 1 км<sup>2</sup>, параллельную траектории

спутника. Для каждого отдельного окна мы корректируем каждое измерение по изменениям среднего уровня воды в озерах, чтобы определить средний эллипсоидальный профиль вдоль трассы. Делая это для каждой дорожки, мы строим набор данных среднего вертикального профиля, который также можно рассматривать как высоту геоида над эллипсоидом и который будет использоваться для определения MLS [34, 36].

### **Заключение по второй главе**

1. Для сохранения однородности рядов наблюдений в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу выполнялись параллельные наблюдения на аналоговых и автоматических гидрометеорологических станциях.
2. Для восстановления пропущенных рядов гидрометеорологических наблюдений в Иссык-Кульской котловине рекомендована приведенная в диссертационной работе методика, в основе которой использование вместо отсутствующих в рядах гидрометеорологических наблюдений соответствующих данных, взятых с ГМС-аналогов, находящихся в приблизительно аналогичных физико-географических условиях.
3. В разных высотных зонах бассейна р.Чон-Кызыл-Суу созданы автоматические системы наблюдения природных процессов.
4. Раскрытая в диссертационной работе и уже апробированная на леднике Кара-Баткак модернизированная методика оценки баланса массы ледников позволяет более точно подсчитывать баланс массы горных ледников ЦА.

### **ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ИССЫК-КУЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ**

Для горного оледенения Земли характерна высокая чувствительность к климатическим изменениям. Климат района определяется положением Тянь-Шаня внутри Евразийского континента на 40-х широтах. Основное направление приноса влаги – северо-западное и западное. Для Внутреннего Тянь-Шаня большую роль играет барьерная составляющая окружающих его хребтов, которая формирует собственный микро- и мезоклимат [74]. Колебания климата отражаются на характеристиках внешнего массообмена самих ледников.

### **3.1. Влияние климатических изменений на аккумуляцию, абляцию и баланс массы ледников (на примере ледника Кара-Баткак)**

Выбор ледника для стационарных гляциологических наблюдений опирается на ряд критериев. Репрезентативный ледниковый бассейн должен включать в себя не менее трети территории, покрытой оледенением. Основным ледник должен обладать типичными для горной системы основными параметрами, хорошо выраженными зонами аккумуляции и абляции, а также быть доступным для исследователей [127].

М.Б.Дюргером [128] был проведен анализ всех имеющихся масс-балансовых рядов ледников мира. Им показано, что с конца 1950-х и до середины 1970-х годов большинство репрезентативных ледников мира находилось в квазистационарном состоянии. Это актуально и для ледников Центральной Азии. Согласно М.Б.Дюргеру, начиная со второй половины 1970-х гг., баланс массы всех ледников Тянь-Шаня был резко отрицательным. Баланс массы опорных ледников Тянь-Шаня за последние 60 лет - со времени начала мониторинга (1957-2018 гг.) - в целом был отрицательным, и для следующих опорных ледников составил: Туюксу –399 мм вод.экв; Кара-Баткак –491 мм вод.экв. [139]; № 1 –337 мм вод.экв. [138]; Голубина –161 мм вод.экв. [139, 144]; Сары-Тор –370 мм вод.экв. [139]. Экстраполировав данные по опорным ледникам на хребты, которые они представляют, можно охарактеризовать эволюцию оледенения Тянь-Шаня в целом. По своим морфологическим показателям ледники Тескей Ала-Тоо имеют много сходных черт, поэтому ледник Кара-Баткак может выступать в качестве репрезентативного для большинства из них.

#### **3.1.1. Многолетний мониторинг ледников Тянь-Шаня**

В КР в конце 90-х годов прошлого века мониторинг ледников и гидрометеорологических условий нивально-гляциальной зоны был практически прекращен. Восстановление системы наблюдений за

состоянием опорного ледника Кара-Баткак было выполнено нами в рамках проекта CHARIS (*Contribution to High Asian Run off from Ice and Snow/Вклад льда и снега в сток Высокой Азии*) по изучению водно-ледовых ресурсов Горы Высокой Азии (Гималай, Памир и Тянь-Шань) [1], учреждённого Кооперативным институтом по исследованиям в области экологического Наук (CIRES) Университета Колорадо, США, и Национальным центром снега и льда (NSIDC), финансируемым Агентством США по международному развитию (USAID). В данной работе собственные результаты наблюдений за 2013-2018 гг. сравнивались с данными аналогичных наблюдений за прошлые годы, чтобы установить изменение детерминирующих метеорологических параметров (температуры, осадков) и компонентов внешнего массоэнергообмена ледника, динамики его пространственного положения и изменения стока р.Кашка-Тор.

Данные по балансу массы ледника Кара-Баткак нами ежегодно отправляются во Всемирную службу мониторинга ледников WGMS (Цюрих, Швейцария).

Первая фототеодолитная съёмка ледника была произведена в 1948 г. М.И.Ивероновой [145]. Согласно её результатам, его площадь тогда равнялась 4,7 км<sup>2</sup>. К сентябрю 1964 г. она уменьшилась до 4,58 км<sup>2</sup>, из них 3,38 км<sup>2</sup> приходились на зону аккумуляции и 1,2 км<sup>2</sup> на зону абляции [53]. Однако, по нашему мнению, в суммарную площадь ледника по итогам обеих съёмок могли войти участки погребённого и мёртвого льда, что внесло известное преувеличение размеров ледника. С момента самого первого измерения (1948 г.) по настоящее время суммарная площадь ледника, средняя высота границы питания (ELA) и доля области аккумуляции (AAR) изменялись следующим образом:

Год	Площадь ледника, км <sup>2</sup>	ELA, м	AAR, %
1948	4,70 [145]	3600	80,9
1964	4,58 [53]	3750	71,7

1981	3,00 [146]	-	-
2017	2,47 [147]	4030	38,1

Диапазон колебаний высоты фирновой линии ледника Кара-Баткак имеет большую амплитуду, отражая макроклиматические условия – соотношение между суммарным теплоприходом и годовой суммой твердых осадков. За 36 лет площадь открытого ледника Кара-Баткак уменьшилась на 18%. Имеет место ярко выраженный тренд к деградации оледенения, что является следствием глобального потепления.

Установление аналитических связей между ледниковым стоком и расходной составляющей вещественного баланса ледника Кара-Баткак является одной из главных целей данной работы.

### 3.1.2. Аккумуляция

Основной источник прихода вещества на ледник – атмосферные осадки. Они с высотой возрастают, что объясняется условиями атмосферной циркуляции и общим законом понижения температуры воздуха (табл. 3.1).

Таблица 3.1.- Годовые суммы осадков (мм) в высотных зонах в бассейне Чон-Кызыл-Суу за 1956/57-1967/68 и 2013/14-2016/17 балансовые годы

Балансовые Годы	Осадки на высотных зонах, мм			Балансовые годы	Осадки на высотных зонах, мм		
	2150 м	2550 м	3300 м		2150 м	2550 м	3300 м
1956/57	535	646	770	1964/65	508	598	876
1957/58	570	773	913	1965/66	564	754	1015
1958/59	588	828	1036	1966/67	562	777	937
1959/60	553	680	936	1967/68	529	719	739
1960/61	515	594	665	2013/14		507	442
1961/62	526	620	793	2014/15		507	726
1962/63	542	708	815	2015/16		798	1348
1963/64	757	883	1134	2016/17		490	730
Среднее					562	680	870

Наибольший вертикальный градиент осадков (изменение количества осадков на каждые 100 м подъёма) наблюдается в нижней зоне бассейна в интервале высот; 2150-2550 м, где он равен 38 мм; на высотах 2550-3100 м он снижается до 21 мм. Низкая величина градиента в верхнем интервале высот связана с тем, что при подъеме к истокам рек глубокие ущелья сменяются более широкими троговыми долинами, превышение гребней гор, окружающих долину над их днищами уменьшается и распределение осадков становится более однородным.

На рис.3.1 представлены снегозапасы в водном эквиваленте сезонного снега на леднике Кара-Баткак в период 2013-2018 гг. по материалам проведённых нами снегомерных работ. В годы с наибольшим запасом воды в сезонном снеге на леднике Кара-Баткак в 2015/16-2016/17 балансовые годы во всей зоне (аккумуляции и абляции) были больше на 60-40 мм, чем на языке, а в годы с меньшим запасом воды (2013/14, 2014/15 и 2017/18 балансовые годы) на 75-85 мм (рис.3.2). Оказалось, что разность запаса воды в сезонном снеге в годы с малым запасом снега между верхней зоной и языком ледников Тескей Ала-Тоо наибольшая.



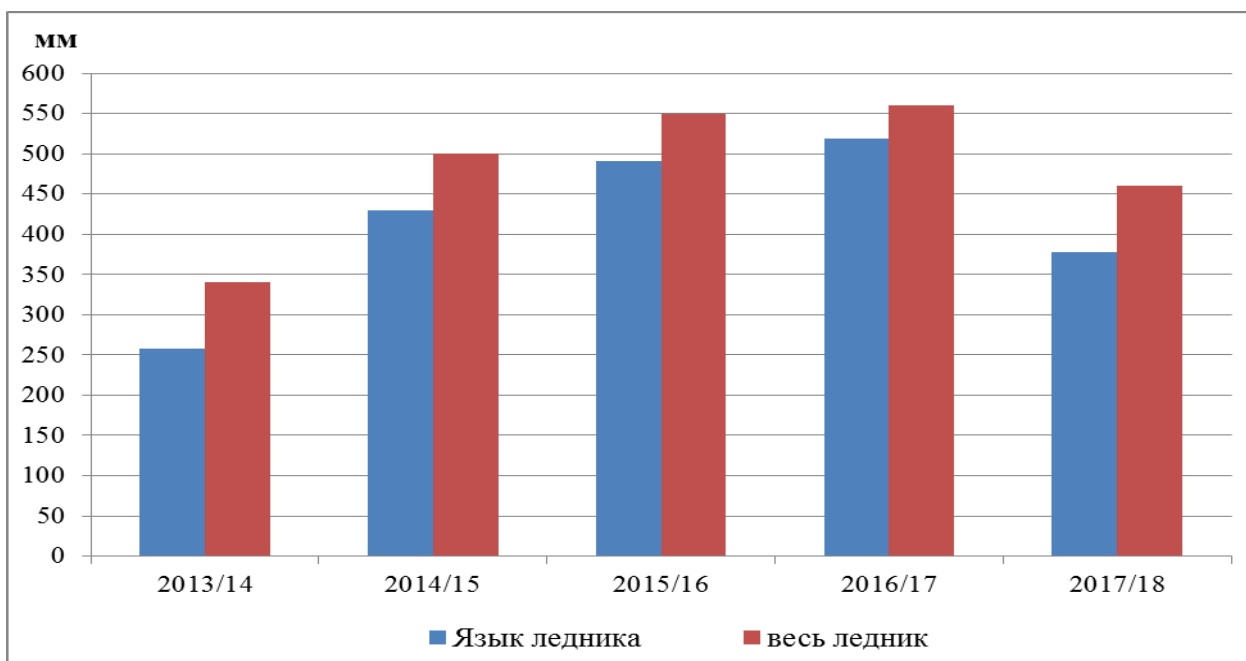


Рисунок 3.1 - Запасы воды в сезонном снеге на леднике Кара-Баткак

В период выполнения наших наблюдений самый большой запас воды в сезонном снеге был отмечен в 2016/17 балансовом году. Тогда за холодный период (с 1 октября 2016 г. по 13 мая 2017 гг.) на языке ледника Кара-Баткак накопилось 519 мм вод.эquiv. снега, а аккумуляция всего ледника достигла 560 мм в слое воды. В 2017 году самый большой водозапас в сезонном снеге наряду с самой высокой температурой воздуха (5,4°C) в абляционный период и самой большой абляцией ледника (3065 мм вод.эquiv.) отчасти стал причиной формирования самого большого после возобновления мониторинга слоя стока (10380 мм) с ледника Кара-Баткак по гидрологическим данным [148].

В целом за последнее десятилетие на ледник Кара-Баткак выпало сезонного снега на 10,6% меньше, нежели в начальный период наблюдения 1958-1968 гг. (рис. 3.2). Особенно малая аккумуляция на леднике была в 2014 и 2018 гг., когда сезонный снегозапас был меньше 415 мм. вод.эquiv. В течение периода 1958-1968 гг. аккумуляция снега обнаруживала тенденцию к снижению снегозапасов, а за последнюю декаду лет водозапас снежного покрова демонстрирует явный тренд к росту.

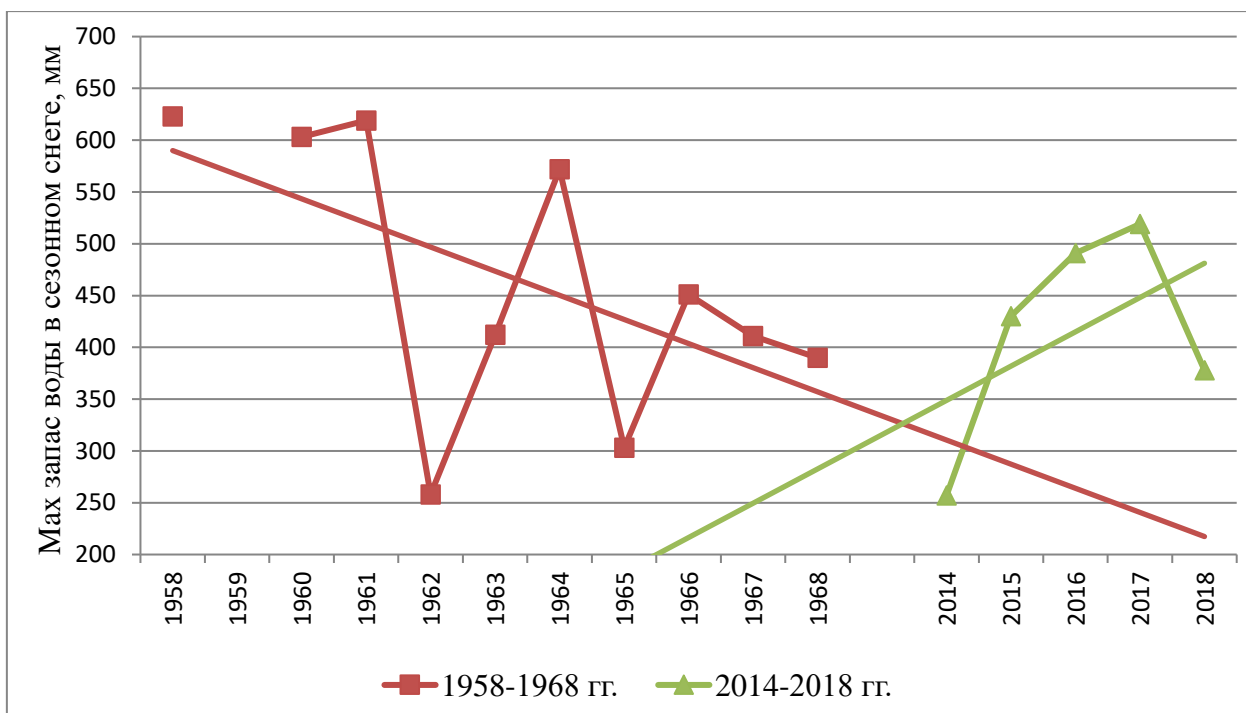


Рисунок 3.2 - Сравнительные значения среднемесячных запасов воды в сезонном снеге на языке ледника Кара-Баткак

Такой же тренд проявляется и при анализе суммарного количества осадков, выпавших на поверхность ледника Кара-Баткак как в нижней, так и в верхней частях языка на высотах 3300 и 3500 м, соответственно (рис. 3.3). На рис.3.3. показано количество осадков, выпавших у края ледника только за сезон летнего половодья (июнь-сентябрь). В абляционный период за 2014-2017 гг. на высоте 3300 м выпало 44,5% осадков от годовой суммы. Это привлекает к себе внимание по двум причинам. Во-первых, летние осадки имеют исключительную практическую важность для районов орошаемого земледелия, к которым относятся предгорья Тескей Ала-Тоо. Во-вторых, для ЦА (как, впрочем, и для большинства внутриконтинентальных районов Земли) свойственно преобладание осадков тёплого периода в годовой сумме – это своего рода показатель степени континентальности района. Доля летних осадков здесь может достигать до 47% [149]. Полученные на Кара-Баткак величины показывают, что среди других гляциологических объектов Внутреннего Тянь-Шаня Тескей Ала-Тоо как периферийный хребет этого сектора горной системы отличается пониженной долей летних осадков в

годовой аккумуляции: в разные годы она варьирует от 39 до 67% при среднем значении, не достигающем половину годовой (47,6%). Следовательно, условия Кара-Баткака можно признать не резко, а лишь умеренно континентальными.

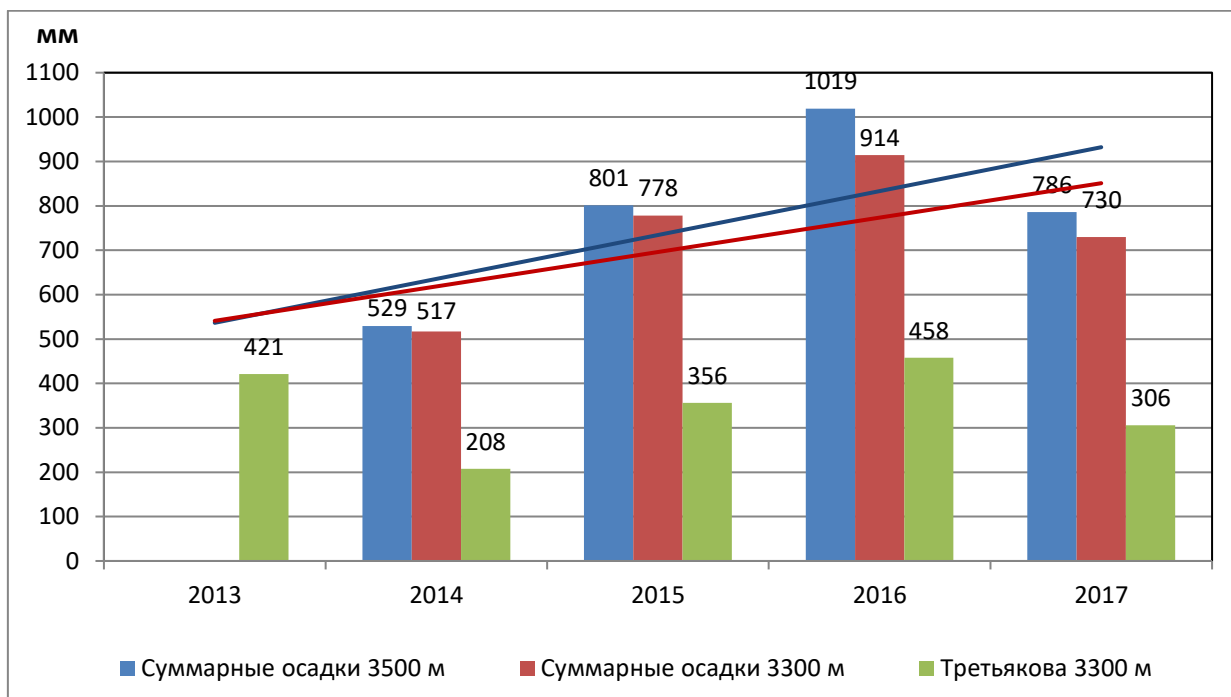


Рисунок 3.3 - Средние значения количества осадков в 2013/14, 2014/15, 2015/16 и 2016/17 балансовые годы и в абляционный период (июнь-сентябрь) на языке ледника Кара-Баткак

В период наших наблюдений наименее увлажненным из всех лет наблюдений был 2013/14 год. Осадки, отнесённые ко всему языку Кара-Баткака в высотном поясе 3300-3500 м, составили 523 мм, или 66% нормы. Самым влажным в этой зоне был 2015/16 год, осадки которого составили 967 мм, или 122% нормы. Амплитуда между экстремумами составила немалую величину - 444 мм.

### 3.1.3. Абляция

Широтное положение хребта Тескей Ала-Тоо (42<sup>0</sup>с.ш.) и большие абсолютные высоты благоприятно сказываются на суммарном приходе солнечной радиации - основном факторе, предопределяющем абляцию и как

следствие бюджет ледника. На приход солнечной радиации оказывают влияние высота местности, закрытость горизонта и облачность. Возможная продолжительность солнечного сияния на территории Киргизии за год колеблется в пределах 2500-2750 часов [68]. В периферийных хребтах из-за большей закрытости горизонта и развитости конвективных процессов сумма часов солнечного сияния гораздо меньше (ГМС "Чон-Кызыл-Суу"-1800 часов). Для сравнения: максимальные значения радиационного баланса, измеренные на высокогорных ледниках Кавказа, Тянь-Шаня и Памиро-Алая, достигают 1,6–1,7 кал/см<sup>2</sup> мин (1,12–1,19 кВт/м<sup>2</sup>). Эти величины примерно на 15–20% больше, чем на равнине. Максимальная величина, зарегистрированная на МС "Тянь-Шань" составляет 1,68 кал/см<sup>2</sup>мин, тогда как на леднике Кара-Баткак солнечная радиация не превышала 1,53 кал/см<sup>2</sup> мин, а месячный приход тепла составил 9,3 ккал/см<sup>2</sup> [22].

Не все компоненты радиационного баланса обуславливают температуру воздуха: она определяется только длинноволновой частью спектра, а также механизмами молекулярной и турбулентной проводимости воздуха и содержащегося в атмосфере водяного пара [150]. Из-за малой теплоемкости снег и лед не могут накапливать тепловую энергию, что свойственно воде. Поэтому одинаковое количество тепла вода сохраняет очень долго, тогда как снег его быстро теряет. А в теплый период года, когда происходит таяние снега и льда, все поступающее тепло расходуется на этот процесс и на испарение. На поверхности ледника Кара-Баткак, по наблюдениям Г.А.Авсюка [68], максимальное значение испарения за сутки равнялось 0,084 мм, а максимальная величина конденсации - 0,216 мм.

Усиление ветра способствует усилению теплообмена и влагообмена на поверхности льда. Радиационный ветер уменьшает абляцию, конвективный - наоборот, способствует ее увеличению [150]. Экстремальные максимальные расходы образуются в результате сочетания повышенного таяния льда и стока с ледников при обильном выпадении на них теплого дождя. Имели

место выпадающие на ледники ливни в период их активного таяния. Это всегда приводило к интенсивному стоку воды с ледников. Последний такой случай в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу и в соседних долинах имел место 03.08.2013 г. В тот день расход воды в р. Кашка-Тор-исток составил 2,02 м<sup>3</sup>/с при среднем для первой декады августа значении 1,3 м<sup>3</sup>/с.

Наиболее удобным для косвенных расчетов таяния и сравнительно легко прогнозируемым метеоэлементом является температура воздуха, являющаяся функцией притока солнечной радиации, адвективного тепла, влияния осадков и облачности. На примере ледников Ала-Арчинского бассейна (Киргизский хр.) установлено, что на каждый градус положительной температуры воздуха приходится от 6,8 до 9,2 мм растопленного льда, в среднем 7,2 мм [53]. Полученные величины согласуются с данными В.Л.Шульца [9] (7 мм на 1<sup>0</sup>С положительной температуры). Для ледника Кара-Баткак есть следующая оценка структуры теплового баланса в период абляции [151, 152]:

Приход тепла, %			Расход тепла, %		
<i>B</i>	<i>P</i>	+ <i>LE</i> (конд)	<i>N</i>	<i>C</i>	- <i>LE</i> (испар)
63	20	17	84		16

*B* – радиационный баланс, *P* – турбулентный поток «явного» тепла, *LE* – приход или расход тепла за счет конденсации или испарения, *N* – расход тепла на абляцию, *C* – расход тепла на прогрев ледника. По всему леднику отмечается повышенная роль испарения, которое ограничивает таяние [68].

На фоне климатических изменений был проведён анализ температуры воздуха по данным наблюдений метеостанции МС Кызыл-Суу (1740 м), имеющей ряд наблюдений с 1951 г. За 65-летний период наблюдений произошло увеличение средней годовой температуры воздуха от 6,2<sup>0</sup>С до 7,5<sup>0</sup>С (рис. 3.4). То есть временной градиент потепления составил 0,02<sup>0</sup>С/год.

Определяющую роль в интенсивности таяния снега и льда на горных ледниках умеренных и субтропических широт играет солнечная радиация, на которую приходится до 80–90% всего тепла, расходуемого на абляцию [153].

Тесная связь таяния ледников с температурой воздуха объясняется тем, что многие составляющие теплового баланса (длинноволновая часть радиационного спектра, конвекция, баланс процесса испарение-конденсация) содержат прямую или косвенную информацию о солнечной радиации.

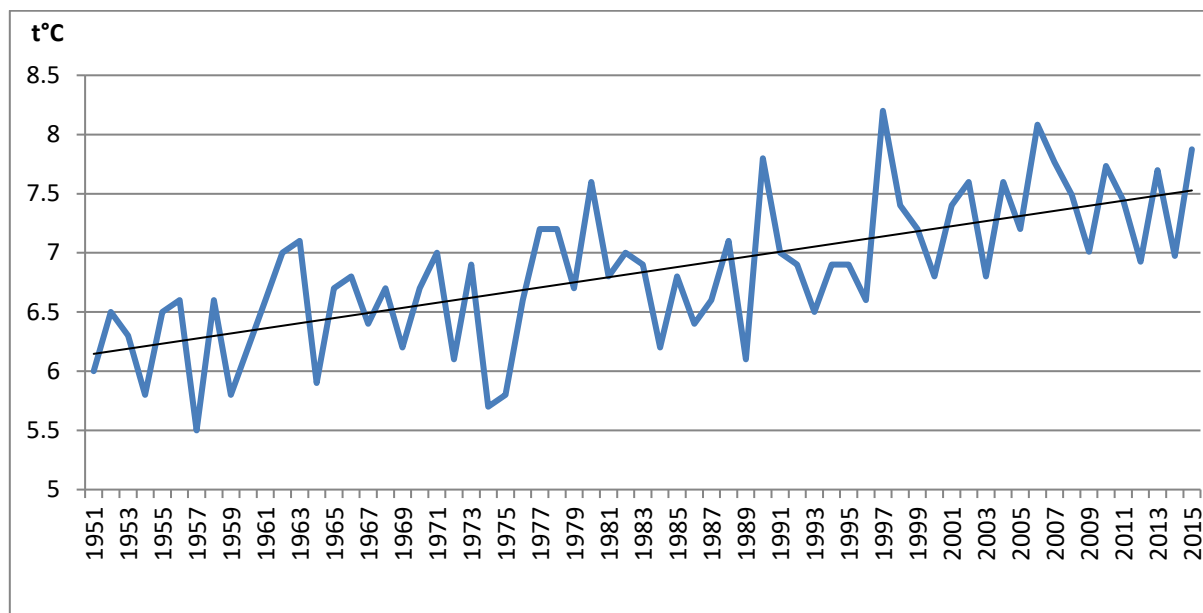


Рисунок 3.4 - Тренд средней годовой температуры воздуха по МС Кызыл-Суу

Повышенные значения баланса коротковолновой радиации  $B_k$  и температуры воздуха наблюдаются при одном и том же типе погоды, а именно, в условиях антициклона, при малооблачном небе и открытом солнечном диске. Происходит тепловая трансформация воздуха (т.е. нагревание его нижних слоев от скал и каменистой морены), достигающая ледника с долинным ветром или потоком с ближайших склонов. Таким образом, связь поглощенной ледником солнечной радиации  $B_k$  и температуры воздуха косвенная, но и она достаточно тесная. Связь же температуры воздуха и баланса длинноволновой радиации прямая и функциональная, но в абсолютном выражении вклад баланса длинноволновой радиации  $B_d$  невелик.

Характерная особенность распределения температуры над ледником – это ее инверсия в течение всех суток. Наиболее холодные и плотные слои

воздуха, располагающиеся у поверхности, тормозят его перемешивание и тем самым сокращают количество тепла, получаемое из воздуха поверхностью ледника. В то же время над участками суши, свободными от снега и льда, в дневные часы происходит нагревание воздуха от скал и морены и его «всплывание», т.е. наблюдается термическая турбулентность (конвекция).

Таким образом, температура воздуха может служить хорошим индикатором интенсивности таяния, так как она тесно связана (прямо или косвенно) с большинством важнейших компонентов теплового баланса. Немаловажно и то, что температуру воздуха легко измерить с достаточной степенью точности на леднике, вблизи него или экстраполировать от ближайшей метеостанции.

Связь температуры воздуха и таяния (абляции) ледников А.П.Волошина [150] характеризует через температурный коэффициент таяния  $K_t$  - количество стаявшего снега или льда, приходящиеся на  $1^\circ\text{C}$  положительной средней суточной температуры воздуха. Наиболее детальные исследования этого показателя были предприняты В.Л.Шульцем [9] на ледниках и снежниках Средней Азии. Это самый простой показатель, используемый для расчета таяния снега и льда. Но и он характеризуется неопределенностью, т.е. большими колебаниями в пространстве и во времени, особенно при низких температурах воздуха (ниже  $5^\circ\text{C}$ ). Он с достаточной степенью точности может использоваться при большом осреднении (не менее декады) и для значительных по площади участков ледников или снежников. Для ледников умеренных широт его средняя величина составляет  $5-7 \text{ мм}/^\circ\text{C}\cdot\text{сутки}$  [150]. По данным наших наблюдений, на леднике Кара-Баткак на высоте 3400 м для снега этот коэффициент по данным прямых измерений в 2014-2016 гг. составил  $7,1 \text{ мм}/^\circ\text{C}\cdot\text{сут.}$ , а для льда -  $8,0 \text{ мм}/^\circ\text{C}\cdot\text{сут.}$  и на высоте 3500 м -  $6,2 \text{ мм}/^\circ\text{C}\cdot\text{сут.}$  Таким образом, значение  $K_t$  несколько выше, чем по А.П.Волошиной [150].

Для изучения влияния глобального потепления на климатические условия в разновысотных поясах сделано сравнение температур воздуха на МС Кызыл-Суу, расположенной в предгорной зоне хребта Тескей Ала-Тоо (1740 м), ГМС Чон-Кызыл-Суу (2550 м), расположенной в среднегорной зоне, и МС Кара-Баткак (3300 м), расположенной в высокогорной зоне. Для восстановления температуры воздуха за пропущенный период наблюдений на МС Чон-Кызыл-Суу и Кара-Баткак были применены уравнения связи с метеоданными МС Кызыл-Суу. Эти соотношения были получены отдельно для генеральных совокупностей, составленных по каждому месяцу многолетнего периода мониторинга. Вариация этих уравнений весьма существенна, поэтому приведение универсальной формулы невозможно. В итоге проведенных вычислений были восстановлены непрерывные серии температуры воздуха на МС Чон-Кызыл-Суу и Кара-Баткак, которые и представлены на рисунке 3.5.



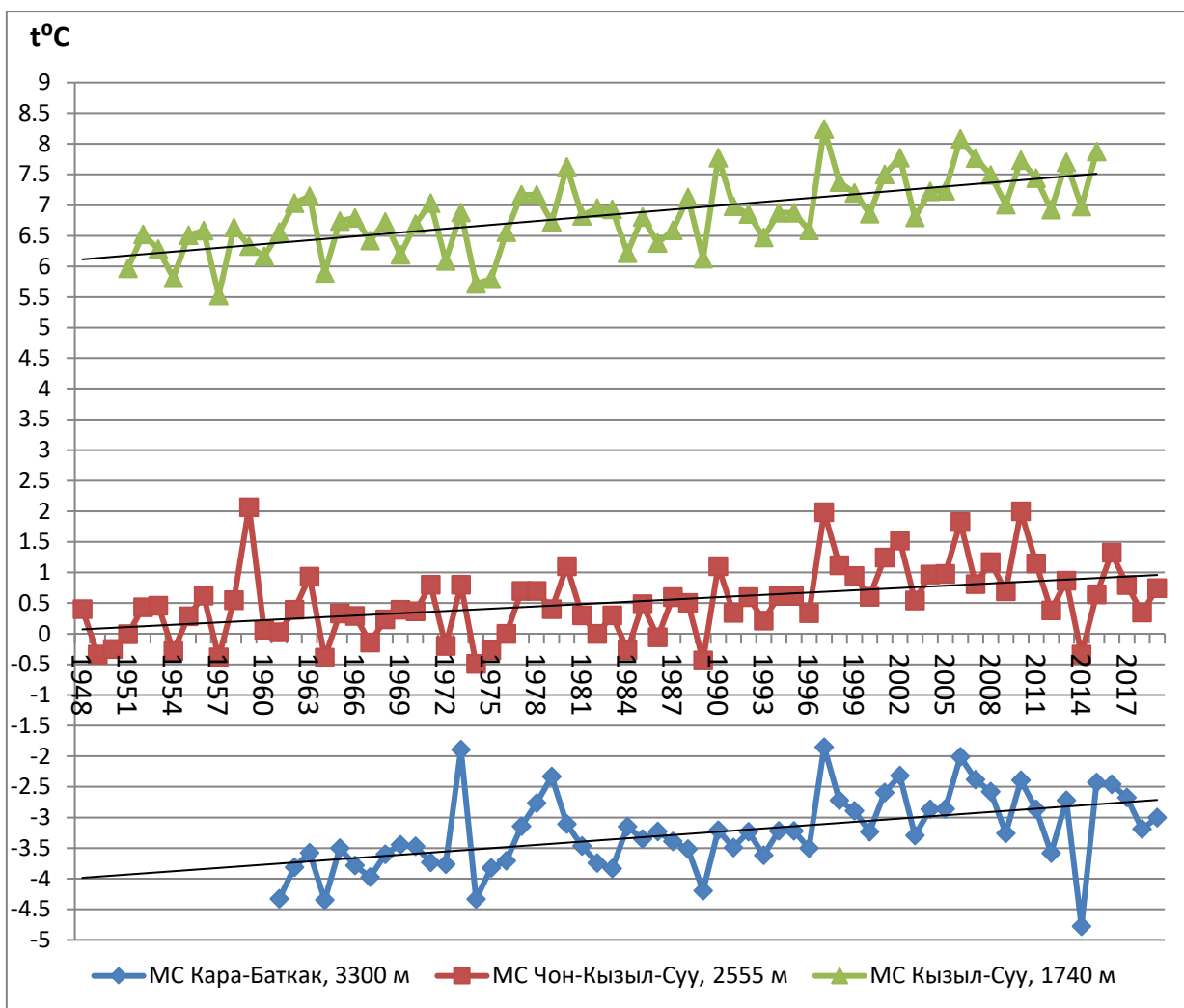


Рисунок 3.5 - Среднегодовые температуры воздуха в вертикальных зонах бассейна р.Чон-Кызыл-Суу 1961-2019 гг.

Полученные данные по температуре воздуха и рассчитанные вертикальные градиенты температуры на разной высоте бассейна р.Чон-Кызыл-Суу обнаруживают значительные различия в изменении температуры воздуха по высотным поясам Тескей Ала-Тоо. В многолетнем аспекте (порядка полувека), как следует из рис. 3.5, тренды температуры воздуха на МС Кызыл-Суу, Чон-Кызыл-Суу и Кара-Баткак в период по 2015 г., безусловно, однонаправленные: явное потепление по всем метеостанциям. Но численно временные градиенты различаются. Так, повышение годовой температуры воздуха на МС Кызыл-Суу (1740 м над уровнем моря) с 1951 по 2015 гг. составило 1,3°C (0,020 °C/год), на МС Чон-Кызыл-Суу (2555 м) с 1948 по

2015 гг. -  $0,95^{\circ}\text{C}$  ( $0,014^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), на МС Кара-Баткак (3300 м) с 1961 по 2015 гг. -  $1,0^{\circ}\text{C}$ , ( $0,018^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ).

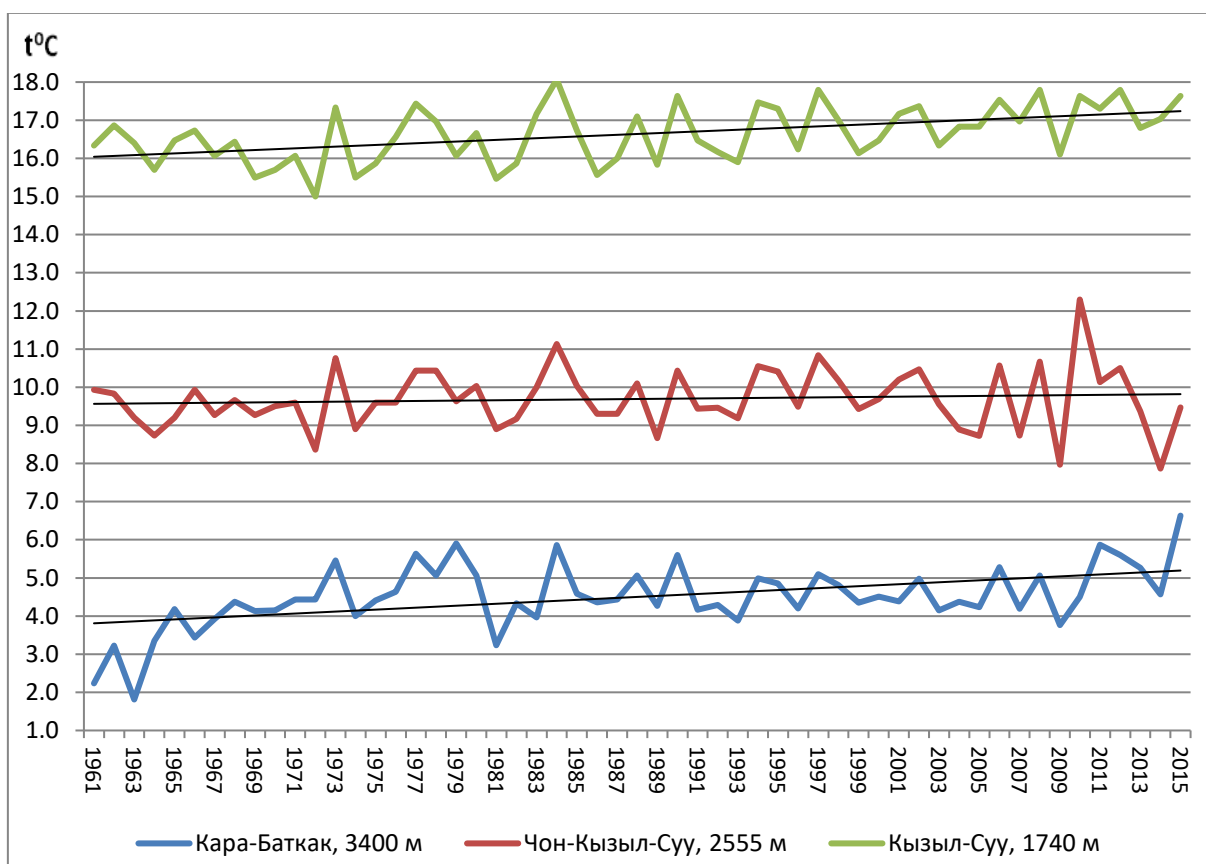


Рисунок 3.6 - Ход летних температур воздуха и их тренды в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу 1961-2015 гг. по данным разновысотных метеостанций

Наибольшие темпы прироста температуры воздуха, как следует из этих значений, отмечаются в самом верхнем ярусе изучаемого бассейна - на леднике Кара-Баткак. Для выяснения особенностей режима и эволюции ледников Тянь-Шаня большое значение имеет распределение изменений термических условий по сезонам, а также анализ эффекта такой сезонности для различных высотных поясов района (рис.3.6 – 3.9).

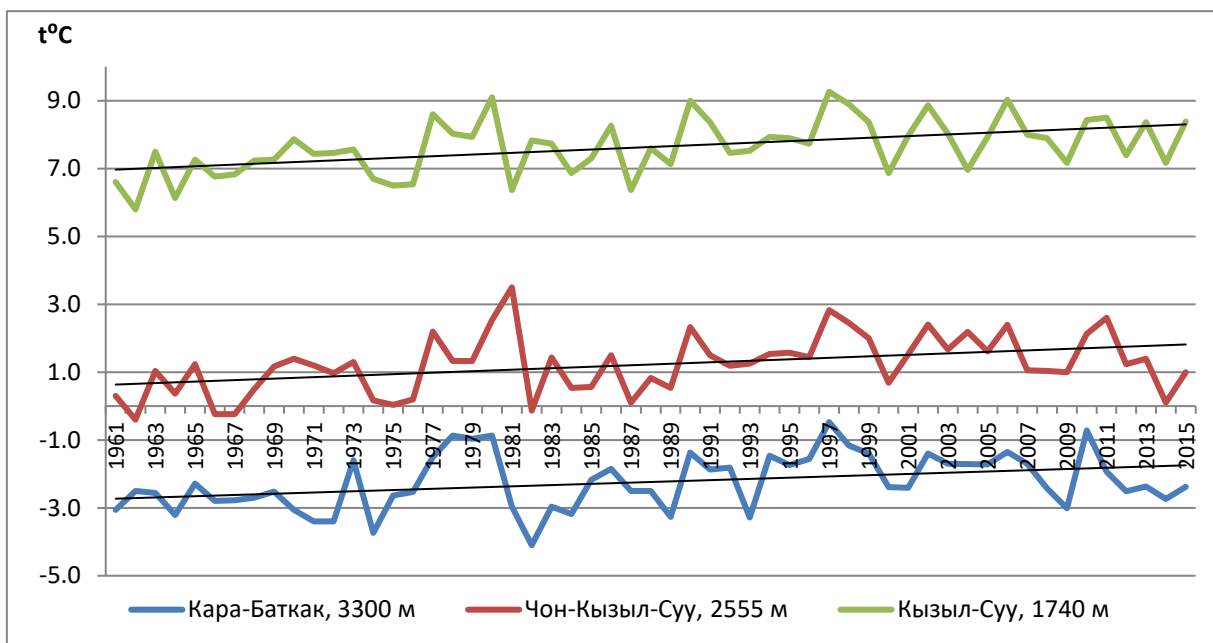


Рисунок 3.7 - Ход осенних температур воздуха и их тренды в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу 1961-2015 гг. по данным разновысотных метеостанций

Как показали проведённые нами расчёты, повышение летней температуры воздуха с 1961 по 2015 гг. на МС Кызыл-Суу составило  $1,2^{\circ}\text{C}$  ( $0,022^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), на МС Чон-Кызыл-Суу -  $0,2^{\circ}\text{C}$  ( $0,004^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), на МС Кара-Баткак - на  $1,4$  ( $0,026^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) (рис. 3.6). Наименьшее повышение летней температуры воздуха на МС Чон-Кызыл-Суу, скорее всего, объясняется влиянием лесов [153], которые способствуют активизации гидрологических процессов, вызывают дополнительное выпадение осадков, увеличивают водопродуктивность и сглаживают колебания летних температур.

Повышение осен-ней температуры воздуха с 1961 по 2015 гг. на МС Кызыл-Суу составило  $1,25^{\circ}\text{C}$  ( $0,023^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), на МС Чон-Кызыл-Суу -  $1,2^{\circ}\text{C}$  ( $0,022^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), на МС Кара-Баткак -  $1,0^{\circ}\text{C}$  ( $0,018^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), (рис.3.7).

Повышение зимней температуры воздуха с 1961 по 2015 гг. на МС Кызыл-Суу и Чон-Кызыл-Суу составило  $1,0$  и  $0,9^{\circ}\text{C}$  ( $0,018$  и  $0,017^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), а на МС Кара-Баткак это повышение значительно меньше -  $0,7^{\circ}\text{C}$  за весь период ( $0,013^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) - рис. 3.8.

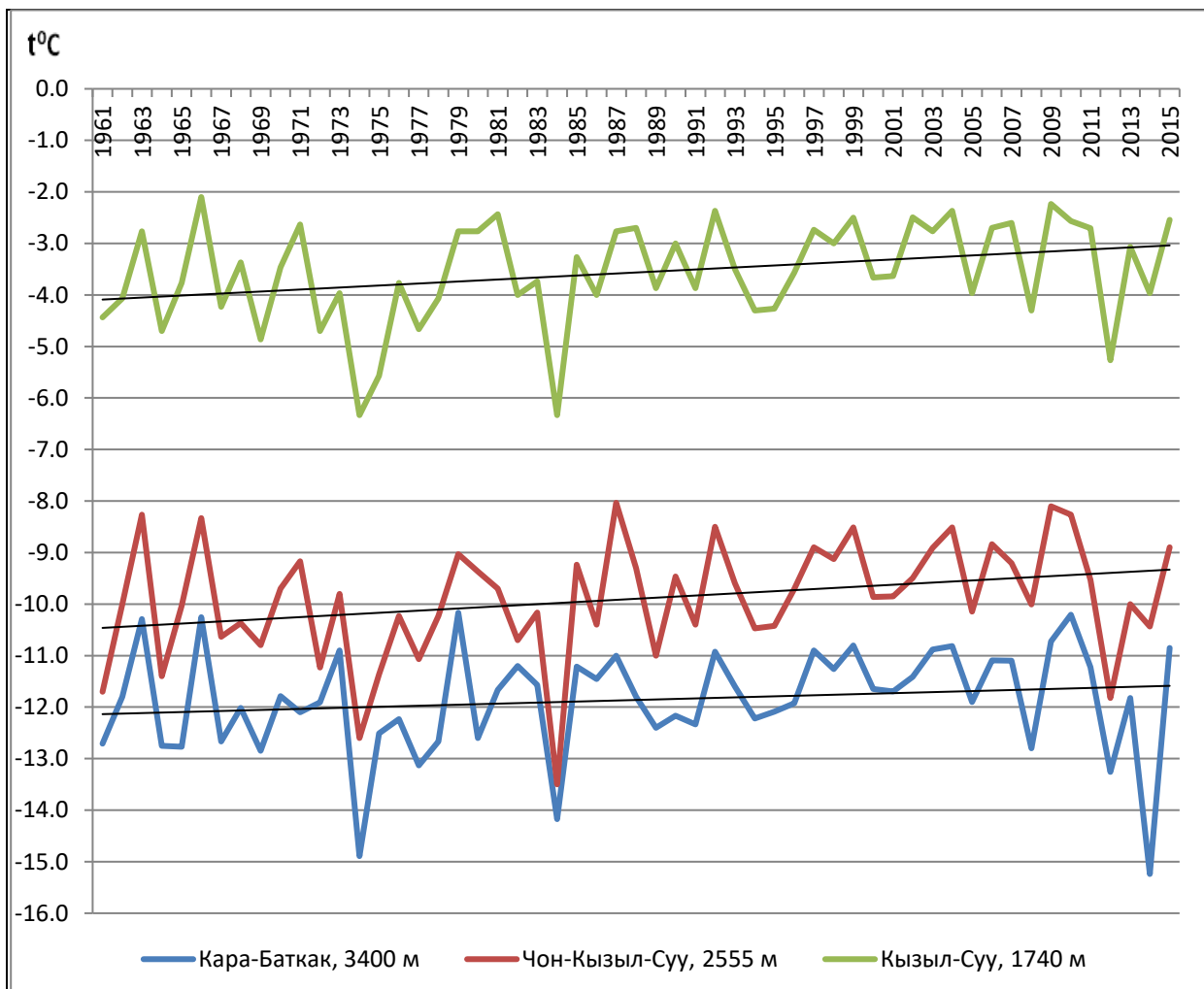


Рисунок 3.8 - Ход зимних температур воздуха и их тренды в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу 1961-2015 гг. по данным разновысотных метеостанций

Повышение весенней температуры воздуха с 1961 по 2015 гг. на МС Кызыл-Суу составило  $0,8^{\circ}\text{C}$  ( $0,015^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), на МС Чон-Кызыл-Суу -  $0,75^{\circ}\text{C}$ , ( $0,014^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), а на МС Кара-Баткак -  $0,5^{\circ}\text{C}$  ( $0,009^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) - рис.3.9.

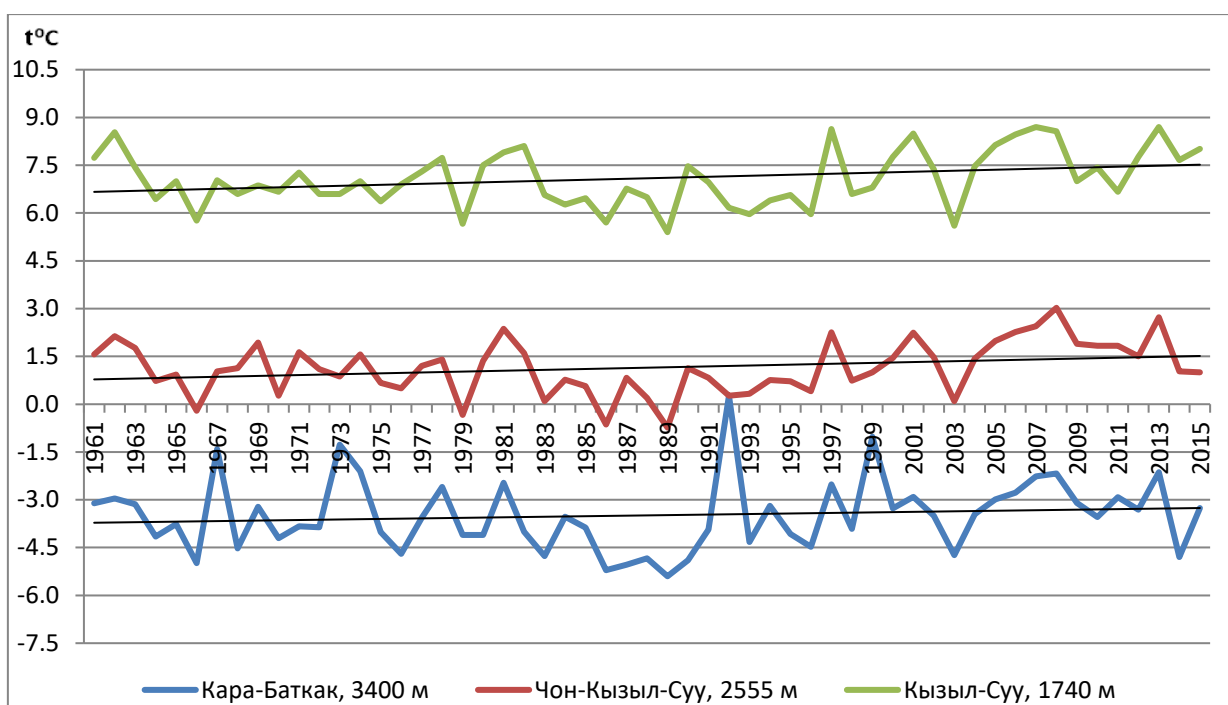


Рисунок 3.9 - Ход весенних температур воздуха и их тренды в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу 1961-2015 гг. по данным разновысотных метеостанций

Данные о ежегодном приросте сезонных температурах воздуха на разновысотных метеостанциях в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу в период 1961-2015 гг. приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. - Повышение сезонных температур воздуха на метеостанциях в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу за 1961-2015 гг.

Сезон	Прирост температуры, °С/год		
	МС Кызыл-Суу	МС Чон-Кызыл-Суу	МС Кара-Баткак
Лето	0,022	0,004	0,026
Осень	0,023	0,022	0,018
Зима	0,018	0,017	0,013
Весна	0,015	0,014	0,009
Годовой цикл	0,020	0,014	0,023

Повышение летних температур воздуха в прибрежной зоне оз.Иссык-Куль и в нивально-гляциальной зоне значительно больше, чем в лесной зоне (табл.3.2). Меньшие повышения летних температур воздуха в лесной зоне объясняются транспирационной ролью растительности, из-за чего леса растут там, где больше выпадает осадков.

В нивально-гляциальном поясе бассейна р.Чон-Кызыл-Суу, где аккумулируются значительные по массе ледово-водные ресурсы, температура воздуха в летний сезон в период 1961-2017 гг. повысилась на  $1,4^{\circ}\text{C}$ , в зимний и весенний сезоны - на  $0,7$  и  $0,5^{\circ}\text{C}$ , соответственно. Для сравнения: в лесном поясе прирост температуры воздуха осенью составил  $1,2^{\circ}\text{C}$ , в зимний и весенний сезоны -  $0,7-0,9^{\circ}\text{C}$ , в летний сезон -  $0,2^{\circ}\text{C}$ . В степной прибрежной зоне озера Иссык-Куль значительный прирост температуры воздуха произошел в осенний, летний и весенний сезоны ( $1,2$ ,  $1,2$  и  $0,8^{\circ}\text{C}$ , соответственно) за 54 года.

Восстановленная нами для ледника Кара-Баткак осредненная температура воздуха для сезона абляции в период наблюдений 1961-1968 гг. составила  $2,8^{\circ}\text{C}$ , а в 2013-2018 гг. -  $+4,9^{\circ}\text{C}$ , что на  $2,1^{\circ}\text{C}$  больше. В то же время среднегодовая температура на Кара-Баткаке в 1961-1968 гг. составила  $0,2^{\circ}\text{C}$ , в 2013-2018 гг.  $0,8^{\circ}\text{C}$ , т.е. стало теплее на  $0,6^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, температурный режим за анализируемые годы свидетельствует и подтверждает тенденцию к потеплению нивально-гляциальной зоны Тескей-Ала-Тоо.

На рис. 3.10 приведен ход среднесуточных температур воздуха по показаниям недельного термографа на леднике Кара-Баткак в абляционный период 2014-2017 гг. При месячном осреднении наиболее высокой была температура в июле, августе 2015 и 2017 гг. и в сентябре 2013 и 2016 гг., что обусловило высокий сток р.Кашка-Тор в эти месяцы. За период абляции в целом наиболее высокая положительная температура воздуха была зарегистрирована в 2017 г. ( $+5,6^{\circ}\text{C}$ ), далее идут 2015 г. ( $+5,4^{\circ}\text{C}$ ), 2014 г. ( $+4,8^{\circ}\text{C}$ ) и 2016 г. ( $+4,5^{\circ}\text{C}$ ). Средняя температура тёплых сезонов анализируемого периода была выше многолетних значений  $4,2^{\circ}\text{C}$ , и только в 2014 г. это превышение было незначительно.

Осредненная информация по годовым значениям осадков и температуры воздуха на ближайших к 5-ти репрезентативным ледникам

метеостанциях отражает эволюцию метеопараметров за последние 60 лет. Рост среднегодовых температур воздуха составил 1,3-1,5°C, а годовое количество осадков возросло всего на 30-80 мм [139]. Эти метеоданные свидетельствуют о том, что в настоящее время потеря массы ледников обусловлена в основном устойчивым повышением температуры воздуха. Этот факт можно применять ко всем ледникам Тянь-Шаня.

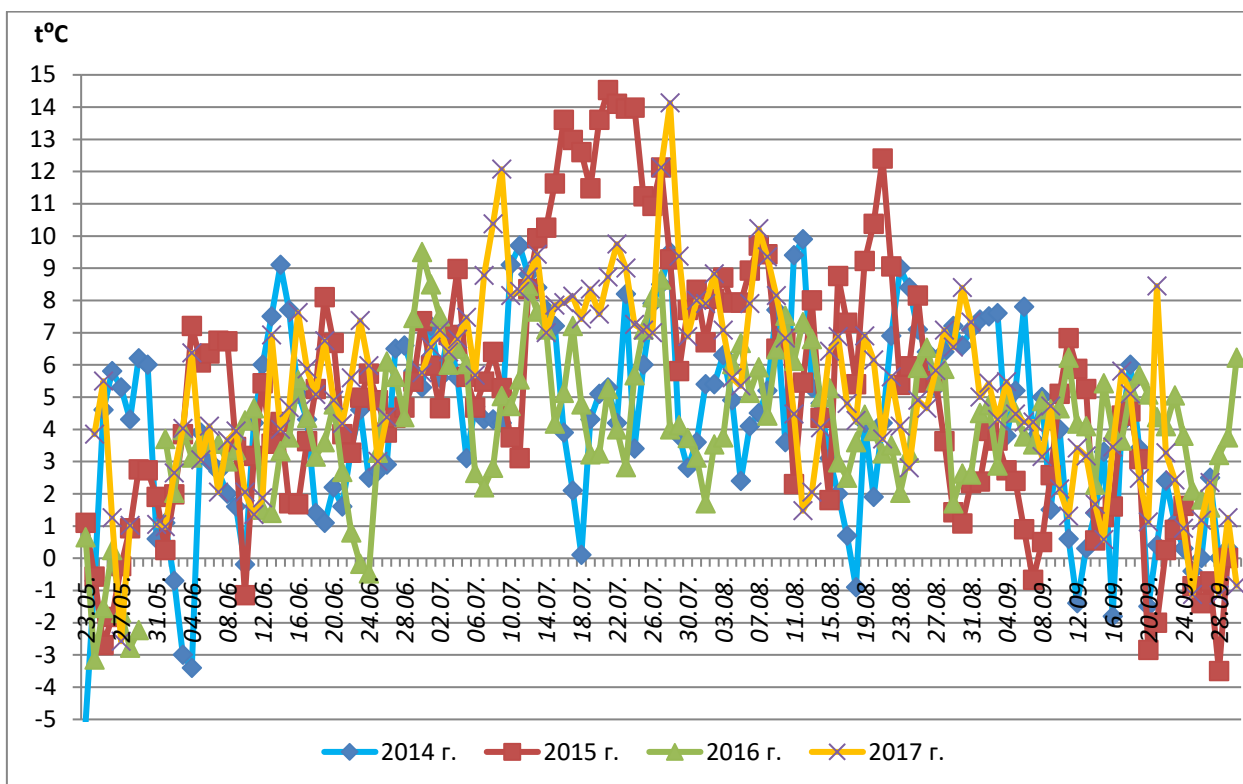


Рисунок 3.10 - Среднесуточные температуры воздуха на леднике Кара-Баткак в период абляции 2014 – 2017гг.

Помимо влияния чисто климатических факторов, абляция ледника во многом определяется наличием на поверхности чехла поверхностной морены различного механического состава и мощности [154, 155, 156, 157].

Проведенные нами исследования показали (табл. 3.3), что лед на конце языка ледника Кара-Баткак, покрытый слоем морены толщиной 10-12 см, стоял за шесть дней на 17-19 см, а слегка загрязненный золовым мелкоземом за тот же период - на 34-41 см. С увеличением толщины морены таяние резко ослабляется.

Таблица 3.3.- Зависимость величины таяния от мощности морены ледника Кара-Баткак

Мощность морены	7 см	5 см	2 см	Лед слегка загрязненный мелкоземом
Таяние, см	5,0	7,1	12,8	12,5

Неодинаковая загрязненность ледниковой поверхности нарушает закономерную высотную дифференциацию таяния. Меньшая величина абляции на высоте 3500 м объясняется, помимо высотного эффекта, ещё и незначительной загрязненностью ледниковой поверхности мелкоземом в этой части ледника. Количество эолового мелкозема в фирновой области, окружённой крутыми скалами, составляет 191,4 г/м<sup>2</sup>, а на высоте 3500 м – только 27,4 г/м<sup>2</sup> [20]. На высоте 3300 м концентрация мельчайших литологических разностей на поверхности глетчерного льда существенно возрастает и доходит до 462,7 г/м<sup>2</sup>.

Важным вопросом является определение продолжительности периода абляции, т.е. дат начала и окончания периода таяния. На леднике Кара-Баткак переход среднемесячной температуры через 0<sup>0</sup>С обычно происходит в июне (табл.3.4). Средняя температура воздуха в период абляции (VI-IX) в 1961-1968 гг. составила 2,8<sup>0</sup>С, а в 2013-2018 гг. 5,2<sup>0</sup>С. В среднем период абляции льда в 1961-1968 гг. длился 73 дня [52], а в 2013-2018 гг. - 100 дней.

Таблица 3.4. - Зависимость даты начала и конца периода абляции льда от среднемесячной температуры воздуха в 1961-1968 и 2013-2018 гг.

Значения	1961-1968 гг.	2013-2018 гг.	Разница
<i>Начало абляции, дата</i>	26 июня	17 июня	9 дней
<i>Конец абляции, дата</i>	07 сентября	25 сентября	18 дней
<i>Продолжительность абляционного периода</i>	73 дней	100 дней	27 дней
<i>Ср. темп. за июнь</i>	3,0	4,1	3,0
<i>Ср. темп. за июль</i>	3,6	6,2	3,6
<i>Ср. темп. за август</i>	3,4	6,0	3,4
<i>Ср. темп. за сент.</i>	1,4	3,2	1,4
<i>Среднее</i>	2,8	4,9	2,8



Повышение температуры воздуха на  $2,4^{\circ}\text{C}$  и увеличение продолжительности периода абляции на 27 дней привели к тому, что величина абляции льда на Кара-Баткаке в 2010-2018 гг. (2639 мм вод.эquiv.) оказалась в среднем на 66% больше, чем в 1956-1968 гг. (1593 мм вод.эquiv.).

Максимальное таяние льда на языковой части ледника имело место в 2017 г. – стоял слой 3011 мм вод.эquiv при продолжительности периода абляции льда в 105 дней. Наиболее короткий период абляции льда (28 дней) был в 1957 г., за этот период стоял лишь 729 мм вод.эquiv. В последние годы абляция льда на Кара-Баткаке увеличивается в связи с глобальным потеплением (рис.3.11), что может привести к увеличению стока рек, к изменению баланса массы ледников и к смене соотношения между генетическими составляющими речного стока.

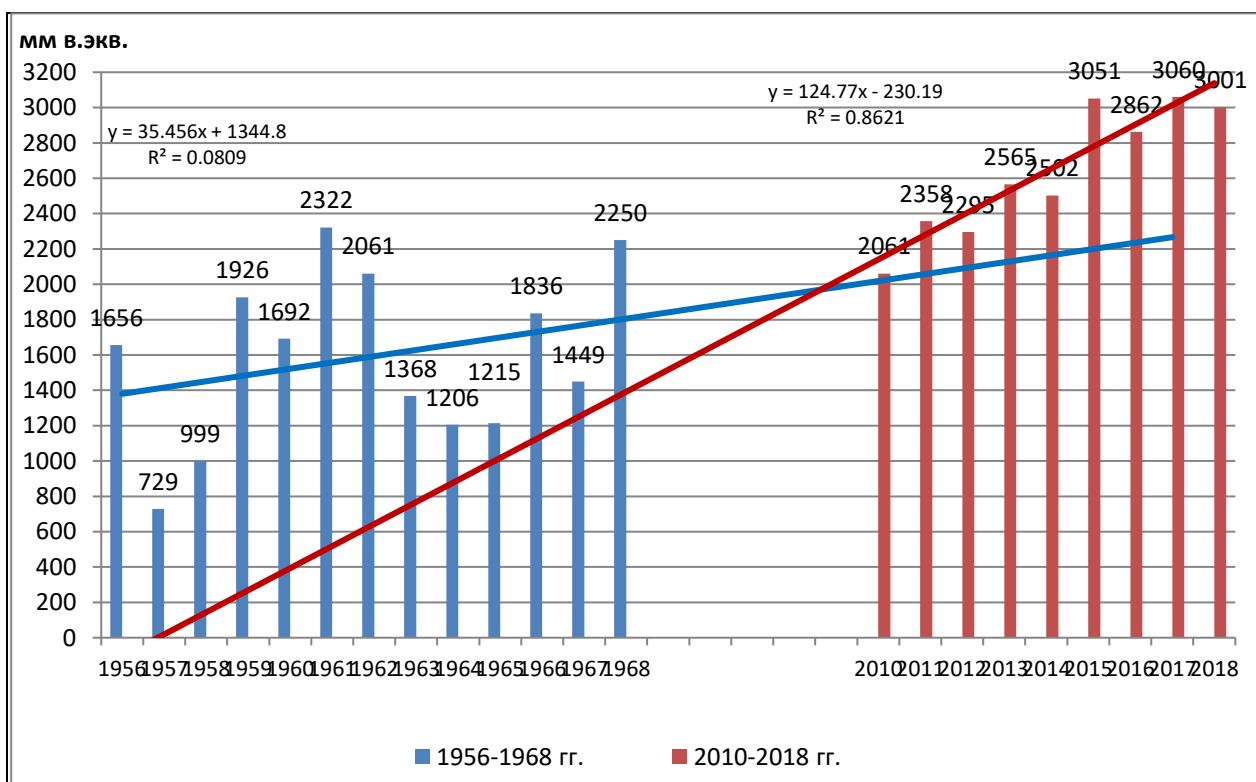


Рисунок 3.11- Абляция льда на языке ледника Кара-Баткак (3300-3500 м) в периоды 1956-1968 и 2010-2018 гг.

Важной особенностью расходного компонента баланса массы ледника является характер его внутригодового распределения: период абляции

сжимается в рамках 3-4 месяцев при полном отсутствии абляции в остальное время года (табл. 3.5).

Таблица 3.5. - Средние величины абляции (мм вод.экв.) по месяцам за 1949-1968 гг. [52] и 2008-2017 гг.

Год	Месяц				сумма
	VI	VII	VIII	IX	
1956-1968	82	656	690	218	1646
2008-2017	380	1128	1017	316	2860

Вариации абляции льда по годам весьма значительные: в 2013 г. она составила 2565 мм вод.экв., в 2014 г.- 2502 мм вод.экв., в 2015 г. - 3051 мм вод.экв., в 2016 г.- 2862 мм вод.экв., в 2017 г. 3060 мм вод.экв. и в 2018 г. 3001 мм вод.экв. Столь большой разброс значений объясняется тем, что в 2015 г. июль был аномально жарким, немного уступая по температуре всего периода абляции 2017 г. (5,6<sup>0</sup>C), а в 2014 г., наоборот, период абляции был в целом прохладным (см. рис. 3.10). Среднесуточное стаивание льда на языке Кара-Баткака в 1956 – 1968 гг. составило 2,5 см [118], что соответствует 22,9 мм вод.экв./сут; в 2013-2017 гг. -3,2 см, или 28,8 мм вод.экв./сут. (рис. 3.12),

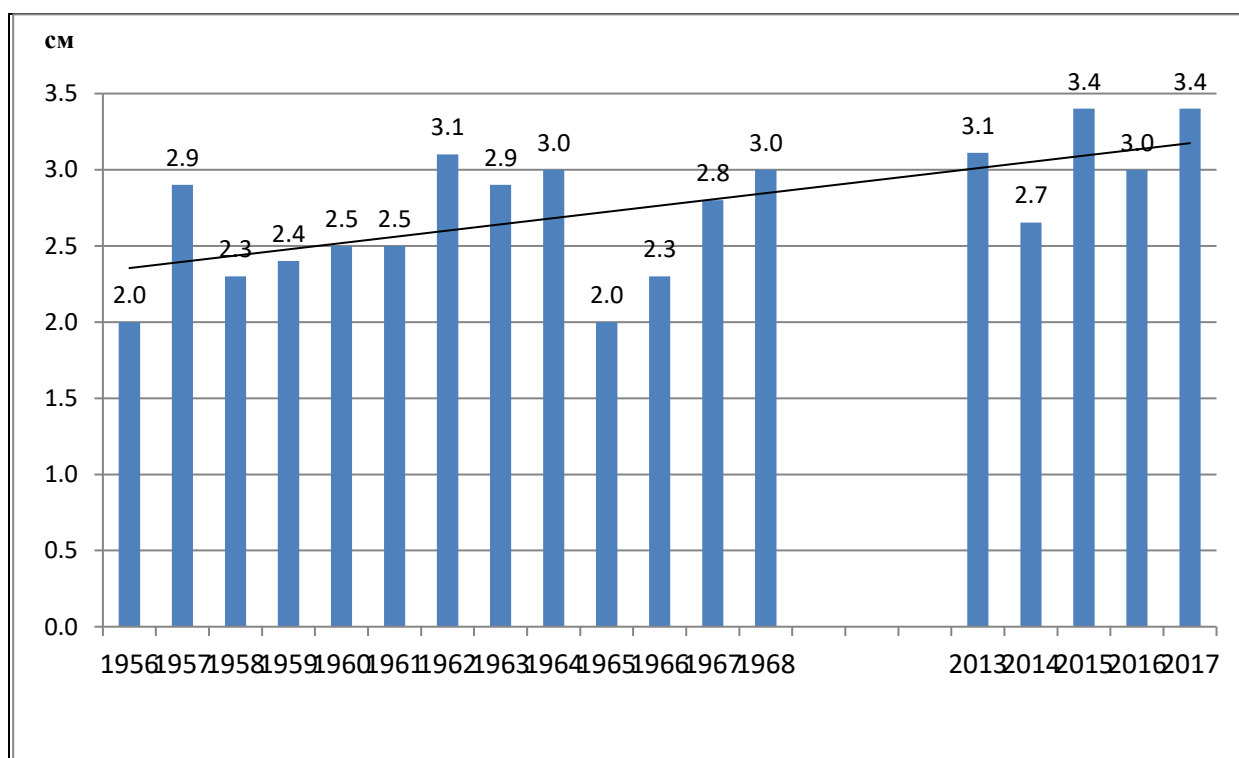


Рисунок 3.12 - Среднесуточное стаивание льда на языке Кара-Баткака за 1956-1968 гг. [52] и 2013-2017 гг.

т.е. увеличилось на 20%. Это объясняется тем, что в 1956-1968 гг. среднегодовая температура воздуха составляла  $-3,8^{\circ}\text{C}$  (в период абляции продолжительностью 73 дня температура воздуха  $+2,8^{\circ}\text{C}$ ), а в 2013-2018 гг. эти величины принимали значения  $-2,6^{\circ}\text{C}$ ,  $+4,9^{\circ}\text{C}$  и 100 дней, соответственно.

По изменению абляции с высотой (рис.3.13) в 2015-2017 гг. выявлены четкие отличия вертикальных градиентов - от 0,12 до 0,63 м на каждые 100 м. Они обусловлены различиями в фазах выпадающих летних осадков по высотным зонам: в то время как в нижних частях ледника идёт дождь, усиливающий абляцию, в верхних отлагается снег, парализующий таяние.

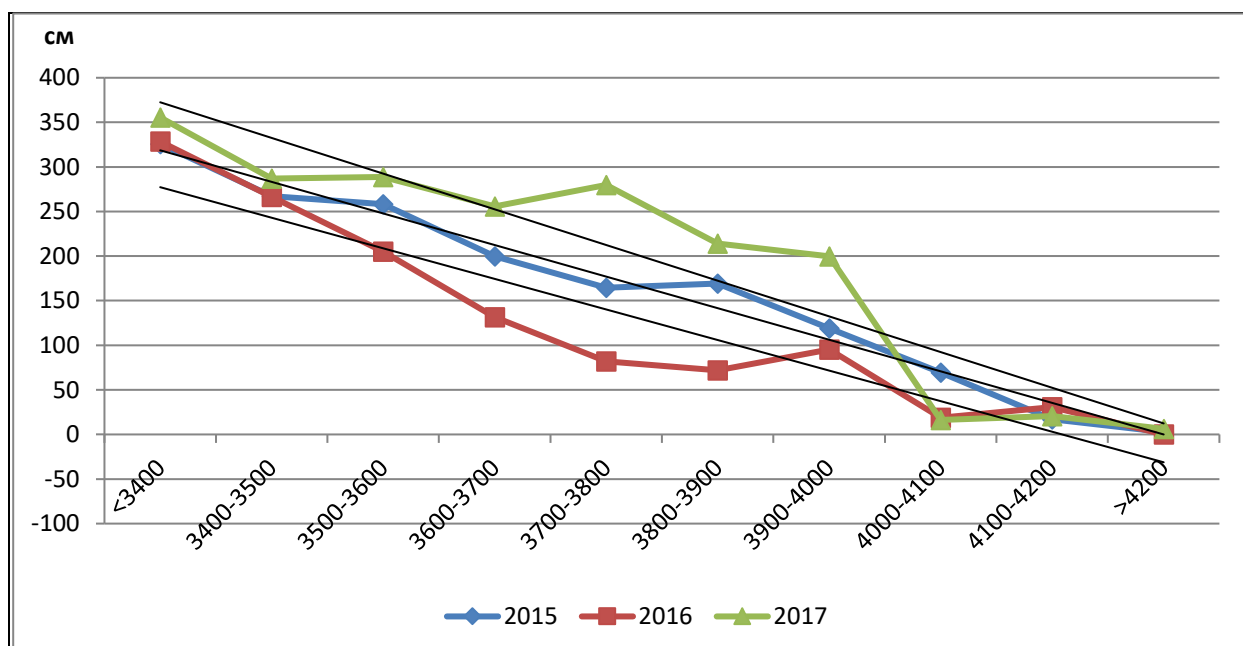


Рисунок 3.13 - Абляция льда по высотным 100-метровым интервалам ледника Кара-Баткак в 2015-2017 гг.

Граница раздела фаз может совпадать с любой изогипсой в соответствии с погодной спецификой, поэтому свойства подобия высотных абляционных кривых могут нарушаться в любых гипсометрических поясах.

В абляционный период наблюдается тесная связь таяния ледника со средней месячной температурой воздуха, что позволило восстановить

ледниковую составляющую стока р.Кашка-Тор за годы отсутствия наблюдений и рассчитать баланс массы ледника.

#### **3.1.4. Баланс массы ледника**

В пределах Тянь-Шаня наблюдается климатическая дифференциация с увеличением континентальности с запада на восток. Вследствие этого, суммарный массообмен ледников убывает с запада на восток, равно как и растёт роль абляции в изменчивости баланса массы [158].

В зимние месяцы выпадает минимум осадков, температуры воздуха сильно отрицательны. Чем континентальнее расположение ледника, тем  $T_z$  ниже: от -15 на «периферийном» леднике Голубина до -40°С на «внутренних» ледниках Сары-Тор и №1. При таких условиях происходит значительное выхолаживание тела ледника, в нём аккумулируется запас холода. Летний период отличается слабо положительными температурами воздуха, что позволяет осадкам, максимальным в летние месяцы, выпадать преимущественно в твердом виде. Такие особенности континентальных ледников осложняют процесс абляции. Часть запаса холода тратится на повторное замерзание части (до 30-35%) талой воды в фирновой толще и на поверхности – образование ледяных слоев и наложенного льда [159]. Повторное льдообразование на ледниках – это «недорасход» абляции. Особый режим ледников подразумевает летнюю аккумуляцию, позволяет аккумуляции и абляции сменять друг друга даже внутри одних суток.

Возобновлённая с 2013/14 балансового года серия наблюдений для расчета баланса массы включала не только итоговую величину вещественного баланса  $b_n$ , но и его сезонные составляющие (аккумуляцию  $b_w$  и абляцию  $b_s$ ), распределение этих значений по высотным 100-метровым зонам, а также важные показатели, характеризующие состояние ледника в каждом конкретном году: высоту границы питания ELA и долю области питания AAR.

Нами показано, что ежегодно баланс массы ледника Кара-Баткак принимал отрицательные значения (рис.3.14), причем компоненты баланса

массы тесно коррелируют с детерминирующими метеопараметрами - температурой воздуха и осадками.

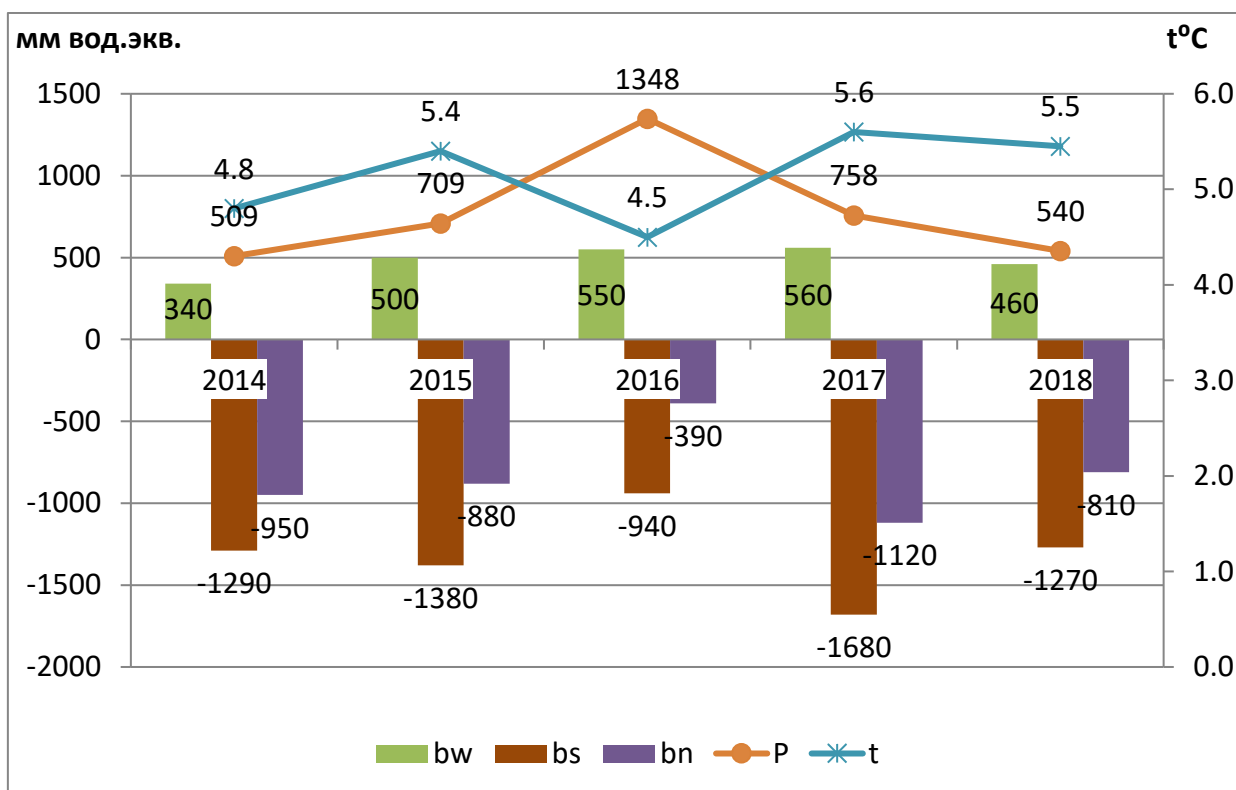


Рисунок 3.14 - Сумма осадков за балансовый год (P, мм), температура воздуха (t) за период абляции, величины аккумуляции ( $b_w$ ), абляции ( $b_s$ ) и баланс массы ( $b_n$ ) ледника Кара-Баткак в 2013/14 – 2017/18 гг.

Наиболее отрицательным (-1120 мм вод.эquiv.) за 5 лет наблюдений баланс массы этого ледника был в 2016/17 году, что связано с аномально теплым и продолжительным летним периодом 2017 г.; максимум баланса по модулю был предопределён соответствующим экстремумом расходного компонента  $b_s$  (-1680 мм). Наоборот, в 2015/16 балансовом году при относительно близкой к среднемноголетней температуре воздуха (4,5°C), аномально большом количестве осадков (1348 мм вод.эquiv.) и продолжительном периоде абляции (105 дн.) баланс массы ледника Кара-Баткак принял значение -390 мм вод.эquiv., что явилось противоположной балансовой крайностью (годом с наименьшим по модулю вещественным балансом), т.е. относительно самым благоприятным для состояния ледника за 5 лет. В среднем за пятилетку (2013/14-2017/18)

баланс принял значение  $b_n = -830$  мм вод.экв. при составляющих  $b_w = 480$  мм и  $b_s = -1310$  мм.

Самый отрицательный баланс 2016/17 г. обусловлен малым количеством осадков и теплым летним периодом, увеличение осадков и снижение температуры в 2015/16 балансовом году привело к противоположному экстремуму. В годы сильно отрицательного баланса (2014/15 и 2016/17 гг.) на языке ледника Кара-Баткак выпало 709 и 758 мм осадков, соответственно, а среднемесячная температура воздуха в абляционный период (июнь-сентябрь) достигла значений 5,5 и 5,4<sup>0</sup>С.

Отрицательные значения  $b_n$  в последние годы свойственны не только леднику Кара-Баткак, но и другим опорным ледникам Внутреннего Тянь-Шаня – ледникам Сары-Тор и Борду (приложение 1). Отрицательный баланс можно интерпретировать как добавку к речному стоку за счёт деградации оледенения. Однако, при этом происходит и сокращение площади оледенения. Поэтому рост удельной величины "ледниковой добавки" через какое-то время приведёт к уменьшению объема ледникового стока. Это положение очевидно и продемонстрировано на примере кавказского ледника Джанкуат [160].

Полный ряд измеренных годовых значений баланса массы Кара-Баткака, состоящий из 46 членов (41 год до перерыва и 5 лет после), приведён на рис.3.15. Восстановление пропущенных значений баланса массы в период 1998-2013 гг. было сделано с использованием гляциологических и климатических данных как до, так и после этого периода [139]. При восстановлении годовых значений  $b_n$  реконструировались лишь его компоненты по выявленным гляциометеорологическим связям между ледником и ближайшей метеостанцией. Для этого использовались метеорологические величины, с помощью которых раздельно вычисляется аккумуляция и абляция [152]. В 60-летней серии измерений положительный баланс ледника был только в пяти балансовых годах (1957/58, 1963/64,

1966/67, 1970/71 и 1971/72), а в целом объем ледника уменьшился почти на 86 млн.м<sup>3</sup>, что в слое стока со всей поверхности ледника составляет около 30 м (30425 мм). Годовые значения баланса массы и его компонентов испытывают значительные колебания год от года. На большинстве ледников мира в вариации  $b_n$ , как правило главная роль принадлежит абляции [152].

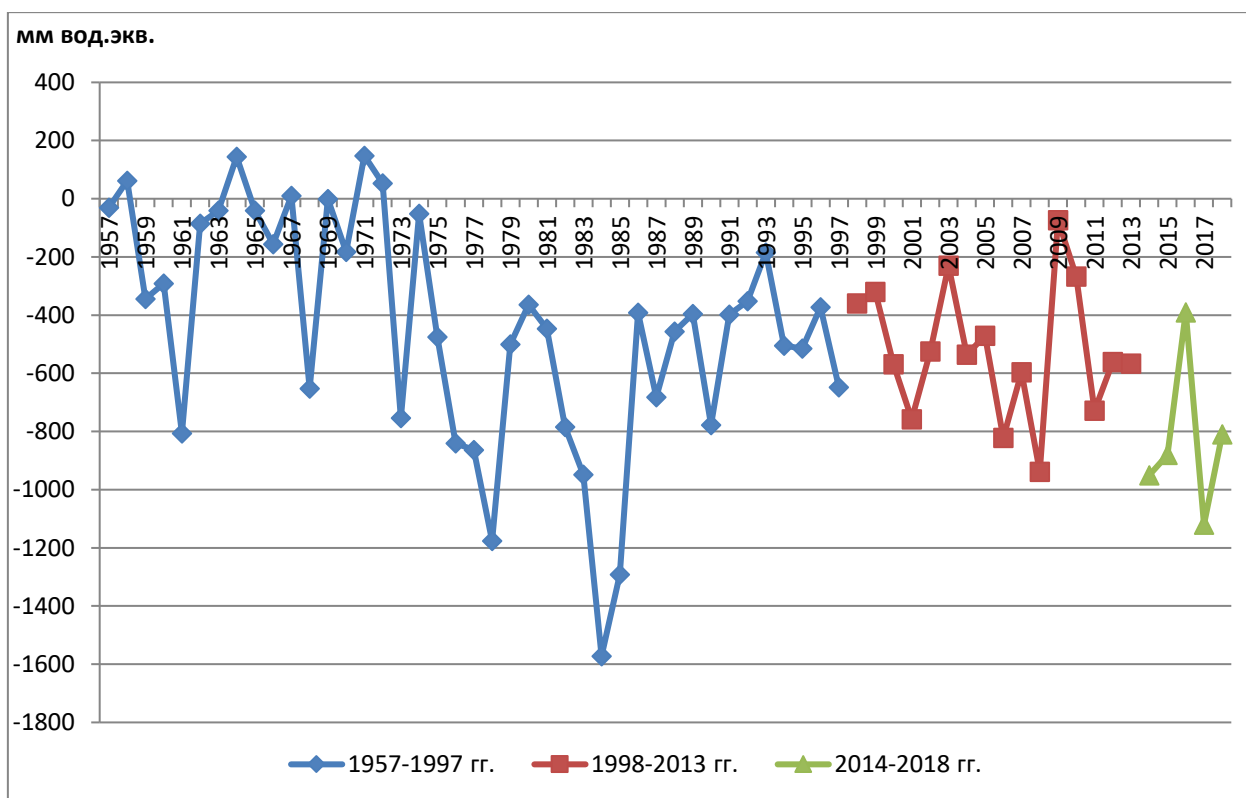


Рисунок 3.15 - Баланс массы ледника Кара-Баткак в периоды 1956/57-1996/97 гг.(ТШФГС),1998-2013 гг. (Губанов, 2017) и 2013/14-2017/18 гг. (ТШВНЦ)

Надёжным индикатором годового баланса массы ледника служит положение фирновой линии (или границы питания ELA): чем оно гипсометрически ниже, тем благоприятнее для ледника были климатические условия - возрастала снежность и уменьшалось таяние, создавая предпосылки к положительному балансу. Обратную закономерность для ледника Кара-Баткак иллюстрирует ледниковый коэффициент, т.е. отношение площадей аккумуляции и абляции (табл.3.6).

Таблица 3.6.- Соотношение площадей аккумуляции и абляции в зависимости от положения фирновой линии ледника Кара-Баткак

Год	Фирновая линия, м	Площадь аккумуляции, км <sup>2</sup>	Площадь абляции, км <sup>2</sup>	Ледниковый коэффициент
1956/57	3610	3,38	1,20	2,80
1957/58	3670	3,27	1,31	2,48
1958/59	3820	2,82	1,76	1,59
1959/60	3800	2,93	1,65	1,76
1960/61	3840	2,71	1,87	1,44
1961/62	3820	2,82	1,76	1,59
1962/63	3750	3,11	1,47	2,10
1963/64	3600	3,38	1,20	2,80
1964/65	3750	3,11	1,47	2,10
1965/66	3800	2,93	1,65	1,76
1966/67	3820	2,82	1,76	1,59
1967/68	3860	2,62	1,96	1,33
2014/15	4070	0,93	1,81	0,51
2015/16	4000	1,04	1,72	0,60
2016/17	4030	0,94	1,53	0,61
2017/18	4020	0,97	1,50	0,65

Полученные данные в период наших наблюдений свидетельствуют о тенденции подъема фирновой линии с высоты 3600-3900 м до высот более 4000 м, при которых баланс твердой массы ледника явно отрицательный, а ледниковый коэффициент меньше 1. По своей функциональной роли этот показатель эквивалентен параметру AAR, принятому в WGMS и во всей зарубежной гляциологии.

### ***3.1.5. Восстановление непрерывности ряда наблюдений на леднике***

Выше показано, что компоненты баланса массы ледника функционально связаны с рядом метеорологических параметров. Это



предопределяет возможность восстановления значений баланса за те годы перерыва, когда на леднике не велось никаких прямых наблюдений. Однако, поскольку аналогичный перерыв был допущен и в метеонаблюдениях высокогорья, задача может быть решена только путем привлечения данных с ближайших метеостанций, где была выдержана непрерывность наблюдений. Северный склон Тескей-Ала-Тоо обеспечен следующей информацией с 3-х метеостанций: Кызыл-Суу (высота 1740 м над уровнем моря, период действия – 1951-2018 гг.); Чон-Кызыл-Суу (2550 м, 1948-1991 гг. и 2007-2018 гг.) и Кара-Баткак (3300 м, 1961-1990 гг. и 2007-2018 гг.). На рис.3.16 представлены среднегодовая температура воздуха и осадки МС Кызыл-Суу в 1951-2015 гг.

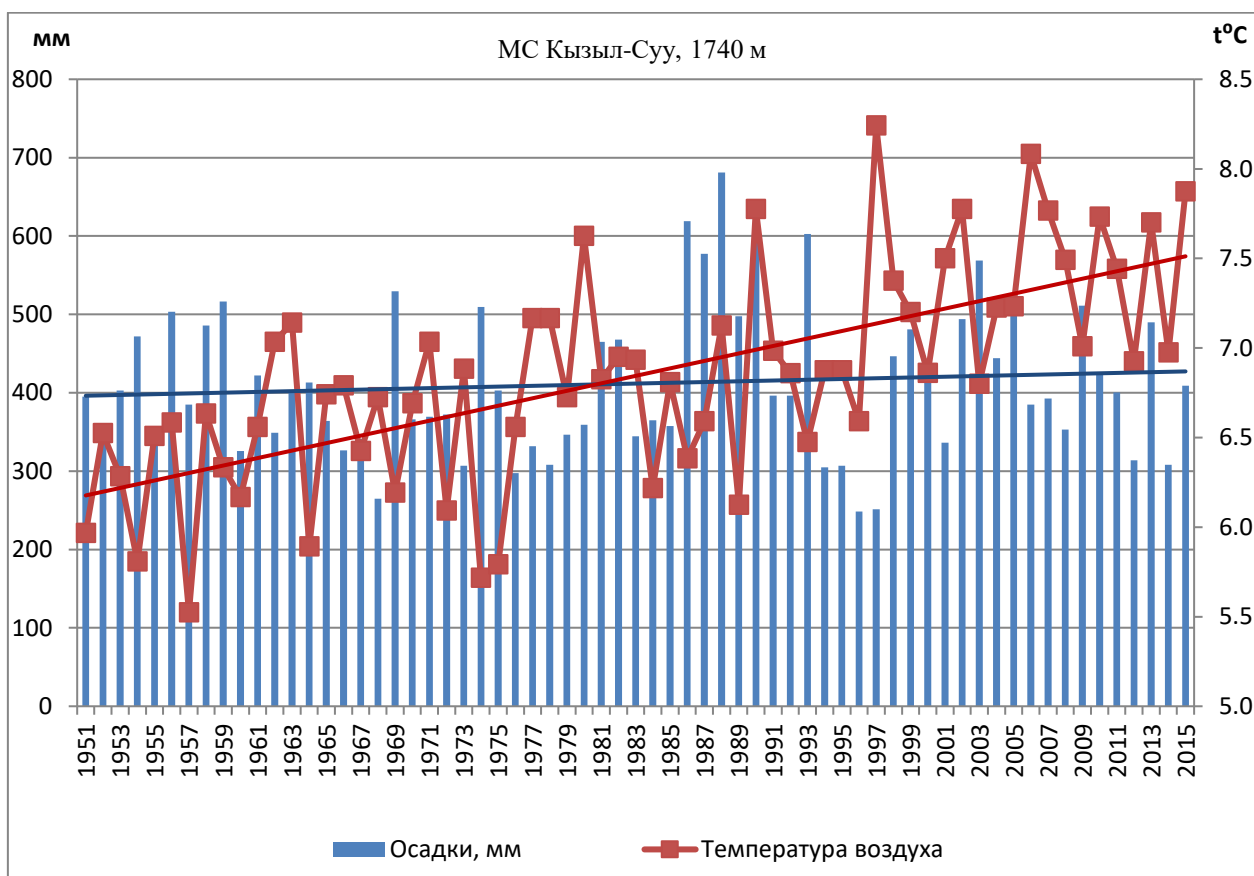


Рисунок 3.16 - Среднегодовая температура воздуха и осадки МС Кызыл-Суу в 1951-2015 гг.

Таким образом, МС Кызыл-Суу играет роль опорной. Многолетний ряд наблюдений на ней показывает, что наиболее динамичный и существенный

рост среднегодовой температуры воздуха произошёл здесь в последний период с 1995 г.

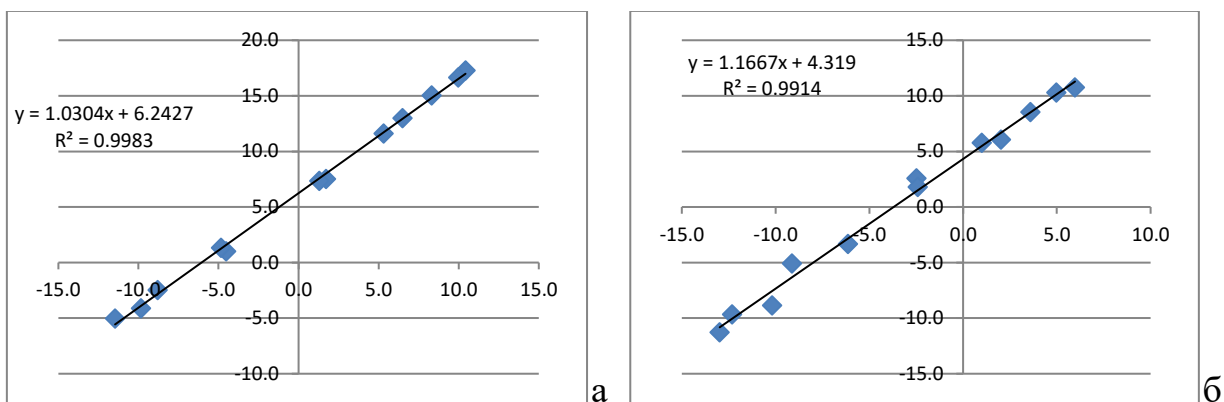


Рисунок 3.17 - Корреляционные показатели и уравнения регрессии для двухпараметрического расчёта температуры воздуха: а) МС Кызыл-Суу и МС Чон-Кызыл-Суу; б) МС Чон-Кызыл-Суу и МС Кара-Баткак

Отсутствующие данные по температуре воздуха были восстановлены нами по наблюдениям среднемесячных температур воздуха за 1951-1991 гг. на метеостанциях Чон-Кызыл-Суу и Кызыл-Суу. Уравнения выявляют достаточно тесные связи с высокими коэффициентами корреляции (рис. 3.17а). Для реконструкции данных за пропущенный период наблюдений на МС Кара-Баткак были построены графики и рассчитаны уравнения связи средних месячных температур воздуха с МС Чон-Кызыл-Суу и МС Кара-Баткак в период 1971-1983 гг. (3.17б). Сезонные тренды температуры воздуха в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу за период 1961-2015 гг. отражены в табл. 3.7.

Таблица 3.7.- Сезонный прирост температуры воздуха (°С) в бассейне р.Чон-Кызыл-Суу за период 1961-2015 гг. по прямым и восстановленным рядам метеонаблюдений

Сезон	Метеостанции		
	Кызыл-Суу	Чон-Кызыл-Суу	Кара-Баткак
Лето	0,74	-0,6	1,5
Осень	1,6	1,05	1,6
Зима	1,2	1,2	0,65

Весна	0,75	1,25	0,55
В среднем за год	1,1	0,7	1,07

Изменение атмосферных осадков за 65 лет наблюдений было не столь существенным, однако в целом тоже был выявлен положительный тренд: прирост составил около 25 мм. При этом отмечается значительная вариация количества осадков по годам.

Мнения относительно соотношения между современными темпами потепления климата в горах и на предгорной равнине различаются. Одни полагают, что скорость повышения годовых и сезонных температур воздуха возрастает по мере увеличения абсолютной высоты [161-164]. По данным других исследователей, по мере перехода от предгорных равнин к высокогорьям темпы потепления климата падают [165, 166]. Наши данные свидетельствуют о том, что в лесном поясе рост температуры воздуха в зимний и весенний сезоны составил 1,2 и 1,25°C, а в степной прибрежной зоне озера Иссык-Куль значительный рост температуры воздуха наблюдается в осенний сезон - +1,6°C за 54 лет. В скально-нивальном поясе бассейна р.Чон-Кызыл-Суу, где аккумулируются значительные по массе снежно-ледовые ресурсы, температура воздуха в летний и осенний сезон повысилась на 1,5 и 1,6°C. В связи с этим следует ожидать, что такая тенденция к изменению климатических условий в скально-нивальном поясе этого бассейна в летний и осенний сезоны может привести к уменьшению объёма стока рек в связи с интенсивной дегляциацией (даже несмотря на рост слоя стока из-за усиления таяния), к изменению баланса массы ледников и к сдвигу соотношения между генетическими составляющими речного стока. Осредненная температура воздуха за период абляции в 1949-1968 гг. составила 4,2°C, тогда как в 2013-2017 гг. она стала на 0,6 °C выше (табл. 3.8). Это свидетельствует о росте темпов убыли вещества ледника между

сравнимыми периодами на 24% вследствие повышения температурного фона гляциально-нивальнoй зоны всего бассейна р. Чон-Кызыл-Суу. Ход среднегодовой температуры воздуха на МС Кара-Баткак в 1961-2015 гг. представлен на рис. 3.18. Отчётливо выражен положительный тренд, выразившийся в приросте температуры 0,9°С за 54 года.

Таблица 3.8.- Среднемесячная температура воздуха (°С) в период абляции на леднике Кара-Баткак и её изменение между периодами 1949-1968 [52] и 2013-2018 гг.

Год	Месяцы				
	VI	VII	VIII	IX	VI-IX
2013	5,1	3,2	8,8	4,6	5,4
2014	3,3	5,7	5,3	2,6	4,2
2015	4,4	9,3	6,6	1,7	5,5
2016	3,6	5,3	4,6	4,2	4,4
2017	4,3	8,4	5,9	3,6	5,6
2018	2,5	6,3	3,6	2,6	3,8
2013-2017	3,9	6,4	5,8	3,2	4,8
1949-1968	3,8	5,5	5,1	2,3	4,2
Потепление между 1949-1968 и 2013-2017 гг.	0,1	0,9	0,7	0,9	0,6

Исходя из тенденции изменения температуры воздуха на МС Кара-Баткак и экстраполируя на будущее тот же линейный тренд, можно предположить, что в нивально-гляциальной зоне бассейна р.Чон-Кызыл-Суу средняя годовая температура воздуха к 2050 г. может повыситься на 1,2°С, а к 2100 г. – на 1,8°С. Говоря о причинах территориальных различий темпов деградации ледников и ледниковых систем, необходимо иметь в виду, что глобальное повышение температуры оказывает не прямое, а опосредованное

влияние на состояние ледников через общую циркуляцию атмосферы, облачность, солнечную радиацию и локальную температуру [167].

Выведенные соотношения характеризуются теснотой связи: коэффициент детерминации  $R^2$  равняется 0,038 для приходной составляющей и 0,270 для расходной. Учитывая то, что пропуск в рядах метеонаблюдений на МС Кара-Баткак и МС Чон-Кызыл-Суу был уже ликвидирован по непрерывной серии измеренных метеоэлементов на МС Кызыл-Суу путём вышеописанных процедур, выведенные корреляции  $b_w$  и  $b_s$  позволили сначала косвенно реконструировать годовые значения аккумуляции и абляции, а впоследствии (как их алгебраическую сумму) и сами величины баланса массы Кара-Баткака за каждый год периода пропуска в мониторинге (1997/98-2012/13 гг.). Тем самым был косвенно воссоздан непрерывный ряд важнейшего показателя эволюции опорного ледника – его баланса массы. Продолжительность полученной серии (1956/57-2017/18 гг.) составила 62 года (Приложение 2).

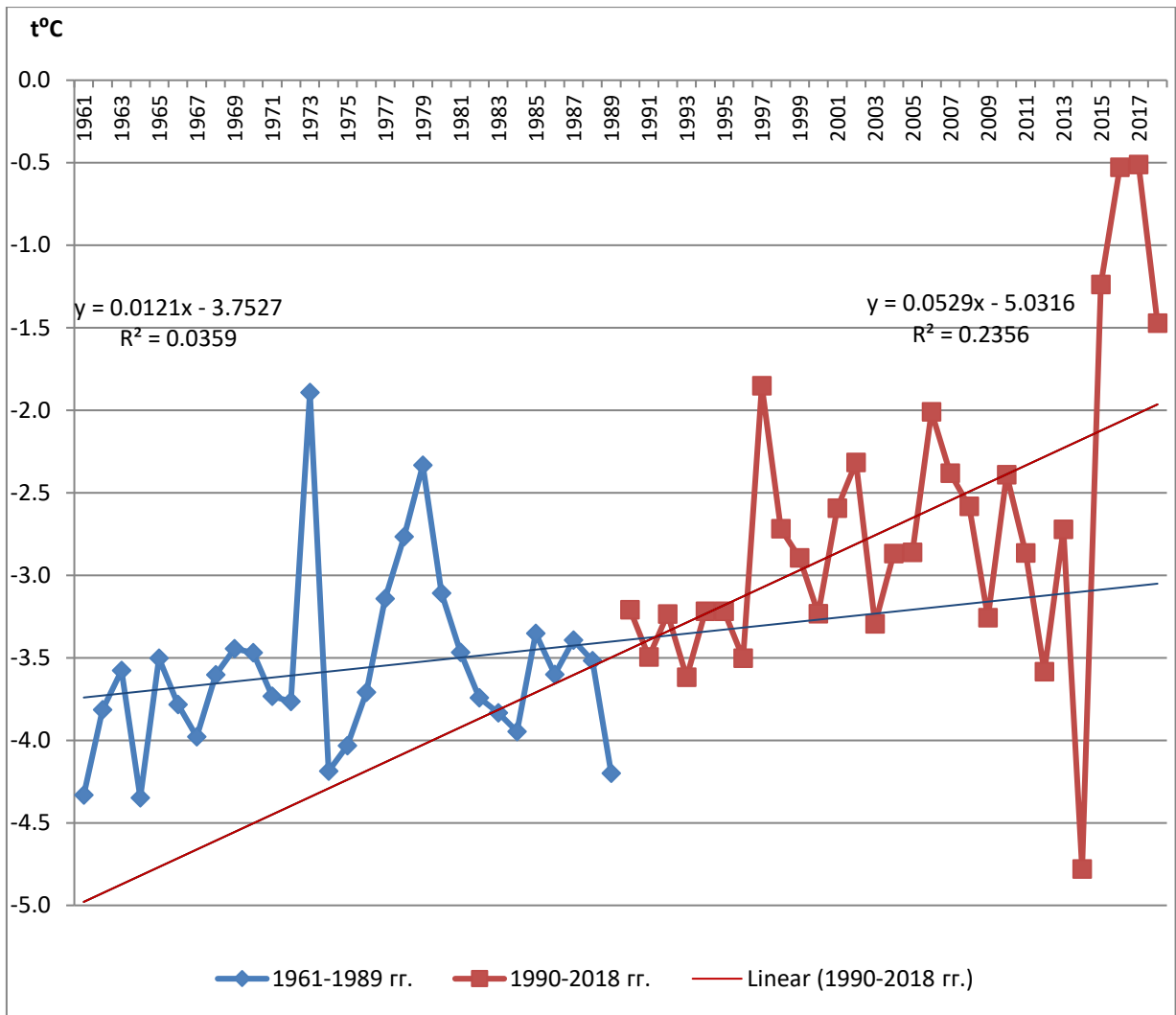


Рисунок 3.18 - Тренд среднегодовой температуры воздуха на МС Кара-Баткак

Подтверждением вышеизложенному будут представленные в табл. 3.9 данные.

Таблица 3.9.- Параметры ледника Кара-Баткак, систематизированные по росту модуля отрицательного баланса массы

Балансовый год	$T_s$	$T_w$	$T_a$	$P_s$	$P_w$	$P_a$	$b_n$ , мм вод.экв.
2015/16	8,1	-3,8	-0,8	1004	427	1431	-390
1967/68	4,4	-6,4	-3,7	370	496	866	-652
1989/90	5,6	-6,5	-3,5	442	398	840	-778
1983/84	5,9	-6,8	-3,6	275	470	746	-1572

Примечание: Нижние индексы у символов температур ( $T$ ) и осадков ( $P$ ) означают:  $a$  - годовые (январь-декабрь);  $s$  - летние (июнь-август);  $w$  - зимние (сентябрь-май).

Так, в 2015/16 балансовом году, несмотря на очень высокую летнюю температуру воздуха ( $+8,1^{\circ}\text{C}$ ), модуль отрицательного баланса массы ледника Кара-Баткак оказывается значительно сниженным. Это объясняется тем, что частые и аномально большие летние осадки (1004 мм) снизили итоговую абляцию льда. Напротив, в 1983/84 балансовом году при невысоком значении летней температуры воздуха (лишь  $+5,9^{\circ}\text{C}$ ) редкие летние осадки привели к внушительному отрицательному балансу массы. Тем самым демонстрируется роль не только термического фактора, но и летних снегопадов при формировании итоговой годовой абляции ледника.

По итогам прямых метеорологических наблюдений и произведённых прямых расчётов бюджета ледника Кара-Баткак были выведены коррелятивные соотношения между важнейшими детерминирующими метеопказателями и компонентами его баланса массы:  $b_w = 457$  мм, где  $b_w$  – зимний баланс (аккумуляция), сумма осадков с сентября по май;  $b_s = 4,6^{\circ}\text{C}$ , где  $b_s$  – летний баланс (абляция), среднелетняя (июнь-август) температура воздуха.

В течение всего этого периода кумулята баланса массы Кара-Баткака (рис. 3.19) была направлена вниз.

В середине XX века убыль его ледовых ресурсов носила более или менее постоянный характер. Но если до конца 1960-ых гг. оледенение испытывало потери вещества относительно умеренными темпами, то начиная

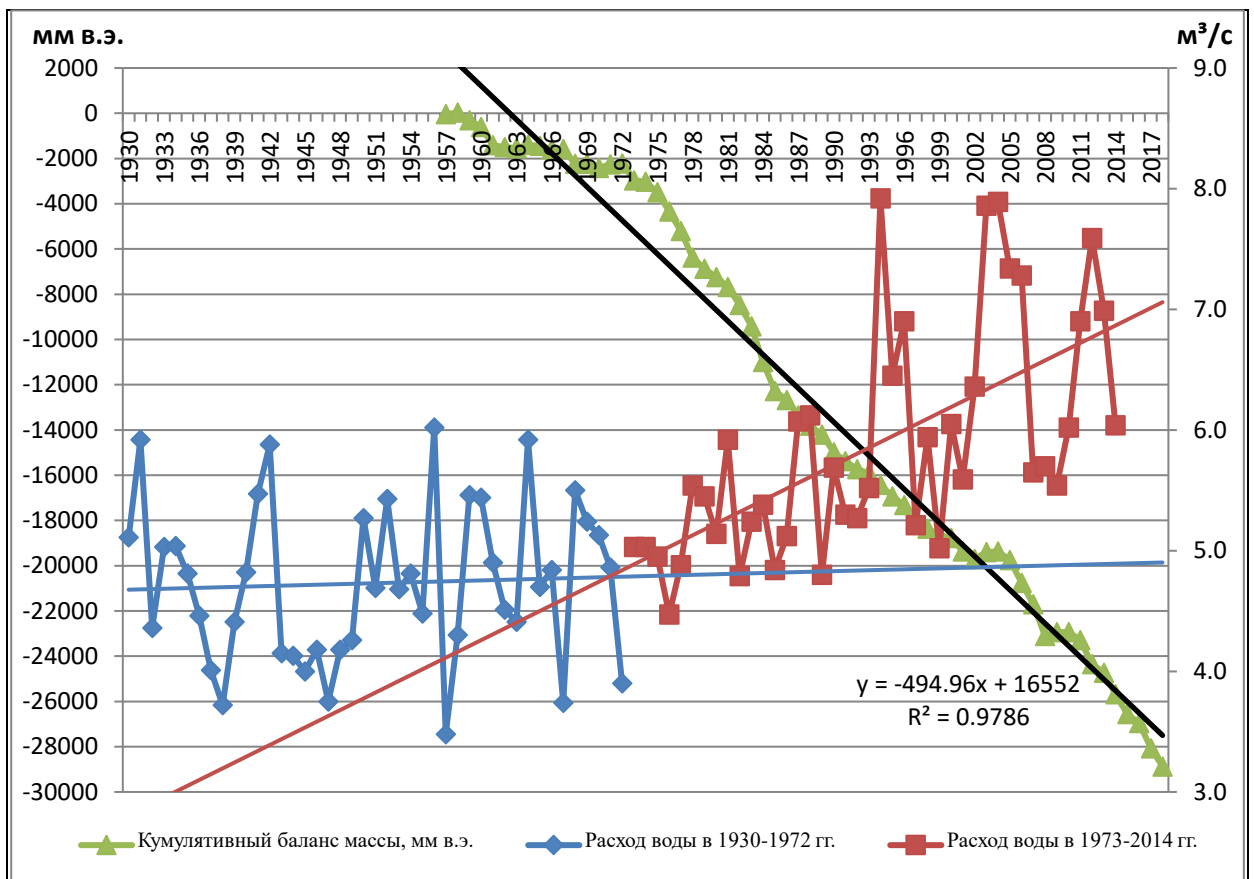


Рисунок 3.19 - Кумулятивный баланс массы ледника Кара-Баткак и среднегодовые расходы воды р.Чон-Кызыл-Суу

с 1970-ых годов в режиме ледника наступил резкий перелом, когда в 1973 г. и далее в течение нескольких лет подряд (1977-1980 гг.) регистрировались аномально высокие температуры воздуха (рис. 3.20). Именно с этого времени наклон кумулятивной кривой баланса массы ледника резко увеличился, отражая кардинальное ускорение скорости сокращения вековых запасов льда. Аналогичные изменения зафиксированы в режиме ледников Шумского в Джунгарском Алатау, Абрамова в Гиссаро-Алае и Голубина на Тянь-Шане [167].

В унисон указанной закономерности ускорения деградации оледенения вследствие потепления изменялись и расходы воды р.Чон-Кызыл-Суу, измеренные на гидропосту "Лесной кордон", что также отражено на рис. 3.19. В течение всего интервала времени, начиная с 1930 г., они демонстрируют безусловную тенденцию к возрастанию от модальных



среднегодовых значений порядка  $4,25 \text{ м}^3/\text{с}$  в начале периода до  $6,45 \text{ м}^3/\text{с}$  в последние годы.

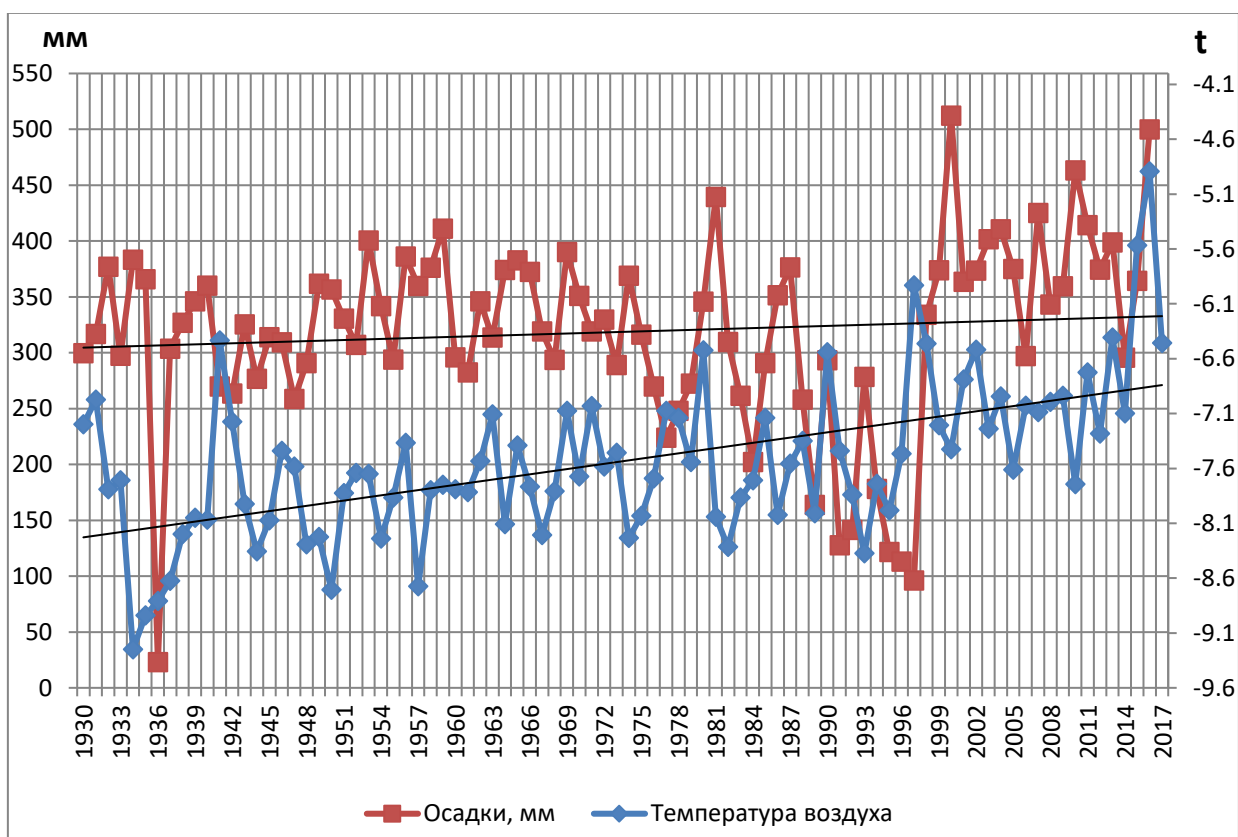


Рисунок 3.20 - Тренды изменения температуры воздуха и осадков на МС Тянь-Шань-Кумтор в период 1930-2017 гг.

При этом начальный, относительно устойчивый квазистационарный этап сменился в 1970-ые гг. стадией прогрессирующего роста водности реки, который особенно ускорился после 1994 г. В отдельные годы нормы расходов стали достигать  $8 \text{ м}^3/\text{с}$ , чего не наблюдалось на протяжении последних 90 лет.

В настоящее время ледник Кара-Баткак продолжает сокращаться. Экстраполировав данные по опорному леднику Кара-Баткак на хребет Тескей Ала-Тоо, можно охарактеризовать эволюцию оледенения в целом по хребту. Помимо бюджетных характеристик, оценена эволюция геометрических характеристик опорных ледников, что служит дополнением к масс-балансовым наблюдениям на ледниках.

Ледники ЦА находились в квазистационарном состоянии с конца 1950-х до начала 1970-х гг. [168-169]. Одной из возможных причин последующего перехода ледников в новое состояние ускорившейся деградации служит изменение атмосферного давления в центральной части Северной Атлантики в середине 1970-х гг. Это привело к формированию аномальных потоков влажного воздуха из Атлантического океана в Европу и к росту атмосферного давления в ЦА [170, 171]. Интенсификация антициклонической циркуляции на территории Тянь-Шаня в свою очередь послужила причиной уменьшения количества атмосферных осадков. Уменьшение их с 1977 по 1997 гг. подтверждается данными наблюдений на метеорологической станции Тянь-Шань, располагавшейся высоте 3614 м (рис. 3.20).

### ***3.1.6. Колебания фронта и сокращение ледника***

Сравнение карт ледника Кара-Баткак 1947 и 1964 гг. показывает, что конец языка за тот период отступил на 80-100 м (или на 5-6 м ежегодно) - рис. 3.21. По данным GPS-съёмок линейное отступление Кара-Баткака за период 1967-2017 гг. составило 450 м, что соответствует осреднённой скорости 9 м/год. Несмотря на то, что планиметрия ледника строго функционально не связана с балансом его массы, чрезвычайно важно оценить, как современная дегляциация скажется на характеристиках речного стока и водных ресурсах.

Водность ледниковой реки в объёмных единицах зависит от двух переменных: слоя стока (т.е. интенсивности абляции) и действующей площади ледника. Оба этих гидрологических детерминанта влияют на тенденции изменения объёма ледникового стока разнонаправлено. В последнее время слой стока обнаруживает явный тренд к возрастанию из-за представленного выше усиления абляции.

С другой стороны, площадь открытой части ледника Кара-Баткак с 1981 г. по 2018 г. сократилась от 3,0 до 2,476 км<sup>2</sup>, т.е. ежегодное уменьшение составляло в этот период 0,014 км<sup>2</sup>. Если открытая часть будет продолжать сокращение теми же темпами, к 2030 г. площадь Кара-Баткака может уменьшиться до 2,31 км<sup>2</sup>, к 2050 г. – до 2,02 км<sup>2</sup>, а к 2100 г.- уже до 1,31 км<sup>2</sup>.

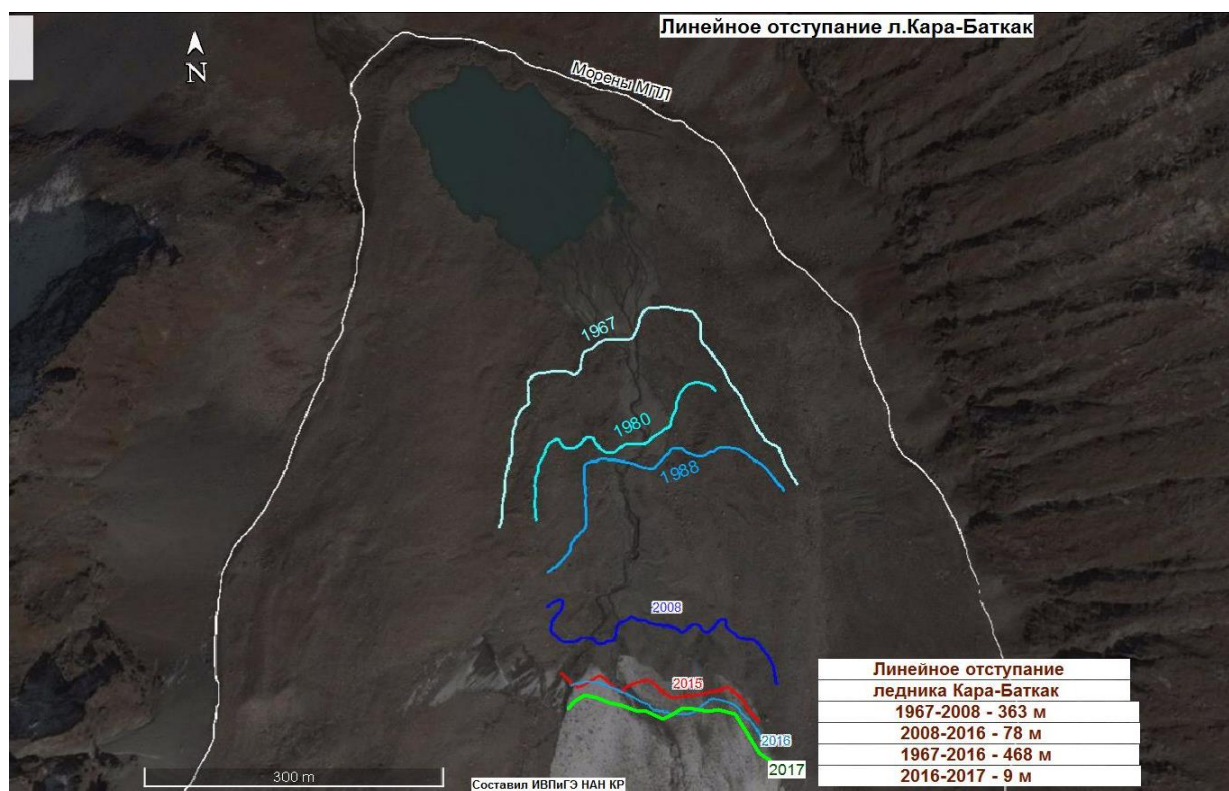


Рисунок 3.21 - Линейное отступление ледника Кара-Баткак за 1967-2017 гг., составившее в сумме 450 м (т.е. 9м/год).

За 2014-2017 гг. годовой объём ледникового стока составлял в среднем 3452 тыс.м<sup>3</sup>, т.е. талый сток с 1 км<sup>2</sup> равнялся 1342 тыс.м<sup>3</sup>. Ожидания дальнейшего увеличения стока на современном этапе развития оледенения вполне логичны: потепление обеспечивает всё больший и больший слой стаивания снега и льда и, соответственно, больший объём талого стока. Прибавка стока с ледника Кара-Баткак вследствие увеличения слоя стаивания как реакции на повышение летней (июнь-август) температуры воздуха с 2019 г. до 2028 г. может составить 620 тыс.м<sup>3</sup> (Приложение 3). Однако с 2028 г. вектор процесса неминуемо должен смениться: эффект

убыли ледникового стока вследствие сокращения площади ледника может уже превысить упомянутую прибавку за счет увеличения слоя стаивания. В случае реализации вышеописанного сценария сокращения площади ледника Кара-Баткак и при сохранении существующей тенденции у слоя стока к 2050 г. объём ледникового стока может упасть до 2692 тыс.м<sup>3</sup>, а к 2100 г.- уже до 1750 тыс.м<sup>3</sup>. Соответственно, водность ледниковой реки сократится на 14 и 44%.

### **3.2. Влияние климатических изменений на речной сток Иссык-Кульской котловины**

Водность рек Иссык-Кульской котловины обусловлена не только площадью их водосборов и имеющихся там ледников, но и различием типов питания и местных климатических условий. Согласно цифровой модели, построенной Куьмиченком В.А., в центральной части северного склона хр.Тескей Ала-Тоо модуль общего стока увеличивается с высотой возрастая от 2,5 до 9,6 и 34,0 л/с/км<sup>2</sup> на высотах 2000 м, 3000 м и 4000 м, соответственно [172]. Кроме того, здесь имеет место резко выраженная различие климатических условий в широтном направлении: засушливая западная часть котловины и влажная восточная часть. С большими различиями этих особенностей связаны значительные различия гидрологических характеристик рек, и в первую очередь их водоносность.

В Иссык-Кульской котловине в период 1942-1972 гг. суммарный среднегодовой приток в озеро Иссык-Куль (иначе – приточность в озеро из зоны формирования стока рек котловины), составил 118 м<sup>3</sup>/с, а в период 1973-2008 гг. - 128 м<sup>3</sup>/с [39], по нашим данным, в период 2011-2017 гг. - 132 м<sup>3</sup>/с. Увеличение притока в последний период на 14,6 м<sup>3</sup>/с или на 12,3% можно отнести на счет увеличение ледникового стока.

В Иссык-Кульской котловине с 1942 г. по 2008 г. действуют 17 гидрологических постов, в основном расположенных на реках ледниково-

снегового типа питания перед их выходом на приозерную равнину, то есть выше забора воды на орошение, поэтому они характеризуют природные изменения стока.

По данным [39] за 66 лет сток этих рек увеличился на 24 % (табл. 3.10), особенно в июнь и июль - на 27,9 и 22,3 м<sup>3</sup>/с, что связано с повышением температуры воздуха (см. табл. 3.4); увеличение стока в сентябре и октябре на 18,2 и 17,6 м<sup>3</sup>/с объясняется установленными нами увеличением продолжительности абляционного периода до 100 дней (см. табл.3.4), что имело место в период наших наблюдений.

Таблица 3.10.- Изменения стока 17 рек по месяцам с 1942 по 2008 гг., м<sup>3</sup>/с [39]

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1942 г.	19,1	17,4	15,9	25,7	60,5	104,6	148,7	146,2	66,9	32,1	23,9	21,6	56,8
2008 г.	26,0	24,0	24,5	37,0	71,1	132,5	171,0	156,2	85,1	49,7	36,5	29,8	70,3
ΔQ	6,9	6,6	8,6	11,3	10,6	27,9	22,3	10,0	18,2	17,6	12,6	8,2	13,5

### 3.2.1. Ледниковый сток р.Кашка-Тор

Ледниковая составляющая стока горных рек складывается из воды, образующейся вследствие поверхностного, внутри- и подледникового стока. Однако, согласно работам Г.А.Авсюка [173], подледниковое и внутриледниковое таяние на ледниках Тянь-Шаня вследствие низких температур отсутствует или ничтожно мало. Поэтому в качестве основного источника формирования стока с ледников Иссык-Кульской котловины нами принято его поверхностное таяние, что и было учтено при расчете ледникового стока. Базовым полигоном служил горно-ледниковый бассейн Кара-Баткак.

Поскольку высотные отметки ледника Кара-Баткак и замыкающего створа на гидрологическом посту Кашка-Тор-исток, вытекающего из этого ледника, превышают 3260 м, нулевая изотерма поднимается на эту высоту в конце мая - начале июня, когда начинается процесс таяния сезонного снега на леднике. С этого времени нами начинаются наблюдения за уровнем и расходами воды р.Кашка-Тор.

По данным измеренных расходов воды р. Какшка-Тор строилась и периодически обновлялась кривая зависимости расходов воды от ее уровня. По данным двусрочных наблюдений (в 08.00 и 17.00) подсчитывались среднесуточные уровни воды, а по зависимости  $Q=f(H)$  - рассчитаны среднесуточные расходы воды и строились гидрографы стока (рис. 3.22).

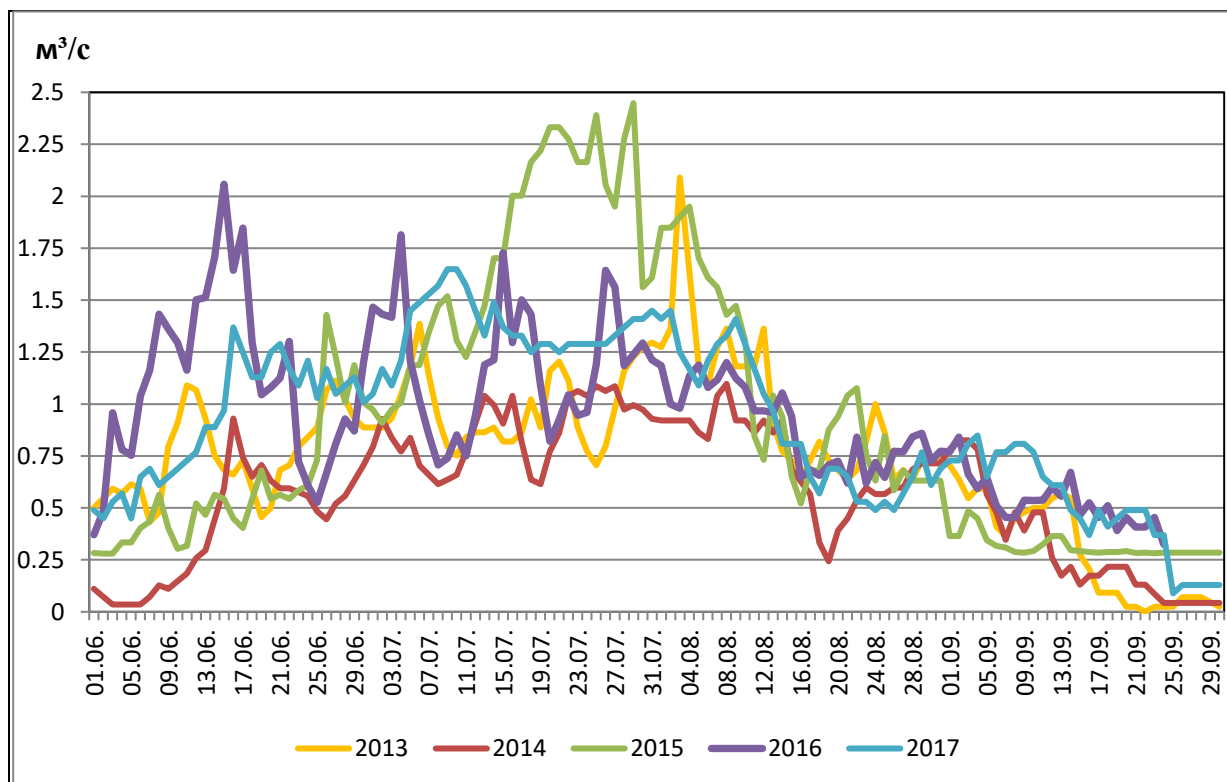


Рисунок 3.22 - Средние суточные расходы воды р.Кашка-Тор в периоды абляции

Гидрографы служат основным средством информации для суждений о генезисе источников формирования стока р.Кашка-Тор и для расчёта каждой генетической составляющей стока: снеговой (осадки холодного периода), ледниковой, дождевой (осадки теплого периода). Сток талых ледниковых вод зависит не от запасов снега, накопившихся в бассейне за холодный период, что характерно для сезонно-снеговой составляющей, а от притока тепла к поверхности льда в летнее время, т.е. от термического режима периода абляции.

За основную характеристику расчета величины таяния взят слой стока. Слой стока  $h$  (мм) - количество воды, стекающей с водосбора за какой-либо интервал времени (в данном случае за апрель-ноябрь месяцы), равное толщине слоя, равномерно распределенного по площади водосбора [174]. При расчете слоя стока снегового и дождевого питания учитывалась вся площадь водосбора 7,53 км<sup>2</sup>, а при расчете ледникового стока – только площадь ледника без забронированной его части – 2,5-2,47 км<sup>2</sup>. Сезонный гидрограф стока - многопиковый, в нем выделяется несколько снеговых и ледниковых пиков паводка, которые четко согласуются с ходом среднесуточной температуры воздуха.

На рисунке 3.23 приведена связь средних месячных расходов воды р.Кашка-Тор и средней месячной температуры воздуха на леднике Кара-Баткак за паводковый период 2013-2016 гг. Коэффициент корреляции связи высокий и равен 0,73 и 0,82 [175].

Графики связи построены в двух вариантах: 1-ый для всех месяцев периода половодья (июнь-сентябрь); 2-ой - для месяцев преимущественно ледникового стока - июль, август.

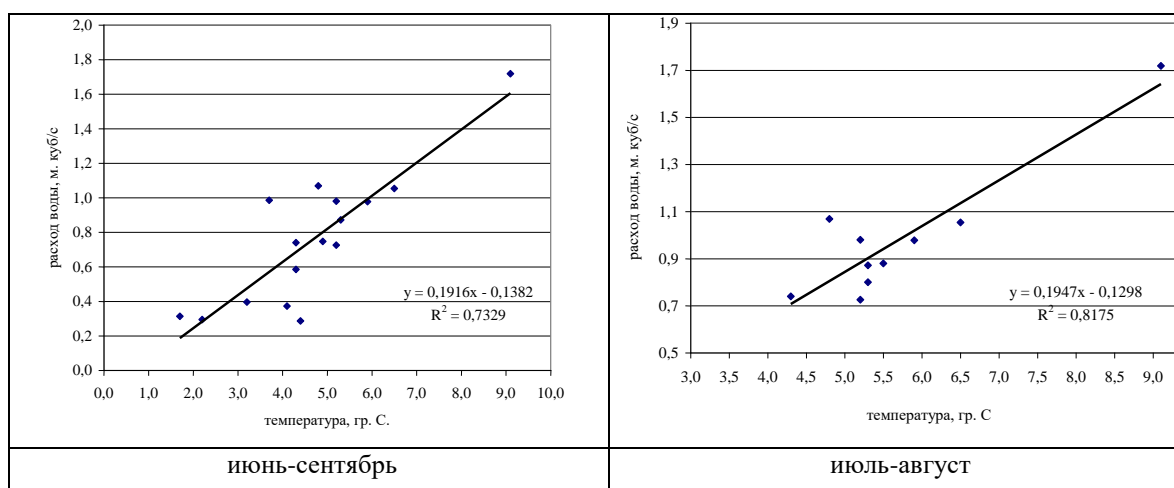


Рисунок 3.23 - Связь средней месячной температуры воздуха на леднике Кара-Баткак и средних месячных расходов воды р.Кашка-Тор

Вторая связь дает меньшую погрешность (отклонение) расчета расхода воды за июль месяц. Отклонение измеренных и расчетных значений средних

месячных расходов воды показали, что наибольшее значение величина отклонения имеет место в месяцы с аномально высокой или низкой температурой воздуха относительно средних многолетних значений.

Полученное уравнение связи:

$$y=0,192x - 0,138 \quad (3.1)$$

может использоваться для расчета среднего месячного расхода воды (или слоя стока) с ледника Кара-Баткак в период половодья (VI-IX), а уравнение:

$$y=0,195x-0,130 \quad (3.2),$$

- для месяцев июль-сентябрь при наличии данных наблюдений температуры воздуха.

В период абляции темпы таяния значительно колеблются, чередуются подъёмы и спады, которые довольно синхронны с ходом температуры воздуха и находятся в противофазе с выпадающими осадками. Вызвано это тем, что при выпадении осадков и в условиях облачности понижается температура воздуха и, как следствие, сокращается таяние ледника как за счёт термического фактора, так и вследствие увеличения альbedo поверхности и доли отражённой радиации, в результате чего происходит понижение уровня воды и сокращение стока.

Во все месяцы половодья водность р.Кашка-Тор в последние годы превышает ту, что была полвека назад, - в среднем на 64%. Это свидетельствует о проявляющемся потеплении. Таким образом, увеличение ледникового стока является индикатором изменения климата.

Однако каждый из наблюдаемых нами сезонов 2013-2017 гг. имеет отличительные гидрометеорологические особенности (рис. 3.24-3.26),а именно:

**2013 г.** Продолжительность абляционного сезона 90 дней, значительное количество осадков. Особенно много их в виде дождя пришлось на начало августа, что способствовало формированию экстремального расхода воды смешанного питания (срочный максимальный расход воды был в пределах



6,0 м<sup>3</sup>/с, среднесуточный за июнь-сентябрь – 2,09 м<sup>3</sup>/с). Экстремальные максимальные расходы в реке в том году образовались в результате сочетания дождевых вод с талыми ледниковыми. Так, ливень 3 августа, выпавший на ледник, привёл к интенсивному стоку воды с поверхности ледника.

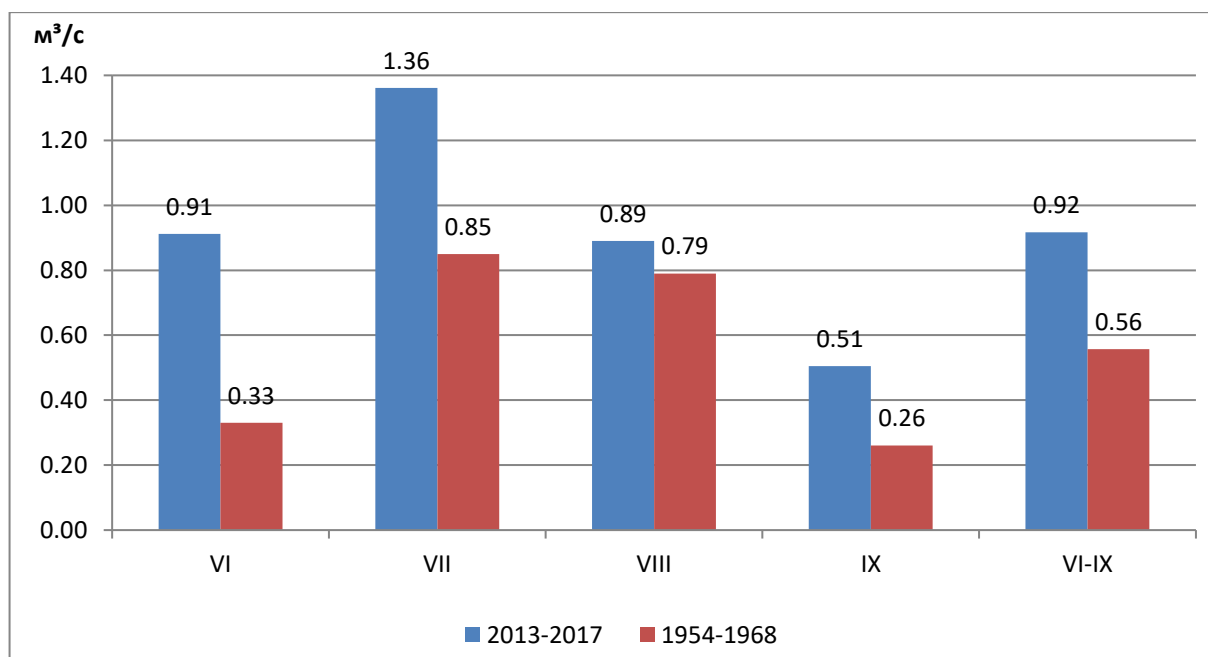


Рис. 3.24. Среднемесячный сток р.Кашка-Тор- исток по результатам ежедневных наблюдений за уровнем и расходом воды

**2014 г.** Продолжительность абляционного сезона 104 дня. Среднемесячные температуры в июнь-сентябрь месяцы были ниже средних многолетних значений (+4,8<sup>0</sup>С), что сдерживало процесс таяния сезонного снега и абляцию ледника. Запасы воды в сезонном снеге на всём леднике Кара-Баткак составили 340 мм (см. рис.3.1). Осадки балансового года были также в 2 раза меньше (570 мм). Этот год был самым холодным и маловодным (7430 мм). Снеговой сток составил 27% (при среднем многолетнем значении 45% [52].) ледниковый – 68% (при среднем многолетнем 50% [52].), а дождевой - 5%.

**2015 г.** Продолжительность абляционного сезона 97 дней. Запасы воды в сезонном снеге на всём леднике Кара-Баткак составили 500 мм (см. рис.3.1).

Снеговой сток 26%, ледниковый – 70%, дождевой - 4%. Сток периода половодья был выше средних многолетних значений (11408 мм), поскольку аномально высокая среднемесячная температура в июнь-сентябрь месяцы (+5,4<sup>0</sup>С) способствовала интенсивной абляции ледника.

**2016 г.** Продолжительность абляционного сезона 104 дня. Значительное зимнее снегонакопление (550 мм) и осадки мая-июня обеспечили высокий снеговой сток. Аномально большое количество осадков выпало в теплый период (458 мм). Температура сентября месяца была выше средних значений на 1,5<sup>0</sup>С, что способствовало значительному для этого месяца таянию ледника. В результате сток был выше средних многолетних значений (11526 мм). Год был самым увлажненным (1145 мм). Снеговой сток составил 37% ледниковый – 57%, дождевой - 5,5%.

**2017 г.** Запасы воды в сезонном снеге на всём леднике Кара-Баткак составили 560 мм (см. рис.3.1). Продолжительность абляционного сезона 105 дней. Снеговой сток 25%, ледниковый – 72%, дождевой - 3%. Объясняется это интенсивной абляцией ледника из-за продолжительностью абляционного сезона, высоких положительных температур воздуха в летний период, интенсивными осадками холодного периода, малым количеством осадков теплого периода и высокой температурой в период таяния (+5,6<sup>0</sup>С). Сток р.Кашка-Тор (11399 мм) был выше средних многолетних значений [52].

Результаты расчленения гидрографа стока р. Кашка-Тор за 2013-2017 гг. сведены в табл.3.11, где все составляющие приведены в мм и % от суммарного стока. В табл.3.11 представлен сток и со всего бассейна ледника Кара-Баткак, включая фирновую зону, язык ледника и окружающие склоны, т.е. весь сток, который фиксировался на гидропосту Кашка-Тор-исток.

Из полученных результатов следует, что генетические составляющие стока изменяются в значительных пределах: сезонная снеговая от 25% до 40% (среднее 31%); ледниковая от 52% до 72% (при среднем 64%); дождевая от 3% до 8% (при среднем 5%). Ранее, в 1963-1968 гг., доли этих

составляющих в среднем равнялись: снеговая - 45%; ледниковая – 50%; дождевая – 5% [20], то есть за истекший период времени доля снегового питания уменьшилась, ледникового – возросла, а дождевого – осталась неизменной.

За период наших наблюдений наибольший слой стока с ледника Кара-Баткак был зарегистрирован в 2017 г., когда ледниковая составляющая стока

Таблица 3.11.- Результаты расчленения гидрографа стока р.Кашка-Тор [185]

Составляющие стока	Год	Период					
		Июнь-июль		Июль-сентябрь		Июнь-сентябрь	
		мм	%	мм	%	мм	%
Снеговое (осадки X-V)	2013	2694	40				
	2014	1350	27				
	2015	2082	26				
	2016	2615	37				
	2017	2848	25				
Ледниковое	2013			3514	52		
	2014			3447	68		
	2015			5736	70		
	2016			3974	57		
	2017			7239	72		
Дождевое (осадки VI-IX)	2013					510	8
	2014					234	5
	2015					312	4
	2016					383	5,5
	2017					271	3
Сумма слоя стока с ледника Кара-Баткак, мм	2013	6718					
	2014	5031					
	2015	8130					
	2016	6972					
	2017	10358					

достигала максимума - 72%. Это было predetermined метеорологической спецификой периода абляции в 2017 году:

- по сравнению с 2013 и 2015 гг. количество дней с осадками было равным, но осадков выпало меньше - всего 306 мм;

- была зафиксирована самая высокая температура воздуха (+5,6<sup>0</sup>С);
- период абляции отличался исключительной продолжительностью - 105 дней.

По данным снегомерных наблюдений на леднике Кара-Баткак в период 2013-2018 гг. тах запас воды в снеге составил 470 мм в.э. в зоне абляции ледника и 801 мм в.э. в зоне аккумуляции, при среднем значении 512 мм вод.эquiv. Если принять испарение со снега, которое определено расчетным методом как 19% от суммарных снегозапасов, то запасы воды в сезонном снеге составили 415 мм в.эquiv., умноженные на площадь ледника (2,5 км<sup>2</sup>), и эта величина составила 1037500 м<sup>3</sup>. В среднем за период 2013-2017 гг. сток с ледникового бассейна р.Кашка-Тор-исток составил 7375 мм, так что добавка в сток по сравнению с 1957-1968 гг. составила 2030 мм.

Среднегодовой расход воды у истока р.Кашка-Тор увеличился между сравниваемыми периодами с 0,22 до 0,33 м<sup>3</sup>/с (рис. 3.25), водность реки возросла на 50%.

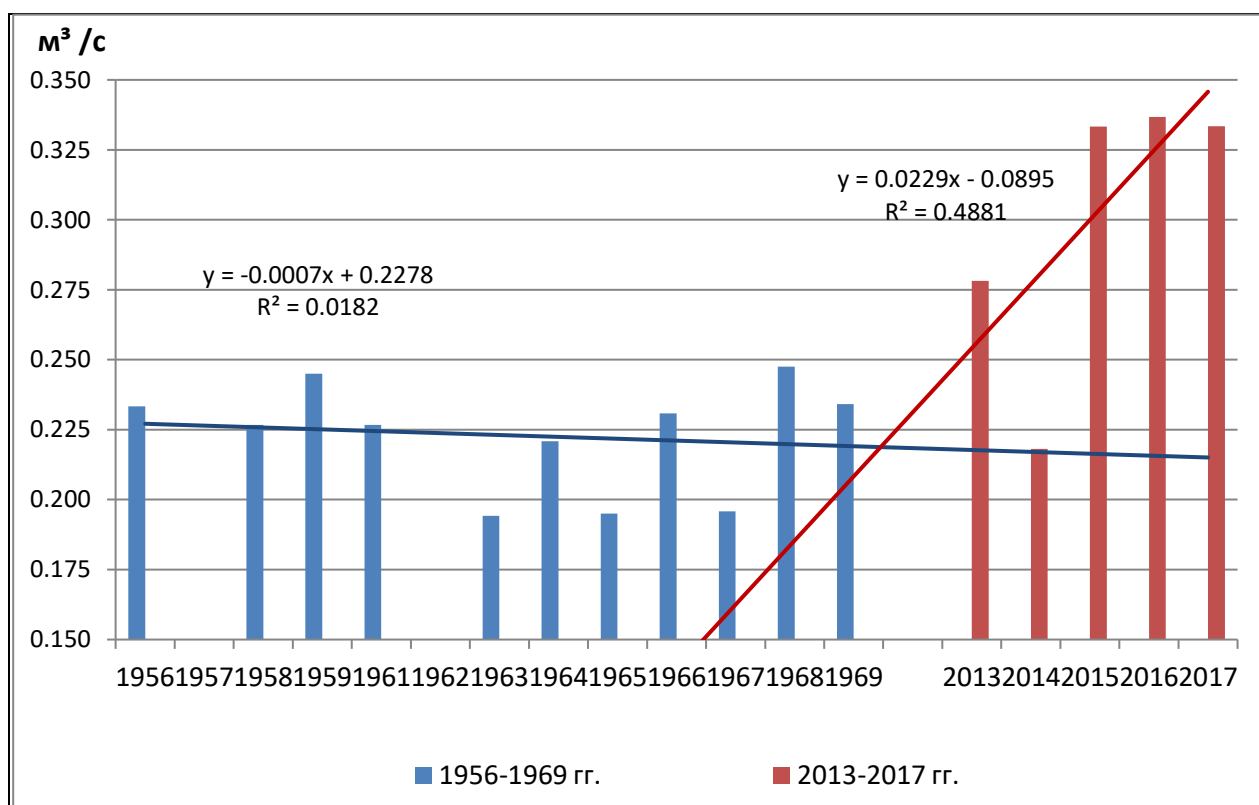


Рисунок 3.25 - Годовые расходы воды на створе Кашка-Тор-исток

Увеличение стока на современном этапе развития оледенения вполне логично: потепление обеспечивает относительно большой слой стаивания снега и льда и следовательно большой объем талого стока. Но на каком-то этапе убыль ледникового стока вследствие сокращения площади ледника может превысить упомянутую прибавку за счет увеличения слоя стаивания.

Выявленная тенденция дает основание предположить наличие в природе некоего компенсационного механизма. Таким механизмом может быть все большее (по мере потепления климата) участие в формировании речного стока талых вод погребенных льдов. Следует учесть, что доля талых вод погребенных льдов в речном стоке по мере деградации оледенения увеличивается, поскольку все большая часть открытой ледниковой поверхности переходит в состояние погребенной. Поэтому оценка запасов льда на заморенных и забронированных ледниках является актуальной в ближайшей перспективе.

### **3.2.2. Особенности водного режима рек Тескей-Ала-Тоо на примере бассейна р.Чон-Кызыл-Суу**

Все реки северного макросклона хр.Тескей-Ала-Тоо зарождаются в гляциальном поясе высокогорья и стекают в предгорья Иссык-Кульской котловины, теряя по высоте 1,5-2 км. При таких значительных вертикальных перепадах наблюдаются серьёзные различия в водном режиме высотных поясов исследуемых водосборов. Особенности гидрографов этих рек нами изучены на примере р.Чон-Кызыл-Суу. В ледниковом поясе на гидрографах стока в начале тёплого сезона всегда выделяется период снегового таяния, характерный для интервала времени до открытия ледниковых языков из-под зимнего снега – с 1 июня по 8-19 июля (рис.3.26). В этот период на гидрографе отмечены пики снегового стока. Далее на гидрографах

отмечается резкий спад, связанный с истощением снеготпасов на леднике. Начиная с 9-20 июля (в зависимости от года), с повышением температуры воздуха начинается постепенное увеличение стока, обусловленное таянием ледника (ледниковый сток)

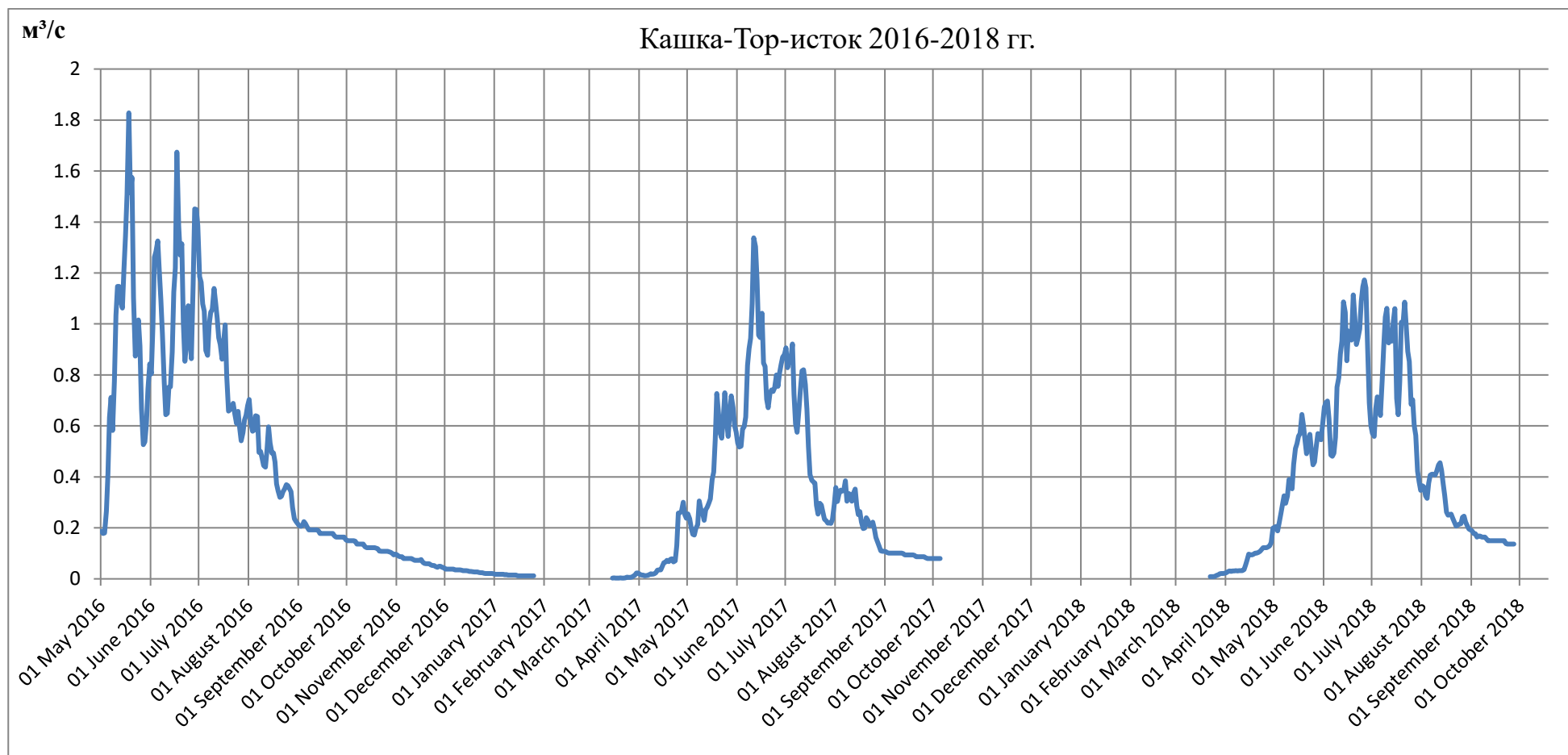


Рисунок 3.26 - Гидрографы стока р.Кашка-Тор за 2016-2018 годы

К этому времени язык в целом уже открыт. Период ледникового паводка составляет 73-86 дней, а продолжительность всего периода таяния доходит до 122 дней. Сток в сентябре обеспечивается не только талыми водами (повышение температуры сентября нынче продлило период таяния), но и водами, аккумулированными ледником и моренами в течение всего паводкового периода. Максимальная водоносность рек ледниково-снегового питания отмечается в июле, хотя в отдельные годы наблюдается и в августе. В паводковый период спады на гидрографе стока связаны с понижением температуры воздуха и, как правило, с выпадением твердых осадков.

Участие осадков периода половодья (июнь-сентябрь) в формировании стока (условно-дождевое) нами рассчитано по данным об осадках, которые переведены в слой стока со всей поверхности водосбора. Поскольку коэффициент стока летних осадков в теплый период равен 1,0, практически все выпавшие осадки участвуют в формировании стока и учтены как дождевое питание. Важной особенностью трансформации ледникового стока в русловой является то, что концы ледников связаны с гидрографической сетью постоянным руслом. Характерной особенностью водного режима рек ледниково-снегового питания является значительная внутри- и межсуточная изменчивость стока, которая обусловлена суточным ходом метеорологических элементов – температурой каждого конкретного дня и осадками. Выпадение осадков связано с вторжением холодных масс, приводящих к резкому снижению температуры воздуха и сокращению, а порой полному прекращению таяния. Ежегодно водность в створе Кашка-Тор-исток (3260 м) ниже ледника Кара-Баткак обусловлена метеорологической спецификой текущего лета, а именно - сочетанием температуры воздуха и атмосферными осадками. Так, если в 2014 г. и температура воздуха, и осадки были ниже нормы, то и сток (5031 мм) закономерно был также ниже среднего. А в 2015 и 2017 гг. при очень высоких температурах летнего периода и осадках в пределах нормы суммарный сток в истоке р.Кашка-Тор (8130 и 10358 мм, соответственно) был выше нормы,



означая, что определяющее влияние на годовой сток имела температура воздуха.

На внутригодовое распределение стока оказывают влияние и почвенно-геологические условия речных бассейнов, которые определяют местные особенности трансформации поступивших на водосбор осадков. В холодное время года с октября по март речной сток формируется главным образом за счет подземных вод, аккумулированных в речных бассейнах за предшествующий теплый период. В створах, расположенных в нижнем течении реки, определённую долю в зимних расходах могут составлять талые ледниковые воды, профильтрованные сквозь рыхлые аллювиальные отложения уже после выхода за пределы гляциального пояса и задержавшиеся в грунтах до наступления холодов.

На рис. 3.27 представлена изменчивость среднегодовых и зимних (с октября по февраль) расходов в нижнем течении р.Чон-Кызыл-Суу, измерявшихся

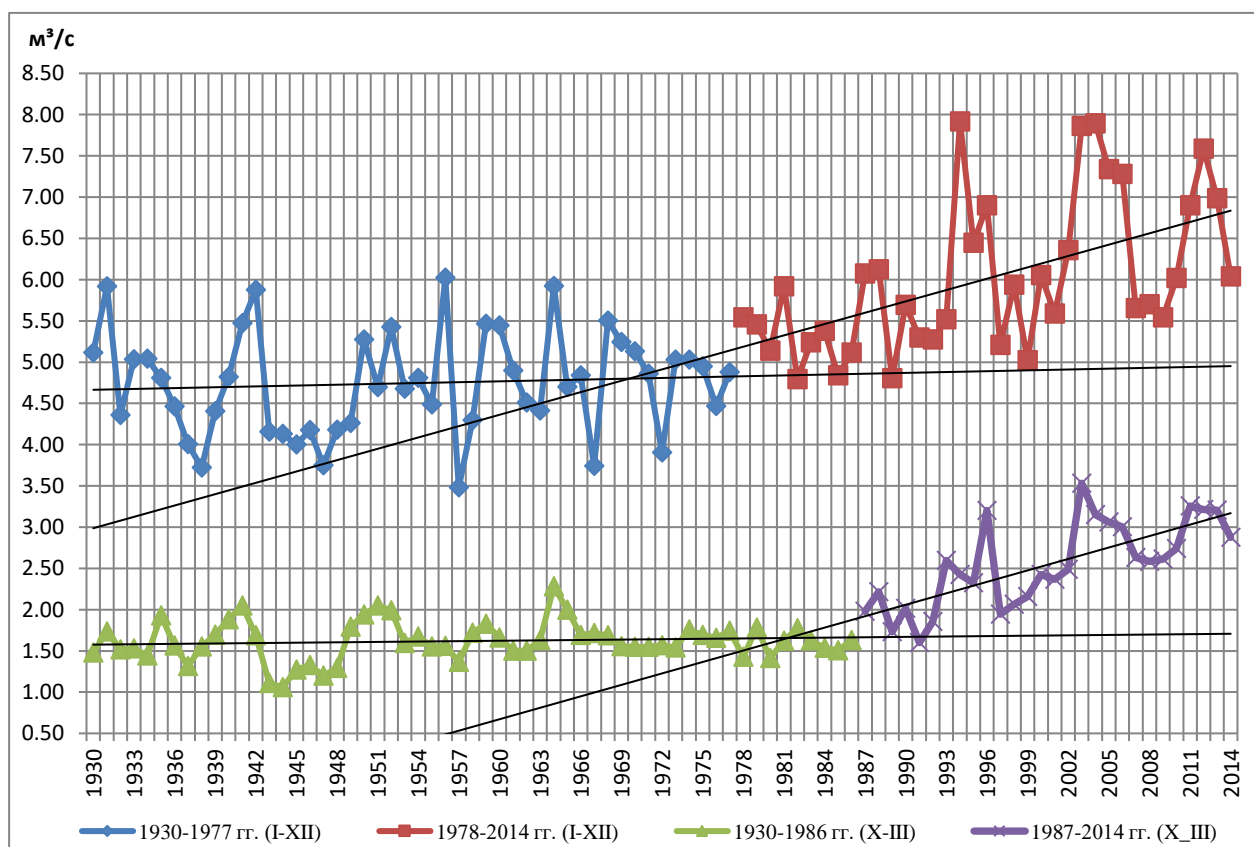


Рисунок 3.27- Осреднённые среднегодовые расходы и зимнего периода (октябрь-февраль) р.Чон-Кызыл-Суу на гидростворе «Лесной кордон» (2000 м)

в 1930-2014 гг. на гидростворе «Лесной кордон». Тренды среднегодовых расходов с 1930 по 1976 гг. не указывает на увеличение расходов реки, а с 1977 г. свидетельствует о их росте; при этом увеличение зимних расходов наступает с задержкой почти 10 лет. Указанное обстоятельство позволяет предположить влияние подземных вод на изменение руслового баланса реки. С увеличением расхода этой и аналогичных рек связан подъем уровня грунтовых вод в Иссык-Кульской котловине, что будет показано в следующей главе.

В период интенсивного таяния сезонных высокогорных снегов и ледников, а также за счет летних осадков за март – сентябрь через створ Кашка-Тор-исток проходит 90% всего годового стока, через створ Кашка-Тор-устье - 80% и через створ, замыкающий нижнюю часть бассейна Лесной кордон - 63%. Наибольшим стоком отличается половодье с июня по август включительно, в течение которого на вышеупомянутых створах соответственно проходит 76, 62 и 46% годового стока. Иными словами, чем выше средняя высота бассейна, тем больше доля стока июня–августа в годовом стоке. Высотная поясность природных условий позволяет рассматривать средний сток как функцию средней высоты водосбора.

На рис.3.28 виден положительный тренд осредненных летних расходов р.Чон-Кызыл-Суу, при этом увеличение стока за 1930-2017 гг. составило 45%, что вызвано повышением ледниковой составляющей стока в верховьях реки (см. табл.3.12). Поскольку сток р.Чон-Кызыл-Суу формируется за счет таяния сезонного снежного покрова, таяния ледников и снегов в гляциально-нивальном зоне и за счет летних осадков, уровенный режим реки характеризуется четко выраженным суточным ходом с ранней весны и до окончания половодья. Уже с апреля обнаруживается хорошо выраженный суточный ход на створах, расположенных в нижней и средней частях бассейна. Это вызвано изменением интенсивности таяния снежного покрова, связанного с колебаниями

температуры воздуха в течение суток. При похолоданиях и пасмурном небе таяние снега прекращается, и суточный ход уровня почти не наблюдается. Суточные амплитуды колебания уровня в реке весной в ясные дни невелики и составляют всего несколько сантиметров.

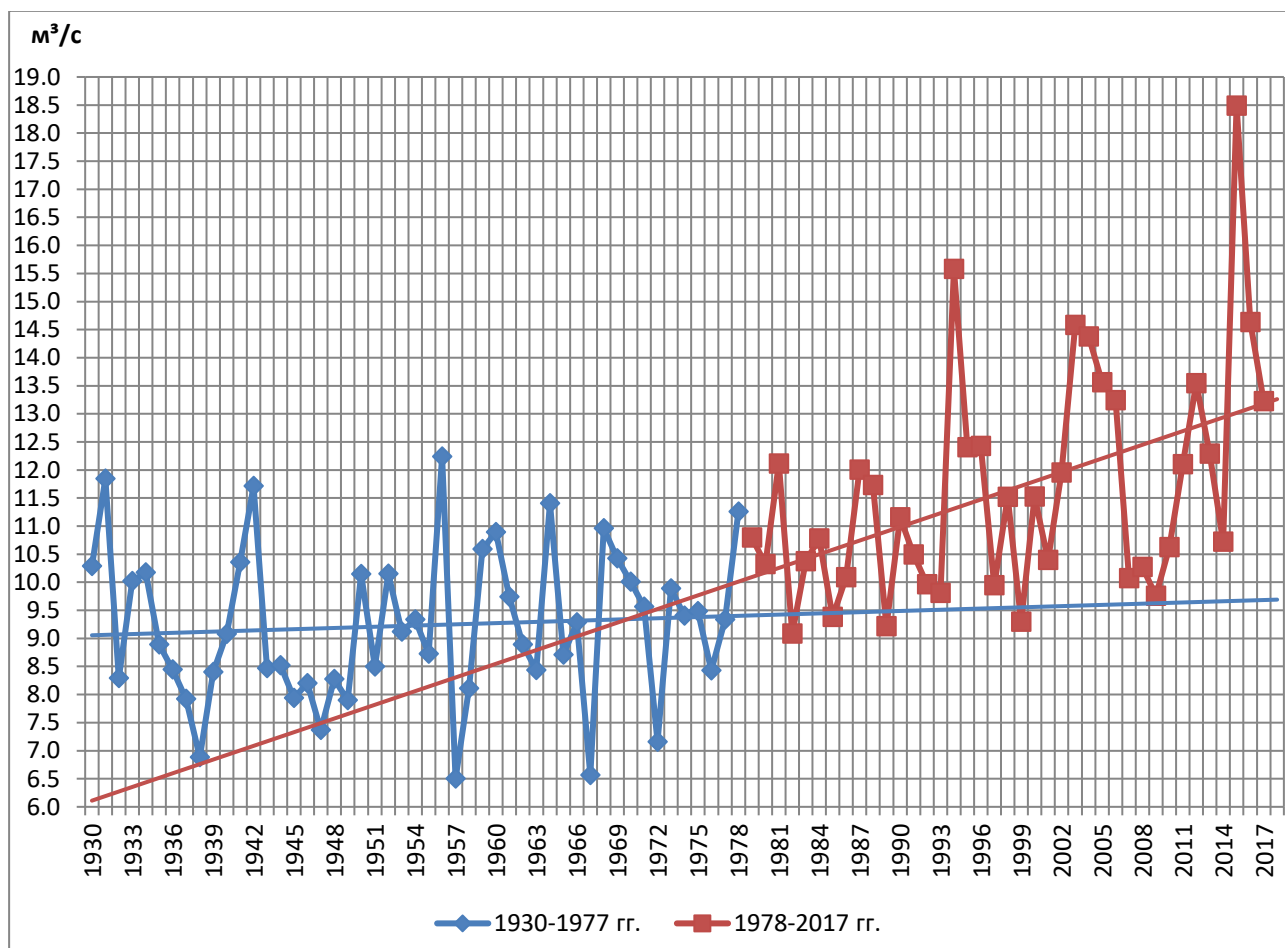


Рисунок 3.28 - Осреднённые расходы в период половодья (июнь-август) р.Чон-Кызыл-Суу на гидростворе «Лесной кордон» (2000 м)

Значительный подъем уровня в реке начинается с конца апреля – начала мая, когда снеготаяние наблюдается на значительной площади бассейна. Каждое последующее интенсивное потепление сопровождается значительным повышением уровней воды в реке и все увеличивающейся их суточной амплитудой.

Подъем уровня в верховьях реки в мае-июне начинается в 11 часов утра и продолжается до 16-18 часов. Затем уровни начинают плавно падать до 4-6

часов утра следующих суток. С 4-6 до 11 часов утра высота уровня не меняется. В июле-августе наблюдается некоторое запаздывание в прохождении суточных максимумов и минимумов. Суточные амплитуды колебаний уровня в реке в самые теплые ясные дни не превышают для различных створов бассейна 13-25 см. Суточный ход уровня по всей длине реки нарушается в пасмурные дни, особенно при выпадении осадков.

Таким образом, в основе изменчивости годового стока рассматриваемого бассейна лежат конкретные особенности литолого-орографических и климатических условий.

В таблице 3.12 приведены основные гляцио-гидрологические характеристики бассейнов рек Чон-Кызыл-Суу и Жууку, отличающиеся степенью оледенения. Данные таблиц показывают увеличение средних расходов рек в период с 1961 по 2017 гг. Несмотря на большую разницу (в 1,5 раза) этих рек по степени оледенения обнаружено незначительная разница в увеличении средних расходов этих рек за сравниваемые периоды - с 1961 по 1990 и с 1991 по 2017 годы. Это дает основание считать эти реки репрезентативными для всего хребта Тескей Ала-Тоо.

Таблица 3.12.- Изменения расходов рек Чон-Кызыл-Суу и Жууку

Река	Площадь водосбора реки, км <sup>2</sup>	Площадь оледенения бассейна реки, км <sup>2</sup>	Доля оледенения в общей площади бассейна реки	Степень оледенения	Средний расход в 1961-1990 гг., м <sup>3</sup> /с	Средний расход в 1991-2017 гг., м <sup>3</sup> /с	Увеличение среднего расхода от базового периода, %
Чон-Кызыл-Суу	302	44,3	14,7%	0,147	5,07	6,50	28
Жууку	516	49,2	9,5%	0,095	6,48	8,07	24

Следует отметить, что при меньшей площади водосбора бассейна р.Чон-Кызыл-Суу степень ее оледенение больше, чем р. Жууку. Поэтому, имеется основание заключить, что основной вклад в увеличение расхода этих рек вносит ледниковый сток.

На примере бассейнов рек Чон-Кызыл-Суу и Жууку можно сделать обобщенный вывод: в Иссык-Кульской котловине прогнозируемое увеличение расходов рек, бассейны которых отличаются большой степенью оледенения, будет связано с повышением температуры воздуха, вследствие чего будет усиливаться таяние ледников и увеличиваться доля ледниковой составляющей в общем речном стоке этих рек. Изменение расходов рек речных бассейнов с незначительной степенью оледенения или же с полным его там отсутствием будет зависеть от количества атмосферных осадков.

### **3.3. Влияние изменений климата на колебания уровня озера Иссык-Куль**

Основной целью наблюдений за уровнем оз. Иссык-Куль, а также – за береговыми процессами является установление динамики изменения этих параметров в связи с глобальными климатическими изменениями. Наиболее важными для народного хозяйства Иссык-Кульской котловины и Кыргызской Республики в целом являются колебания уровня озера. От уровня озера напрямую зависят ширина прибрежной зоны, используемой в качестве пляжей многочисленных пансионатов и домов отдыха, расположенных на берегу озера Иссык-Куль, и перспектива дальнейшего народно-хозяйственного освоения природных ресурсов этого озера.

В.В. Романовский связывал периодичность хода уровня озера с периодичностью термического режима и атмосферных осадков [35]. Используя уравнение связи уровня озера за периоды 1942-1971 и 1971-2000 гг. со сдвигом 29 лет, он рассчитал положение уровня озера Иссык-Куль на период 2004-2034 гг. (рис. 3.29, ряд 1). Согласно прогнозу Романовского В.В. [176], падение уровня озера Иссык-Куль за тридцатилетний период (начиная с 2003 года) составит около 1 м, и первая половина этого 30-летия должна быть жаркой и сухой. К 2017 году уровень озера должен был по его прогнозу понизиться на 1 м, а во второй половине этого периода в связи с повышенной увлажненностью будут происходить колебания уровня около отметки 1605,8 м.

Однако, по данным спутниковой альтиметрии, выполненной нами совместно с лабораторией Legos, уже к 2018 году уровень озера оказался на 1 м выше прогнозного значения (рис. 3.29, ряд 2). После спада уровня озера во второй половине 2006 и 2007, 2008 гг. началась новая фаза подъема уровня в 2009-2011 гг.

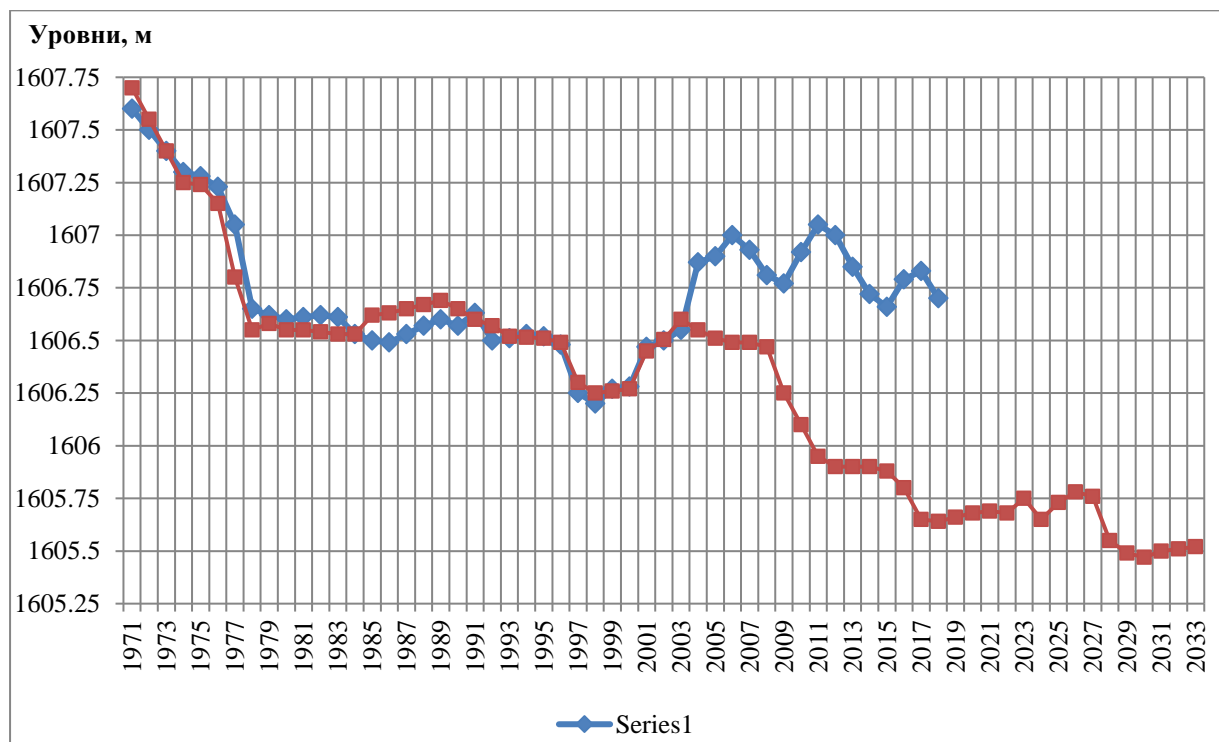


Рисунок 3.29 - Фактический (1) и прогнозируемый (2) [177] уровни Иссык-Куля

В сентябре 2011 г. уровень озера достиг максимальной за последние 45 лет отметки 1607,10 м (рис. 3.30).

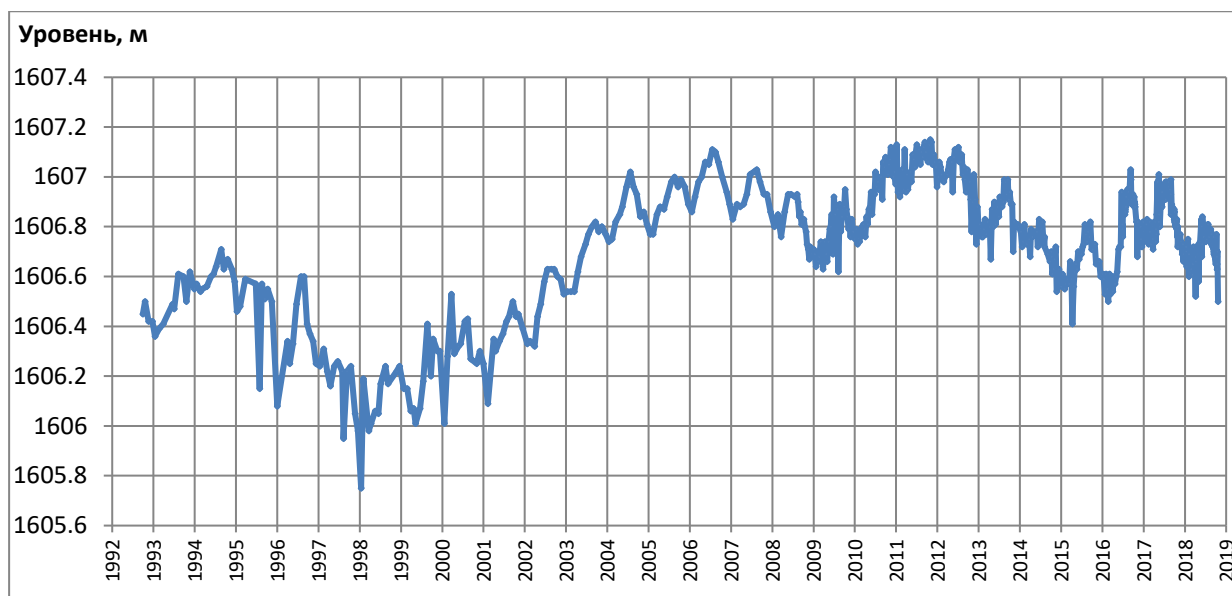


Рисунок 3.30 - Ход уровня озера Иссык-Куль по дистанционным данным спутников: TOPEX/Poseidon (1992-2005), Jason-1 (2002-2013),-2 (2008-2018),-3 (2016-2018), GFO (1998-2008), ERS-1 (1996-2000),-2 (2003-2011), ENVISAT (2002-2010), SARAL/AltiKa (2013-2018), Sentinel-3a (2016-2018)

В 2010 году сезонный подъем уровня озера достиг максимального значения по продолжительности (с февраля по ноябрь) и по амплитуде - 31 см. В последнюю фазу подъема уровень Иссык-Куля находился в стабильном положении на отметке 1607 м довольно продолжительное время - почти два с половиной года - с 1 июня 2010 по 15 ноября 2012 гг.

Сезонные колебания уровня с подъемом летом и осенью и падением зимой составляли в этот период 10 см. После подъема уровня оз.Иссык-Куль в июле-августе 2013 г. до 1607 м в апреле 2015 г. последовал его спад до 1606,4 м, что объясняется тем, что в 2014 г., как было отмечено выше (см. раздел 3.1), на леднике Кара-Баткак наблюдался очень небольшой запас воды в сезонном снеге (273 мм в.экв.); осадков (442 мм) было на 47% меньше и сравнительно невысокая температура воздуха 4,8°C (при средней температуре воздуха +5,1°C в период абляции 2013-2017 гг.). В 2015 г. был небольшой подъем уровня озера, при среднем значении запасов воды в сезонном снеге (430 мм в.экв.), осадков (726 мм) и значительном абляции (3009 мм вод.экв.) ледника Кара-Баткак. Значительный подъем уровня озера Иссык-Куль в 2016 г (до отметки 1607,05 м

в августе месяце этого года) следует связать с аномально большим количеством осадков в Иссык-Кульской котловине. В качестве ориентиров на такую связь между осадками и уровнем озера взят ледник Кара-Баткак. Там в 2015/16 балансовом году выпало 1348 мм осадков, а абляция на языке ледника составила 3300 мм вод.экв, что в пределах нормы. В 2017 г. наблюдалось два пика подъема уровня озера: в мае (до отметки 1607,02 м), в июле-августе (до отметки 1607 м) (рис. 3.30). Первый случай подъема уровня озера объясняется значительным запасом воды в сезонном снеге в Иссык-Кульской котловине (на примере ледника Кара-Баткак: 519 мм вод.экв.) и повышенной температуре воздуха в мае месяце, способствовавшей интенсивному таянию снега в водосборных бассейнах котловины. Второй подъем уровня озера объясняется интенсивной абляцией ледников Иссык-Кульской котловины и сравнительно высокой температурой воздуха на ледниках. Такой вывод можно сделать на примере ледника Кара-Баткак: абляция языка ледника в летний период 2017 года составила 3570 мм вод.экв., средняя температура воздуха в период абляции - +5,6<sup>0</sup>С.

Минимальные значения уровня озера наблюдаются с января по апрель, максимальные с мая по октябрь. Наибольшая повторяемость минимальных уровней приходится на февраль, максимальных - на август. Самые большие падения уровня озера были в 1976 г. - 22 см, 1995 г. - 20 см, 1997 г. - 23 см и 2018 г. - 49 см, а самые большие его подъемы в 2002 г. -18 см, 2003 г. - 22 см и 2016 г. -53 см. На рис. 3.31 представлены среднегодовая температура воздуха и осадки единственной метеостанции Кызыл-Суу в приозерной зоне котловины, не изменившей свое местоположение с момента ее установки в 1951 г.



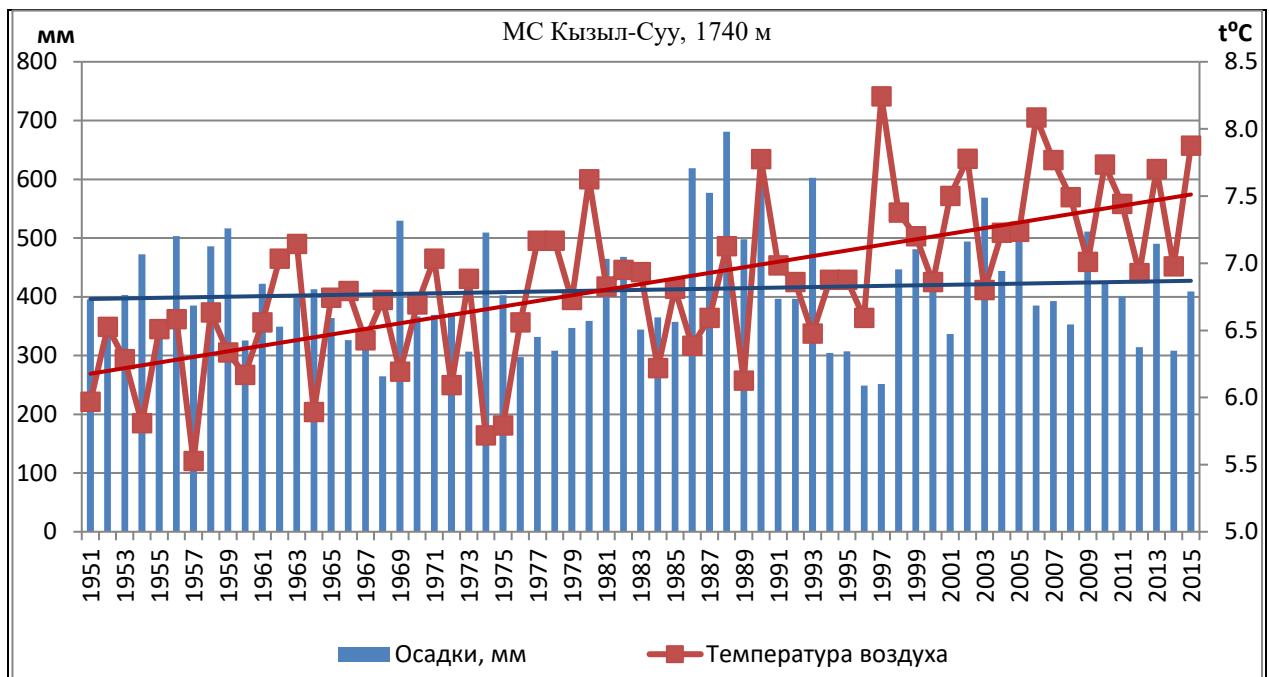


Рисунок 3.31- Среднегодовая температура воздуха и осадки МС Кызыл-Суу в 1951-2015 гг.

По данным этой МС, за последние года 64 года в месте ее расположения среднегодовая температура воздуха повысилась на  $1,3^{\circ}\text{C}$ , а сумма выпадающих осадков увеличилась на 20 мм.

Значительный подъем уровня озера на 1,0 м с 1998 г. по 2012 г. можно связать: с выпадением осадков в среднем на 35 мм выше нормы; со снижением с 1998 г. в 2 раза объема забора воды на орошение по сравнению с 1970-80 гг.; с повышением среднемесячной температуры воздуха в период абляции ледников (VI-IX) на  $0,6^{\circ}\text{C}$  от многолетних значений; с установлением низкой испаряемости в западной части озера [39]. При таких метеорологических условиях сформировался большой речной сток р.Чон-Кызыл-Суу, больший, чем предыдущие годы на  $1,4 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис.3.24).

Важным обстоятельством в вопросе о причинах колебания уровня озера Иссык-Куль является возможная связь уровня с испаряемостью. На рис.3.32 приведена зависимость уровня озера от испаряемости, зафиксированной на МС Балыкчы. При повышении уровня озера в период с 1998 по 2013 гг. прослеживается обратная зависимость его уровня от годовой испаряемости в

западной части котловины, чем выше испаряемость, тем ниже уровень озера Иссык-Куль. Этот вывод является очень важным в вопросе о влиянии климатических изменений на уровень озера.

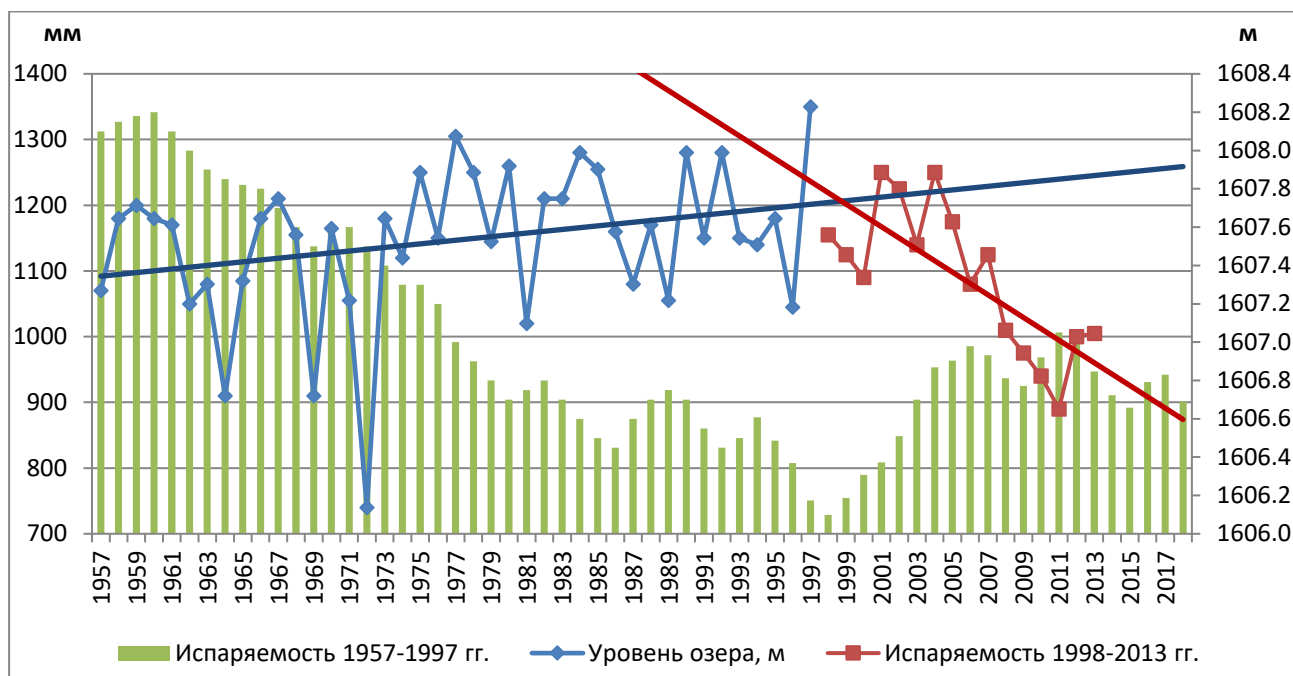


Рисунок 3.32 - Ход уровня озера и годовая испаряемость на МС Балыкчи с 1957 по 2013 гг.

Согласно [177], амплитуда колебаний уровня озера вокруг расчетной экспоненты обусловлена реактивным фактором, воздействие которого проявляется в том, что при увеличении или уменьшении уровня соответственно увеличивается или уменьшается объем потерь воды из озера за счет испарения. Поэтому высокие уровни стремятся понизиться, а низкие повыситься.

Исходя из этого, можно прогнозировать уровень озера при сохранении или сокращении современного объема потерь, связанных изменением метеорологических условий в котловине и с забором воды на орошение.

### Заключение по третьей главе

1. На примере бассейна р. Чон-Кызыл-Суу путем анализа данных за 65-летний период установлен устойчивый многолетний тренд деградации ледника Кара-Баткак, что является подтверждением распада оледенения Иссык-Кульской котловины в связи глобальным

потеплением. Установленная тесная связь темпов таяния ледника со температурой воздуха выявила увеличение ледниковой составляющей стока р.Кашка-Тор на 15-20% за последние 50 лет. Экстраполировав данные по леднику Кара-Баткак, установлена динамика оледенения Прииссыккуля.

2. Разницу в изменении баланса массы ледника Кара-Баткак за последние десятилетия предложено интерпретировать как добавку к речном стоку за счёт деградации оледенения. Именно этим обусловлено увеличение расходов воды в р.Чон-Кызыл-Суу от модальных среднегодовых значений  $4,25 \text{ м}^3/\text{с}$  в период 1936-2015 гг. до  $6,45 \text{ м}^3/\text{с}$ .
3. Восстановлены ряды прерванных в 90-е годы метеорологических параметров лесной и нивально-гляциальной зоны бассейна р.Чон-Кызыл-Суу для дальнейшей реконструкции баланс-массового ряда ледника Кара-Баткак.
4. Дистанционным методом организован мониторинг хода уровня озера Иссык-Куль и его связь с основными источниками питания в современных условиях.

## **ГЛАВА 4. АДАПТАЦИЯ К ПРОГНОЗИРУЕМЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ИССЫК-КУЛЬСКОМ БАССЕЙНЕ**

### **4.1. Использование водных ресурсов в Иссык-Кульском бассейне**

Иссык-Куль - замкнутый водоем, приток в который формируется на ограниченной, примыкающей к нему территории. Уровень озера колеблется под влиянием изменений климата, притока рек, осадков на поверхность озера и испарения с нее. Осадки на поверхность озера играют заметную роль в водном балансе, поскольку площадь водной поверхности озера составляет ~30% всей площади водосборного бассейна.

Известно, что колебания уровня бессточных озер являются интегральным показателем увлажненности их бассейнов. Показателем увлажненности

является так же речной сток, определяемый как разность между осадками и испарением с площади водосбора.

Реки Иссык-Кульской котловины имеют, в основном, ледниково-снеговое питание с половодьем в период таяния ледников в июле-августе. В бассейне р. Чон-Кызыл-Суу среднегодовая сумма осадков по данным МС Кызыл-Суу составляет 413 мм, в лесной зоне по данным ГМС Чон-Кызыл-Суу - 637 мм. Так как гидрологический пост Лесной кардон, работавший с 1930 по настоящее время, расположен при выходе р.Чон-Кызыл-Суу на приозерную равнину, данные о речном стоке не были искажены забором воды на орошение. Площадь бассейна р.Чон-Кызыл-Суу, в створе поста Лесной кардон составляет 307 км<sup>2</sup>. За период работы поста с 1930 по 2014 гг. отмечалась тенденция увеличения годового стока.

Анализ хронологического хода годовых расходов р. Чон-Кызыл-Суу и уровня озера Иссык-Куль [175] показал, что большим расходам реки соответствовали подъемы уровня озера, а малым – падение уровня (рис.4.1). Падение уровня Иссык-Куля происходили при среднегодовых расходах 5,4 м<sup>3</sup>/с в 1997-1999 гг. и 5,6 м<sup>3</sup>/с в 2007-2009 гг. Подъемы уровня Иссык-Куля происходили при среднегодовых расходах 6,9 м<sup>3</sup>/с в 2000-2006 гг. и 6,8 м<sup>3</sup>/с в 2010-2013 гг. В годы падения уровня озера в 2007-2009 гг. на ГМС Чон-Кызыл-Суу среднемесячная температура воздуха в июнь-август месяцы составили 9,7°С, среднегодовые осадки 572 мм, в годы подъема в 2010-2013 гг., соответственно, 10,6°С и 634 мм.

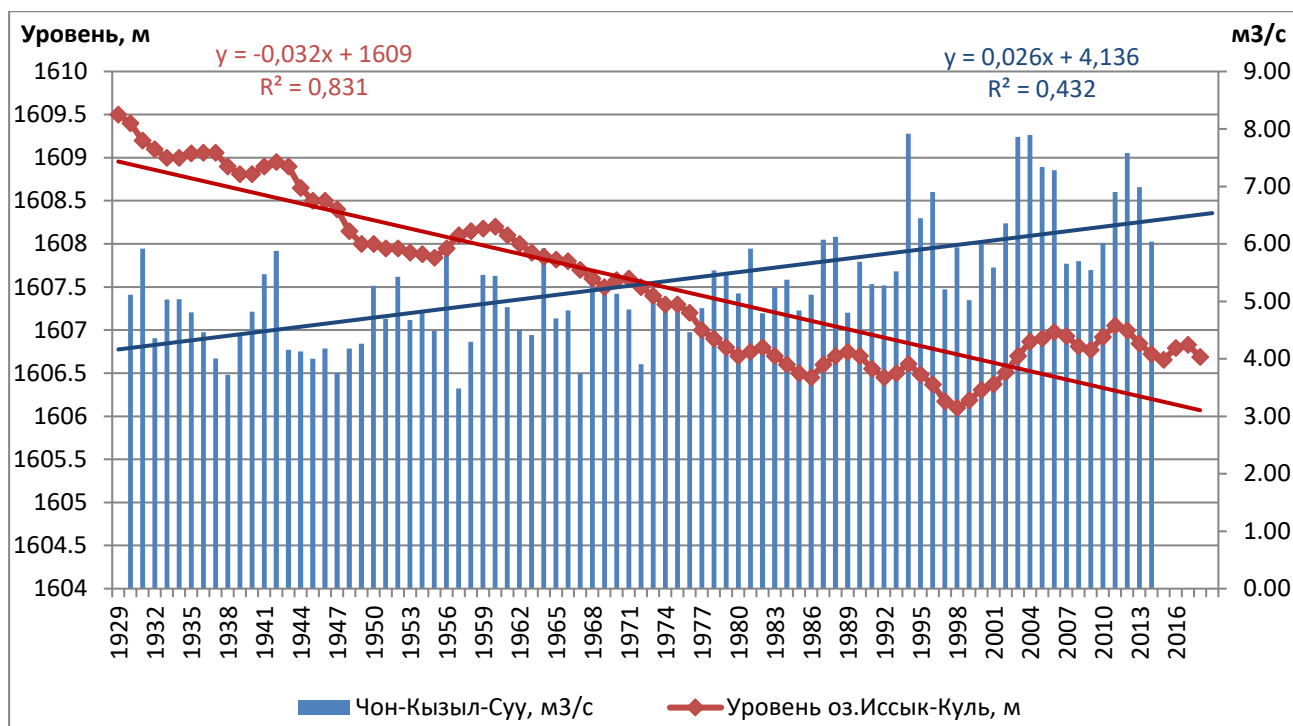


Рисунок 4.1 - Ход уровня оз.Иссык-Куль в 1929-2018 гг. и среднегодовой расход воды р.Чон-Кызыл-Суу в 1930-2014 гг.

Анализ многолетних годовых расходов р.Чон-Кызыл-Суу (1930 – 2014 гг.) показал, что подъемы уровня Иссык-Куля приходятся на 2000-2013 гг. с расходами воды более  $6,6 \text{ м}^3/\text{с}$  при годовой норме стока  $5,3 \text{ м}^3/\text{с}$ . В фазе подъема уровня озера с 1999 по 2013 гг. более чем на 1 м, расходы р.Чон-Кызыл-Суу, превышающие  $6,6 \text{ м}^3/\text{с}$  наблюдались в течение 7 лет. Очевидно, что большая площадь оледенения дает в настоящее время значительный вклад в величину речного стока р.Чон-Кызыл-Суу, особенно в годы высокой летней температуры воздуха. Так, при увеличении температуры в гляциально-нивальном зоне на  $1^\circ\text{C}$  средние месячные июльские расходы воды на реке ледниково-снегового питания Жууку (пост устье р.Жуукучак) увеличиваются на  $3,17 \text{ м}^3/\text{с}$ . В августе увеличение температуры на  $1^\circ\text{C}$  вызывает на реке Жууку увеличение речного стока на  $2,05 \text{ м}^3/\text{с}$ . Так, при потеплении на  $1^\circ\text{C}$  на реке Жууку ( $S$  оледенения =  $51,6 \text{ км}^2$ ), приращение июльского речного стока составляет  $3,38 \text{ м}^3/\text{с}$ , а на реке Чон-Жаргылчак ( $S$  оледенения =  $12,8 \text{ км}^2$ ) -  $1,20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Однако в общей тенденции в снижении уровня озера существенная роль и антропогенного фактора, связанного с нерациональным использованием водных ресурсов рек, впадающих в озеро. Следует сказать, что понижение уровня Иссык-Куля неблагоприятно сказывается и на функционировании ряда других отраслей народного хозяйства. Благоприятные природные условия, живописный ландшафт, наличие минеральных источников и лечебных грязей определяют возможность широкого использования Иссык-Кульской котловины для лечения, отдыха, туризма, спорта, включая альпинизм. Поэтому поддержание его уровня имеет существенное практическое значение.

В Иссык-Кульской котловине, вытянутой в широтном направлении на 252 км, а в меридиональном на 146 км, по физико-географическим условиям выделяются три зоны. Из общей площади котловины, равной 22080 км<sup>2</sup>, на озеро приходится 6249 км<sup>2</sup>, на приозерную равнину, называемую зоной рассеивания речного и подземного стока - 3092 км<sup>2</sup>, остальную часть бассейна (12739 км<sup>2</sup>) занимают горные районы, являющиеся зоной формирования стока рек. В местах выхода рек с гор на приозерную равнину начинается основной водозабор на орошение сельхозугодий и формирование подземного стока [15].

Основным потребителем водных ресурсов в Иссык-Кульской котловине является орошаемое земледелие. По состоянию на 2016 г. площадь пашни в Иссык-Кульской котловине была 191600 га [178]. Из-за забора воды на орошение естественное соотношение между поверхностным и подземным притоком в озеро существенно изменилось. До интенсивного орошения сельхозугодий основными источниками формирования подземных вод в Иссык-Кульской котловине были фильтрационные потери непосредственно из естественных русел рек и за счет подруслового притока. В настоящее время к упомянутым источникам прибавляются фильтрационные потери воды из искусственной оросительной сети и за счет ее фильтрации на орошаемых полях. Региональный поток подземных вод в водоносном комплексе четвертичных отложений имеет непрерывное сплошное зеркало с наклоном и

направлением стока в сторону базиса регионального подземного стока – озера Иссык-Куль. Возобновляемые ресурсы подземных вод Иссык-Кульской котловины образуются за счет фильтрации из русел рек (64%), фильтрации из оросительной сети (28%), фильтрации на орошаемых полях (8%) и инфильтрации жидких атмосферных осадков (до 5 - 8%); расход потока подземных вод происходит за счет испарения грунтовых вод (до 6%) и разгрузки в озеро (94 %) [32, 179-180].

В большинстве случаев при выходе рек с гор на приозерную равнину Иссык-Куля построены водораспределительные каналы с гидрологическими постами, на которых ведутся учет и распределение воды. Информация о суточном водозаборе из рек поступает в административные районные Управления оросительных систем Иссык-Кульской котловины.

От способа транспортировки воды от головного водозабора до орошаемого поля и техники полива зависит коэффициент полезного действия (КПД) оросительных систем. По расчетам М. И. Каплинского [181], значение КПД оросительных систем Иссык-Кульской котловины за период 1946-1965 гг. составил 0,32-0,34. В работе Д. Я. Ратковича [182] КПД сети оросительных систем равен 0,43, в работе Т.П.Гронской [183] за период 1976-1980 гг. – 0,48.

В Иссык-Кульской котловине в связи с глобальным потеплением неизбежно дальнейшее сокращение запасов водных ресурсов. Кроме того, в этой котловине имеет место тренд увеличения объемов внутреннего водопотребления из-за увеличения численности населения и развития водопотребляющих секторов экономики, и эти тренды будут только возрастать. В этих условиях эффективное решение проблемы может быть связано не с увеличением объемов водозаборов из природных источников, потенциал которых со временем будет только сокращаться, а с рациональным использованием уже вовлеченных водных ресурсов.

Динамика водопотребления на нужды орошения в Иссык-Кульской котловине показана на диаграмме, приведенном на рисунке 4.2. Согласно этому

графику, в середине прошлого века забор воды на орошение составлял около 0,4-0,8 км<sup>3</sup>/год, а в 1980-х годах 1,4 – 1,5 км<sup>3</sup>/год. В 1990-х годах водозабор резко пошел на убыль, и в 2000-х годах забор воды на орошение полей сократился на 45 - 50%. Поступающая в Иссык-Куль вода расходуется также на испарение с его поверхности. Естественный сток, включая подрусловые воды, оценен в 3,86 км<sup>3</sup>/год [182].

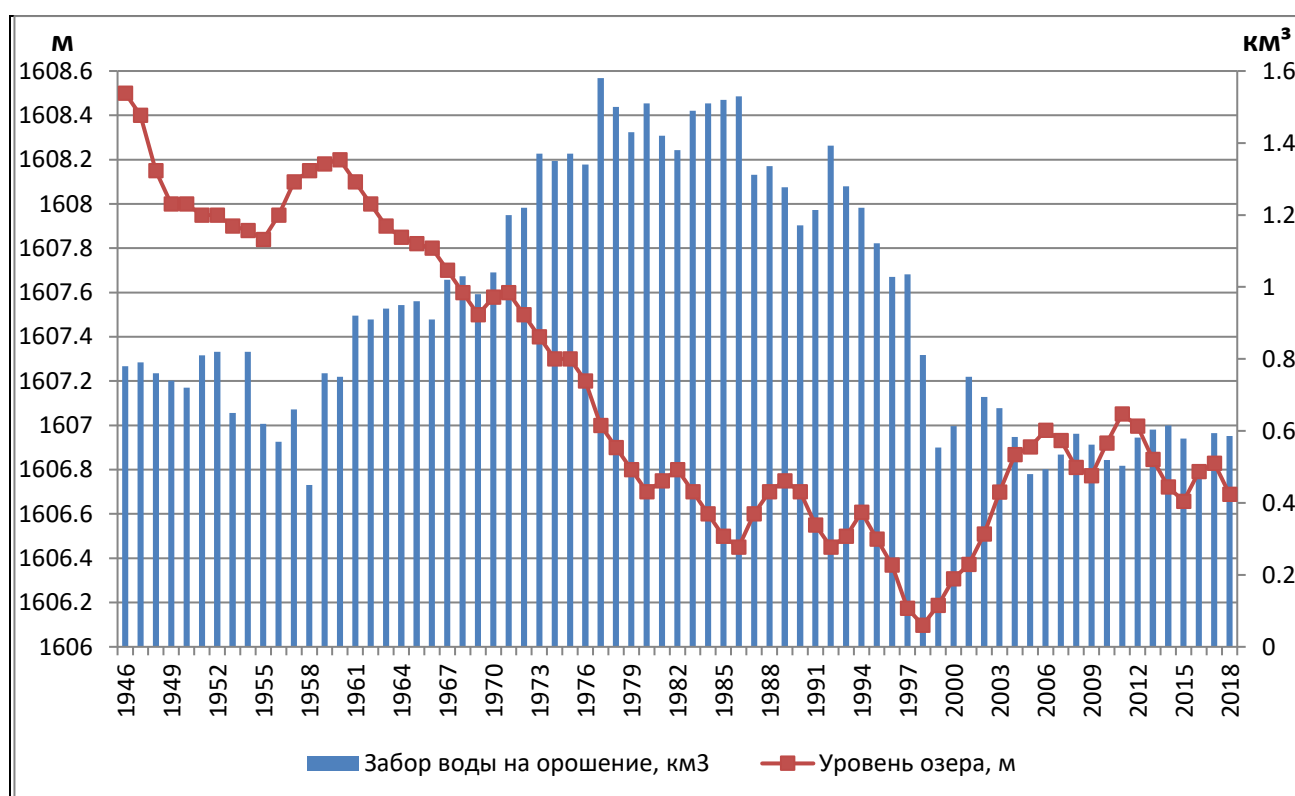


Рисунок 4.2 - Ход уровня озера и динамика годовых заборов воды (км<sup>3</sup>/год) на орошение в Иссык-Кульской котловине (по данным Депводхоз, 2018 г.

В 1970-80-х годах ежегодные безвозвратные потери в связи с забором воды на орошение составляли в пересчете на площадь озера около 50 мм. В настоящее время они значительно сократились и составляют около 20 мм (рис. 4.2). При отсутствии ирригационного водозабора уровень озера за этот период не снижался бы, а повышался со средней интенсивностью более 30 мм/год.

#### 4.2. Оценка негативного влияния климатических изменений на хозяйственную деятельность в Иссык-Кульской котловине на



### **примере бассейна р. Жууку**

Для КР, равно, как и для всей ЦА, в ближайшие десятилетия и столетия прогнозируются дальнейшее потепление климата и распад оледенения. Однако сценарии потепления пока остаются неопределенными. Модели изменения климата для КР построены на условиях продолжение текущей тенденции потепления с наиболее выраженными изменениями в течение летних месяцев и меньшими изменениями в зимний период. Однако предполагается, что на всей территории страны произойдет небольшое увеличение осадков от 1,3 до 3,1% по сравнению с базовым периодом (1960-1990 гг.), за исключением самой южной части, где количество осадков может уменьшиться от 2,0 до 3,1% [184]. В целом, ожидается, что в зимний период климат будет более влажным, а летом более сухим [184].

В связи с глобальным потеплением и его неизбежными негативными последствиями госучреждения, управляющие водными ресурсами Кыргызской Республики и Иссык-Кульской области, в частности, в большей мере нуждаются не в совершенствовании сценариев изменения климата, а в совершенствовании исследовательских и управленческих механизмов, направленных на адаптацию в условиях изменяющегося климата. Эффективность управления водными ресурсами КР, в том числе, - и Иссык-Кульской котловины, сдерживается устаревшей водной инфраструктурой, что является основной причиной значительных потерь воды.

Прогнозируемое повышение температуры и количества засух повысит уязвимость сельского населения. В климатическом профиле КР [185] засуха идентифицируется как одна из причин значительного ущерба для экономики и предлагаются меры по его снижению. Поскольку водные ресурсы являются главным приоритетом для стран Центральной Азии, любое изменение гидрологического режима в горных экосистемах может стать и важным трансграничным вопросом, имеющим политические, социальные и

экономические последствия. В этих условиях очень важно понимать, какое воздействие изменение климата оказывает на водные ресурсы региона.

Согласно прогнозу, сделанному во Втором национальном сообщении Республики Узбекистан по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата, к концу века в некоторых районах ЦА ледники полностью исчезнут [186]. Доля снегового и собственно ледникового питания рек ЦА весьма большая. Так, например, р.Сырдарья на 46% пополняется талыми снеговыми и ледниковыми водами из горных зон Тянь-Шаня и Памира, а река Амударья – на 65% [187]. По сравнению с 1980–1999 гг., годовой сток в ЦА в 2030–2049 гг. может снизиться на 12% [188]. При этом в некоторых реках, образованных за счет таяния ледников, сток воды перед тем, как уменьшиться, увеличится на короткий период. Это явление уже наблюдалось в р.Чон-Кызыл-Суу (см. рис. 3.19), где усиленное таяние ледников увеличило сток воды на 52% за период с 1936 по 2014 гг. Для Иссык-Кульской котловины важно то, что ледники котловины, являясь возобновляемым источником пресной воды, выступают в качестве долгосрочного резерва, и поэтому они могут обеспечить водой Иссык-Кульскую котловину во время сухих сезонов и лет. Именно в летние месяцы ледники дают наибольшее количество воды, что соответствует высоким потребностям в сельском хозяйстве в течение этого периода.

Устаревшие методы орошения и выработавшие свой эксплуатационный срок системы ирригации ведут к большим потерям воды. Фрагментация земель нарушила систему ведения сельского хозяйства, в том числе и систему орошения.

В 2005 г. температура воздуха повысилась на  $1,2^{\circ}\text{C}$  и количество осадка увеличилась на 92 мм, что привело к увеличению расхода воды р. Жууку от 7,0 до  $8,0 \text{ м}^3/\text{с}$ . В том году урожайность основных сельскохозяйственных культур снизилась, по сравнению с 1986 г., а забор воды на орошение из этой реки сократился на 28 409 тыс.  $\text{м}^3$  (табл.4.1), исходя из норм расхода воды на их орошение для зерновых культур требуется 1000 л воды для выращивания 1 кг

зерна [189], а для многолетних трав - 3000 м<sup>3</sup>/га [190]. В результате чего по нашим расчетам увеличилась фильтрация в русло реки на 12% и приток воды в оз.Иссык-Куль на 21467 тыс.м<sup>3</sup> или 6,7%. По нашим расчетам увеличение стока на 1,0 м<sup>3</sup>/с и при сокращении забора воды орошение на 21,5% по всем посевным площадям зерновых и многолетних культур Иссык-Кульской области способствовали бы ежегодному подъему уровня оз.Иссык-Куль на 145 мм в год. Таким образом, увеличение стока рек, сокращение забора воды и незначительное повышение увлажненности в котловине привело к увеличению притока в оз.Иссык-Куль (см. рис.4.1).

Таблица 4.1.- Элементы водопотребления в бассейне р.Жууку, тыс. м<sup>3</sup> в год

Значение	1986 г.	2005 г.
Посевная площадь зерновых и многолетних трав, га	4834	3586
Урожайность зерновых культур, ц/га	54	29
Урожайность многолетних трав, ц/га	90	71
Годовой сток, тыс.м <sup>3</sup>	221067	252288
Фильтрация в руслах рек (71,3%), тыс.м <sup>3</sup>	57065	95228
Всего потери от сети и поле (67%), тыс.м <sup>3</sup>	88376	69342
Водопотребление растениями (33%), тыс.м <sup>3</sup>	43528	34153
Приток в оз.Иссык-Куль, тыс.м <sup>3</sup>	32098	53565

На современном этапе увеличение речного стока р. Жууку происходит в основном за счет ледниковой составляющей, обусловленной потеплением климата и активным таянием ледников в течение периода абляции с июня по сентябрь. В летний промежуток времени по нашим расчетам в 2005 г. проходил 63% годового стока, а в период абляции (VI-IX) ледника - 75%.

Для более реальной оценки эффективности внутрихозяйственной ирригационной сети можно воспользоваться выводами Всемирной Продовольственной Организации ООН (ФАО, «География мирового хозяйства») свидетельствующими о том, что в областях традиционного орошения Центральной Азии до 50% подаваемой на поливные земли влаги теряется на фильтрацию, испарение и сбросы, не доходя до орошаемых растений. Согласно [191], величина потерь воды существенно зависит от применяемых способов полива и может в среднем составлять:

- при поливе напуском и по полосам – 50-60%;
- при поливе по бороздам – 32 - 40%;
- при поливе дождеванием - 20-25%;
- при капельном орошении - 5-10 %

Поскольку зерновые и многолетние сельхозкультуры орошаемых земель бассейна р.Жууку занимают свыше 90% в настоящее время поливаются напуском, даже при умеренной оценке сокращения потерь на уровне 30% (что возможно при переходе на полив дождеванием) абсолютная сумма ежегодных подпиток подземных вод и сброс воды непосредственно в оз.Иссык-Куль по нашим расчетам может составить 18758 тыс.м<sup>3</sup> или 7,4% от головного водосбора.

По данным Депводхоза Иссык-Кульской области в котловине вся посевная площадь сельскохозяйственных культур под урожай 2016 г. составляла 191,6 тыс.га, из них на зерновые культуры и многолетние травы - 150 тыс.га. Принятие мер по минимизации потерь воды путем эффективного управления и способа полива посевных площадей зерновых культур и многолетних трав Иссык-Кульской области только до 30% позволило бы увеличить в вегетационный период сброс воды в оз.Иссык-Куль на 1 250 000 тыс.м<sup>3</sup>. Для расчета использован среднегодовой расход воды р.Жууку 8 м<sup>3</sup>/с на головном водозаборе. По нашим расчетам такие мероприятия по всем посевным площадям зерновых и многолетних культур способствовали бы ежегодному притоку в оз.Иссык-Куль 202 мм. Согласно данным М.Н.Каплинского, основными расходными статьями баланса подземных вод в Иссык-Кульском бассейне является подземный отток в озеро (94,4%) [192]. Таким образом, это показывает, что в основу управления режимом подземных вод и стабилизации уровня оз. Иссык-Куль должно быть положено регулирование поверхностного стока рек и организация оптимального орошения полей путем модернизации технологий полива сельхозкультур.

### **4.3. Оценка изменений притока подземных вод в озеро Иссык-Куль под воздействием изменений климата (на примере бассейна р.Чон-Кызыл-Суу)**

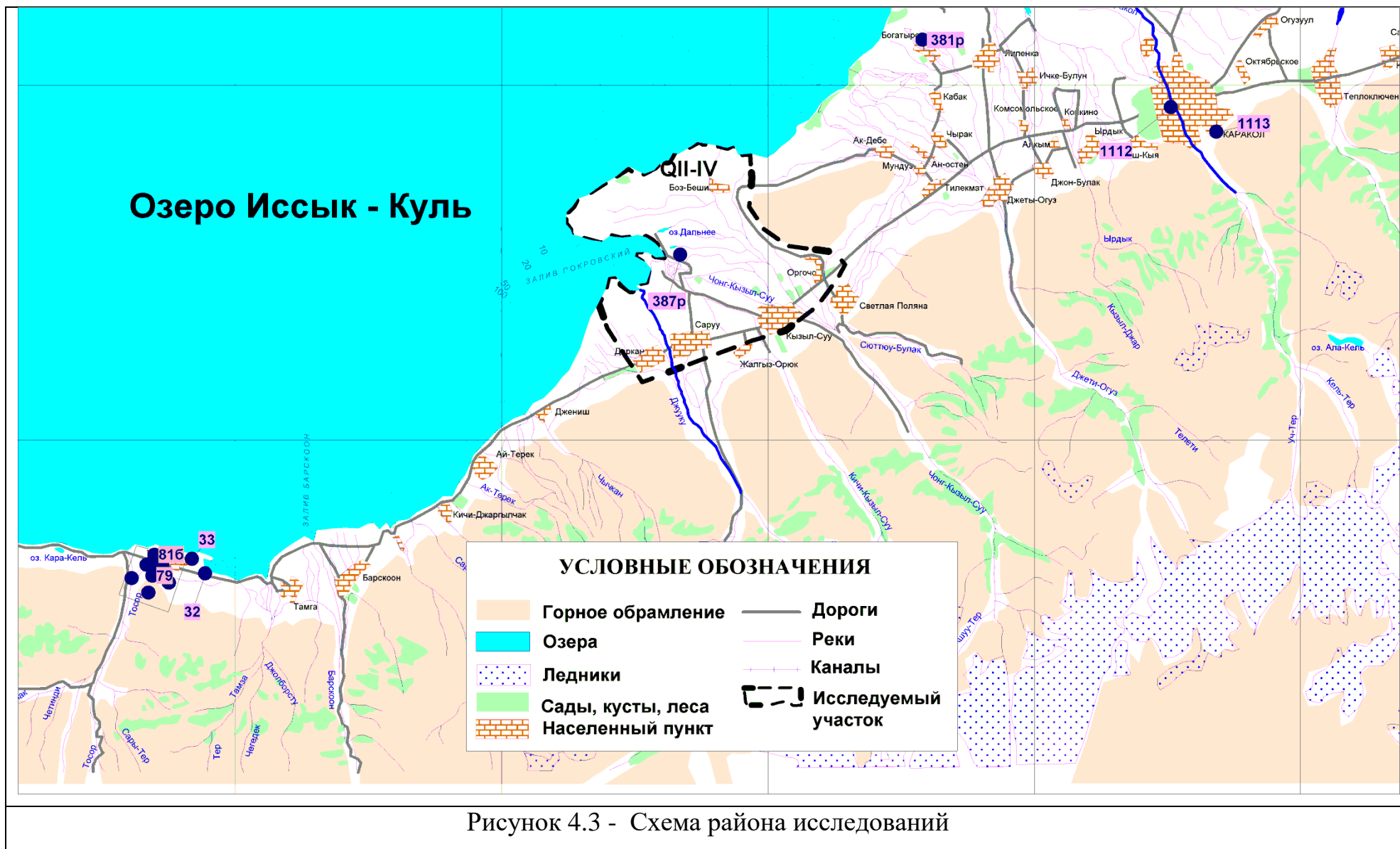
Исследования проводились на примере бассейна р. Чон-Кызыл-Суу, который расположен на южном берегу озера Иссык-Куль, рис. 4.3. Основными источниками исходных данных служили работы [193-196]. Исследования в рамках данного пункта выполнены с консультативной помощью Р. Г. Литвака.

Наиболее серьезная угроза изменения климата для Иссык-Кульского бассейна – сокращение стока рек. Масштабы этой проблемы оценивались в работах [15, 197-199].

Упомянутое сокращение стока рек, что будет вызвано дальнейшим сокращением оледенения в Иссык-Кульской котловине (рис. 4.3а, 4.3б), в обозримом будущем (счет может идти на первые десятилетия) неизбежно приведет к уменьшению притока поверхностных вод в Иссык-Куль.

При этом следует иметь в виду, что экономия поверхностного стока за счет повышения КПД оросительных систем приведет к уменьшению питания подземных вод, что со временем также уменьшает приток в озеро.

Однако, последствия сокращения речного стока могут смягчаться путем уменьшения безвозвратных потерь и задержкой во времени процесса уменьшения притока подземных вод в озеро. Глубина залегания уровней подземных вод и водопроницаемость представлены на рис. 4.4 и 4.5. В работе предлагается математическая модель для количественных оценок влияния ирригационных систем на подземный приток в озеро Иссык-Куль. На основе предложенной модели рассматриваются 3 сценария развития орошения в бассейне реки Чон-Кызыл-Суу.



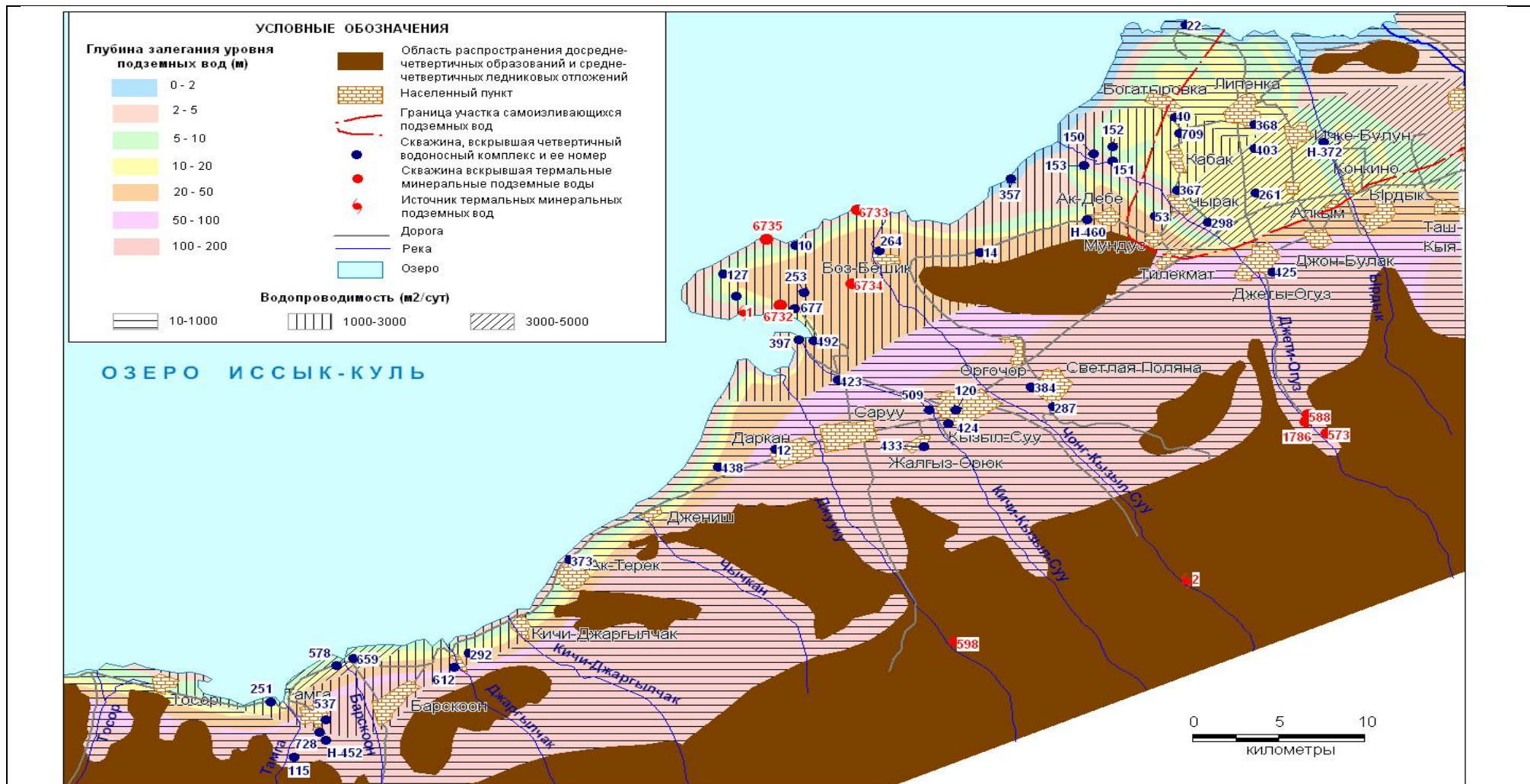
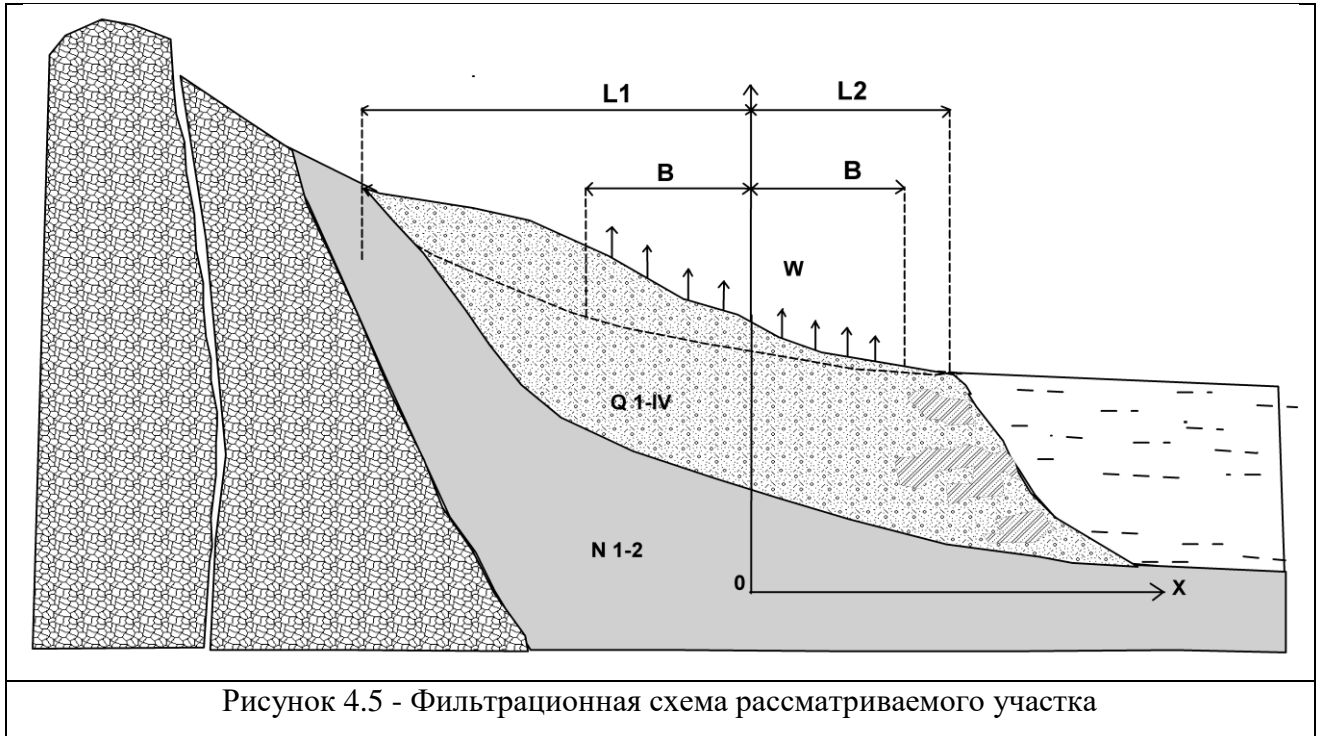


Рисунок 4.4 - Схематическая карта водопроводности и глубин залегания уровней грунтовых вод рассматриваемого участка [215]



$$\frac{d}{dt}h(t, x) = a \cdot \frac{d^2}{dx^2}h(t, x) + W(t, x) \quad (4.1)$$

где:

$h(t, x)$  – отметка уровня подземных вод, м;

$t$  – время, сут;

$x$  – пространственная координата, м;

$a = T/\mu$ ,  $T$  – водопроницаемость, м<sup>2</sup>/сут;  $\mu$  – гравитационная водоотдача;

$W(t, x)$  – водозабор или изменение питания подземных вод, м/сут.

При  $t < 0$   $W(t, x) = 0$ ,

При  $t \geq 0$   $W(t, x) = W_1$  (при  $-B < x < B$ ),

$W(t, x) = 0$  (при  $x > B$ ,  $x < -B$ ), где:

$B$  – половинная ширина зоны орошения, м, см. рис. 4.6.

Будет также рассмотрен случай ступенчатого изменения  $W(t, x)$  во времени.

Граничные и начальные условия имеют вид:



$$\frac{d}{dx}h(t,L1) = 0, \quad h(t,L2) = H1, \quad h(0,x) = H1 \quad (4.2)$$

где:

L1 – расстояние от центра ирригационной зоны до горного обрамления, м;

L2 – расстояние от центра ирригационной зоны до берега озера Иссык-Куль, м, см. рис. 4.6, H1 – отметка поверхности воды в озере Иссык-Куль, м.

С помощью решения поставленной задачи необходимо определить изменения оттока подземных вод в озеро Иссык-Куль при различных сценариях изменения питания подземных вод. Кроме того важно получить понижения исходных уровней подземных вод. За исходное состояние принимается  $h(0,x) = H1$ . Искомые понижения  $S(t,x) = H1 - h(t,x)$ . В начальный момент  $S(t,x) = 0$ .

Решения подобных задач (без учета горного обрамления) получены в работах А.Н. Костюкова [197], П.Я. Полубариновой-Кочиной [198]. В более компактной форме оно приведено в работе [199]. Добавляя граничное условие, характеризующее горное обрамление, получаем вместо фильтрационной схемы «полуограниченный пласт» схему «пласт-полоса». В этом случае соответствующее решение представляется в виде бесконечного ряда (применяется метод отображения источников - стоков). Однако проведенные численные эксперименты показали, что в рассматриваемом случае достаточно использовать первые 2 члена ряда.

$$S(t,x) = \frac{W \cdot t}{\mu} \cdot (FG(t,x) - FG(t, 2 \cdot L2 - x) + FG(t, 2 \cdot L1 + x)) \quad (4.3)$$

где:

$$FG(t,x) = \Phi(B - |x|) \cdot FG1w(t, |x|) + \Phi(|x| - B) \cdot FG2w(t, |x|) \quad (4.4)$$

$\Phi(x)$  Функция Хевисайда, которая равна 0 при  $x < 0$  и равна 1 при  $x \geq 0$ .

$$FG1w(t, x) = \frac{1}{2} \cdot (Fw1(t, x) + Fw2(t, x)) \quad (4.5)$$

$$FG2w(t, x) = \frac{1}{2} \cdot (Fw1(t, x) - Fw2(t, x)) \quad (4.6)$$

$$Fw1(t, x) = f1(t, x) + \frac{1}{2 \cdot \tau1(t, x)} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\tau1(t, x)}}\right) \quad (4.7)$$

$$f1(t, x) = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\tau1(t, x)}}\right) + \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \tau1(t, x)}} \cdot \exp\left(\frac{-1}{4 \cdot \tau1(t, x)}\right) \quad (4.8)$$

$$Fw2(t, x) = f2(t, x) + \frac{1}{2 \cdot \tau2(t, x)} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\tau2(t, x)}}\right) \quad (4.9)$$

$$f2(t, x) = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\tau2(t, x)}}\right) + \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \tau2(t, x)}} \cdot \exp\left(\frac{-1}{4 \cdot \tau2(t, x)}\right) \quad (4.10)$$

Где,

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z \exp(-t^2) dz \quad \operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_z^{\infty} \exp(-t^2) dz \quad (4.11)$$

$$\tau1(t, x) = \frac{a \cdot t}{(B + x)^2} \quad \tau2(t, x) = \frac{a \cdot t}{(B - x)^2} \quad (4.12)$$

Используя выражения (4)-(12) для зависимости (3), получаем функцию понижения уровней подземных вод от пространственной и временной координаты. Функция Хевисайда использована авторами для автоматизации расчетов по используемым формулам. Искомая зависимость изменения притока подземных вод в озеро Иссык-Куль под воздействием изменения питания подземных  $q(t)$  вод имеет вид:

$$q(t) = -T \cdot \left( \frac{d}{dx} S(t, L2) \right) \quad (4.13)$$

Для оценки запаздывания изучаемого влияния предлагается ввести параметр  $P1(t)$ , равный отношению величин изменения притока в озеро  $q(t)$  к изменению питания подземных вод вышерасположенной территории  $W \cdot 2 \cdot B$ . Параметр измеряется в процентах и зависит от времени. При больших значениях  $t$ , величина  $P1(t) = 100 \%$ . В рассматриваемом случае:

$$P1(t) = \frac{q(t, L2)}{W \cdot 2 \cdot B} \cdot 100 \quad (4.14)$$

КПД сети оросительных систем равно 0,52 [200]. При КПД техники полива 0,73 КПД оросительных систем будет равно в среднем 0,38.

По разным оценкам от 70 до 100 % фильтрационных потерь идет на питание подземных вод, т. е. на питание подземных вод за счет ирригационных потерь идет от 13,5 до 19,6 м<sup>3</sup>/с.

К примеру: среднегодовой среднеголетний расход р. Чон-Кызыл-Суу равен 5,3 м<sup>3</sup>/с, следовательно, среднегодовой водозабор на орошение будет приблизительно 1,43 м<sup>3</sup>/с или 45,1 млн. м<sup>3</sup> в год. Орошаемая этой рекой площадь составляет приблизительно 9500 га. КПД оросительной системы и техники полива принимается равным средним показателям Иссык-Кульского бассейна. Согласно данным Каплинского М.И. [192], примерно 50% водозабора идет на питание подземных вод, что соответствует 0,715 м<sup>3</sup>/с.

В случае сокращения стока реки Чон-Кызыл-Суу на 30% ее расход будет равен 3,71 м<sup>3</sup>/с.

В работе рассматриваются три сценария адаптации оросительной системы.

1. Увеличение КПД оросительной системы с 0,38 до 0,6 при сохранении прежней водоподачи растениям в размере 0,543 м<sup>3</sup>/с.

При сохранении исходного водозабора 1,43 м<sup>3</sup>/с оставшийся расход реки будет равен 2,28 (3,71 – 1,43) м<sup>3</sup>/с. При КПД системы 0,6, водозабор – 0,91 м<sup>3</sup>/с,

что сохраняет  $0,52 \text{ м}^3/\text{с}$  поверхностного стока в озеро. Питание подземных вод за счет потерь оросительной воды будет составлять 40 % от водозабора, что соответствует  $0,364 \text{ м}^3/\text{с}$ , питание уменьшится на  $0,351 (0,715 - 0,364) \text{ м}^3/\text{с}$ . Используя приведенное здесь решение можно определить динамику уменьшения притока в озеро при упомянутом уменьшении питания подземных вод.

Математическая постановка задачи, соответствующая расчетной схеме, приведенной на рис. 4.6, приведена ниже.

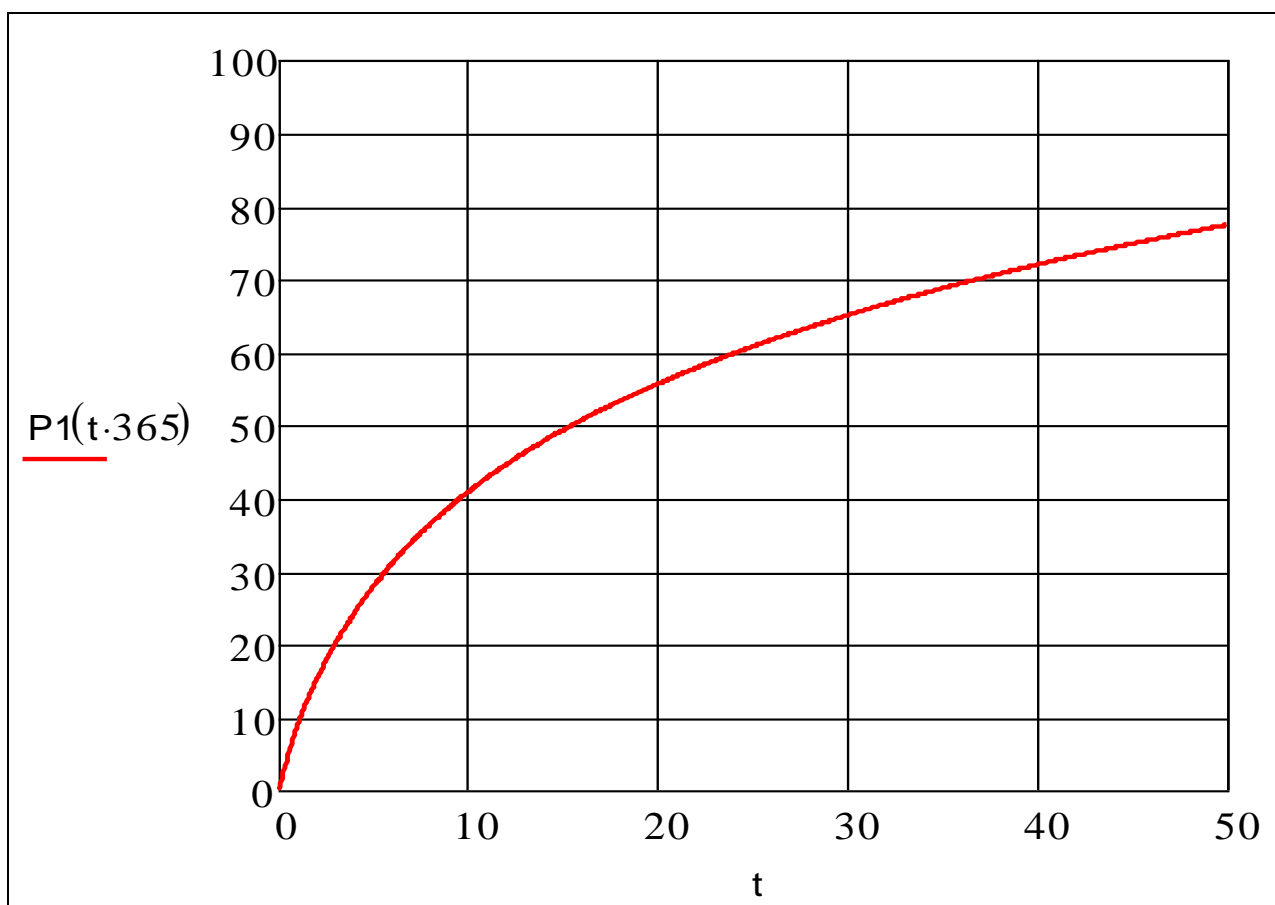


Рисунок 4.6 - Изменение подземного притока в озеро Иссык-Куль при изменении питания подземных вод,  $t$  – годы,  $P1$  – процентное отношение изменения притока к изменению питания

Для задания нижеследующих исходных данных использованы материалы, приведенные в [201], в которых: водопроницаемость  $T = 2000 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;

гравитационная водоотдача  $\mu = 0,15$ ;  $L1 = 11000$  м;  $L2 = 9000$  м;  $B = 7500$  м, см. рис. 4.6.

Результаты расчетов величины  $P1(t)$  в графическом виде приведены на рис. 4.7. По выведенной кривой видно, что после 10 лет с момента уменьшения питания приток в озеро уменьшится на 40% от величины изменения питания, после 25 лет – на 60%. Динамика изменения притока подземных вод в озеро не зависит от величины изменения питания подземных вод.

2. Использование капельного орошения на всей орошаемой территории системы реки Чон-Кызыл-Суу.

При использовании капельного орошения КПД системы увеличивается до 0,95. В этом случае водозабор из реки будет равен  $0,572$  м<sup>3</sup>/с. Без коренной реконструкции водозабор из реки  $1,43$  м<sup>3</sup>/с, оставшийся расход  $2,28$  м<sup>3</sup>/с. Поверхностный приток в озеро увеличен на  $0,858$  ( $1,43 - 0,572$ ) м<sup>3</sup>/с или на 38% по сравнению с притоком в озеро без введения капельного орошения. Питание подземных вод будет равно нулю, т. е. уменьшится на  $0,715$  м<sup>3</sup>/с. В рассматриваемом случае адаптация заключается в том, что экономия поверхностного стока немедленно негативно скажется на притоке в озеро, а уменьшение питания подземных вод уменьшит приток с многолетней задержкой, в соответствии с кривой см. рис. 4.7.

3. При сокращении речного стока недостаток воды покрывается водозабором подземных вод из резервных скважин. Как и ранее средний расход реки сокращается на 30 %, но после пятилетнего периода средний расход реки восстанавливается. Водозабор из реки уменьшен на 30%, что соответствует его уменьшению на  $0,43$  м<sup>3</sup>/с. Эта величина в течении 5 лет покрывается водозабором подземных вод. Питание подземных вод за счет фильтрационных потерь остается на прежнем уровне.

В этом сценарии прямой ущерб поверхностному притоку в озеро заменяется временным уменьшением притока подземных вод в озеро. Задержка прито-

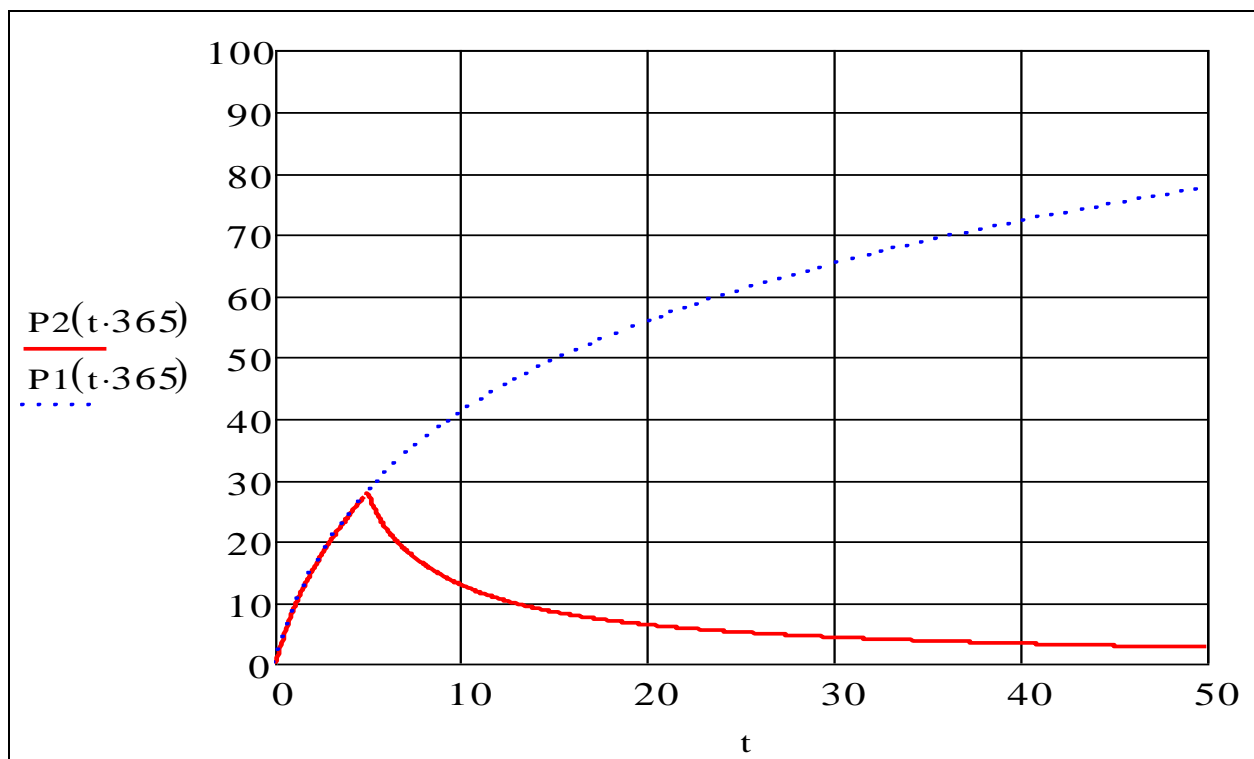


Рисунок 4.7 - Изменение подземного притока в озеро Иссyk-Куль при пятилетнем использовании водозабора подземных вод (сценарий 3),  $t$  – годы,  $P_2$  – процентное отношение изменения притока к изменению питания

ка рассчитывается с использованием приведенных здесь зависимостей, по нижеследующей формуле (ступенчатое изменение питания происходит в момент  $t_1 = 5$  лет):

$$SS(t, x) = S(t, x) - S(t - t_1, x) \cdot \Phi(t - t_1), \quad (4.15)$$

где  $SS(t, x)$  – понижение уровня подземных вод в зависимости от времени и пространственной координаты, остальные обозначения прежние.

Результаты расчетов  $P_2(t)$  (аналог  $P_1(t)$ , но по третьему сценарию) показаны на рис. 4.8. На 5-й год эксплуатации водозабора подземных вод

приток в озеро сократиться примерно на 30 % от величины водозабора. После прекращения водозабора приток в озеро постепенно восстанавливается и через 15 лет с момента начала расчетного периода уменьшение приток будет менее 10 % от дебита водозабора подземных вод. Предлагаемый подход позволяет рассчитывать влияния самых разных режимов водозабора подземных вод на приток в озеро Иссык-Куль.

С экологической точки зрения наиболее перспективен сценарий 2, который минимизирует безвозвратные потери и водозабор поверхностных вод. Но этот сценарий требует больших капитальных затрат. Значительно меньшие капитальные затраты требуются для бурения и оборудования резервных водозаборных скважин, но этот подход не может обеспечить минимальных безвозвратных потерь водных ресурсов.

Использование предлагаемой методики позволяет определять задержку изменений притока подземных вод в озеро Иссык-Куль для разных зон. При этом может быть рассмотрено множество сценариев смягчения последствий изменения климата.

#### **4.4. Адаптационные меры на примере бассейна р. Жууку**

Поскольку водные ресурсы становятся все более дефицитными, большое внимание уделяется эффективному использованию оросительной воды для получения максимальной экономической выгоды и сохранения водных ресурсов. А это требует соответствующих методов измерения и оценки эффективности извлечения воды из источника для получения урожайности. Ненадлежащее применение орошения приводит к водному стрессу растений и как следствие, -к уменьшению урожайности. Избыток орошения может привести к загрязнению водных ресурсов вследствие потери растениями питательных веществ через выщелачивание, водосток и эрозию почвы. Поэтому

оценка эффективности орошения является актуальным в Иссык-Кульской котловине, где в основном выращивание сельскохозяйственных культур производится только на орошаемых землях. Традиционное изобилие воды привело к тому, что устоялась варварская система с заливом. Более 90% воды в республике расходуется на ирригационные нужды. Поэтому сама по себе оценка эффективности ирригационной системы уже актуально.

Автор предлагает блок-алгоритм эффективности орошения добавить как отдельно структурированный раздел в совокупность функционально-объединённых модулей информационно-справочной системы по водоземельными и гидроэнергетическими ресурсами Иссык-Кульской области. Информационно-справочная система для Дарханского и Саруйского айыл окмоту разработана учеными Института водных проблем и гидроэнергетики НАН КР в 2005-2008 гг. [202]. В ней реализован принцип открытых технологий, которые позволяют активно развивать систему, дополняя существующие базы данных, наполняя ее новыми документами. Информационная система может быть использована не только представителями Жеты-Огузской районной администрации, главами сельских управ, работниками УОС и АВП, но и могут использовать представители администрации всей Иссык-Кульской области.

На леднике Кара-Баткак величина годового слоя растаявшего льда за абляционный период составила с 1948 по 1972 гг. 177 см, а с 1973 по 1991 гг. – 210 см и с 2013 по 2018 гг. - 306 см. Увеличение средней величины таяния ледника на 129 см было связано со значительным подъемом снеговой линии и вовлечением в активное таяние дополнительных площадей ледника, в результате чего возрос объем талых ледниковых вод и увеличилась их доля в общем стоке реки Чон-Кызыл-Суу. Увеличению расходов воды рек с ледниково-снеговым питанием в период с июня по сентябрь, включительно, соответствует резкое уменьшение накопленного баланса массы ледников Кара-Баткак и увеличение



темпов отступления ледников приведет к сокращению открытой его части и увеличению площади морен.

По данным А.Н.Диких ледниковый составляющий стока р.Кашка-Тор в 1963-1968 гг. составил 50% [52], по нашим данным в 2013-2017 гг. повысился до 64%. В результате чего среднегодовые расходы воды р.Чон-Кызыл-Суу в период с 1930 по 2014 гг. увеличились на 55%. В краткосрочной перспективе поверхностный сток рек увеличится, но в долгосрочной перспективе потоки воды, из-за сокращения площади открытой поверхности ледников, снизятся.

В Иссык-Кульской котловине в обозримом будущем при сохранении настоящей тенденции распада оледенения и, как следствие, при сокращении площадей ледников и их поверхностной депрессии, непременно наступит перелом в сторону уменьшения речного стока. При сокращении оледенения уменьшится регулирующая роль ледников. Как показано нами [98], при сохранении современных климатических условий наступит увеличение доли жидких осадков в общем стоке с ледника с 9% до приблизительно 11%; однако после 2040 г. их вклад упадет ниже первоначального уровня. Причиной такого тренда является увеличение ледниковой составляющей стока р.Кашка-Тор на 14 % в 2013-2017 гг., в сравнении с 1963-1968 гг. При постепенном росте приземной температуры воздуха и сокращении открытой площади ледника Кара-Баткак имеет место вероятность, что ледниковый сток снизится к 2050 г. на 12%, а к 2100 г. - на 43%. Это предположение подтверждается нашими данными: ежегодное сокращение площади открытой поверхности ледника Кара-Баткак на 0,014 км<sup>2</sup>/год и величина стока с открытой его поверхности 1317,5 тыс.м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>.

Исходя из тенденции изменения температуры воздуха на МС Кара-Баткак и экстраполируя на будущее тот же линейный тренд, можно предположить, что и в нивально-гляциальной зоне бассейна р.Жууку средняя годовая температура воздуха к 2050 г. может повыситься на 1,2°C, а к 2100 г. – на 1,8°C;

соответственно водность реки может сократиться в 2050 г. на 12%, а в 2100 г. - 43%. Тогда при среднегодовом расходе воды 7,54 м<sup>3</sup>/с р.Жууку в период 1990-2002 гг. годовой сток составлял 237 781 тыс.м<sup>3</sup>. Годовой сток р.Жууку в 2050 г. может составить 209 248 тыс.м<sup>3</sup>, а в 2100 г. - 135 535 тыс.м<sup>3</sup>.

В целях обеспечения в долгосрочной перспективе поливной водой посевных площадей и частных земельных наделов жителей сёл Саруйского, Дарханского и Жаргылчакского айылных аймаков Жети-Огузского района Исык-Кульской области, а также для освоения гидроэнергетического потенциала реки ОАО «Кыргызсуудолбоор» при нашем участии разработано ТЭО проекта «Строительство бассейна сезонного регулирования на реке Жууку. Проектом планируется строительство бассейна сезонного регулирования (БСР) на реке Жууку. БСР намечается создать с помощью русловой плотины. Створ проектируемой плотины расположен в 6 км выше гидропоста Жуукучак, имеющего длительные с 1937 года наблюдения, которые были максимально использованы при определении расчётных гидрологических характеристик в изучаемом створе.

Норма годового стока реки Жууку определена методом аналогии, в качестве реки- аналога выбраны данные гидропоста Жууку-устье Жуукучак и составляет:

- Среднемноголетний - 7,47 м<sup>3</sup>/с,
- 75%-ой обеспеченности - 3,99 м<sup>3</sup>/с,
- 90%- ой обеспеченности -3,64 м<sup>3</sup>/с.

Максимальные расходы воды р.Жууку в створе проектируемой плотины также определены методом гидрологической аналогии и равны обеспеченностью:

- 0,01% - 58,9 м<sup>3</sup>/с,
- 0,1% - 52,4 м<sup>3</sup>/с,
- 1% - 40,8 м<sup>3</sup>/с,

- 3% - 39,1 м<sup>3</sup>/с,
- 5% - 33,9 м<sup>3</sup>/с,
- 10% - 31,6 м<sup>3</sup>/с.

Минимальный расход реки Жууку - створ плотины равен 1,7 м<sup>3</sup>/с и отмечается он обычно в феврале-марте месяце. Сток взвешенных наносов был определён равным  $R=0,32$  кг/с, что соответствует годовому объёму наносов 9,55 тыс. тонн и мутности 73,0 г/м<sup>3</sup>.

Трасса отводящего канала из проектируемого водохранилища проходит вдоль подножия левобережного склона долины р.Жууку, концевая часть расположена ниже впадения р. Жуукучак в реку Жууку. К трассе канала на начальном участке выходит устье небольшого притока р.Кашка-Суу и три небольших лога. Для которых определены величины максимальных расходов воды.

Расчётные расходы реки Жууку:

- расход 0,1% обеспеченности - 52,4 м<sup>3</sup>/с,
- расход 1% обеспеченности - 40,8 м<sup>3</sup>/с,
- расход 5% обеспеченности - 33,9 м<sup>3</sup>/с,
- расход 10% обеспеченности - 31,6 м<sup>3</sup>/с.

Общий объем воды в БСР - 16,5 млн. м<sup>3</sup>.

В том, числе:

- полезный - 15,7 млн. м<sup>3</sup>,
- мёртвый объем воды - 0,8 млн. м<sup>3</sup>,
- избыток воды в источнике - 79,6 млн. м<sup>3</sup>.

Высота плотины - 70 м ( отметка верха плотины 2208 м).

Расчётный расход канала - 9,2 м<sup>3</sup>/сек.

Земли существующего орошения - 6132 га:

- по Дарханскому а/а - 2583 га;
  - по Саруйскому а/а - 3204 га;
  - по Жаргылчакскому а/а - 345 га.
- Земли нового орошения -1460 га:
- по Дарханскому а/а - 600 га;
  - по Саруйскому а/а - 700 га;
  - по Жаргылчакскому а/а - 160 га.

Всего земель с учётом земель нового орошения - 7592 га.

Нижне-Нарынский каскад ГЭС расположен на юге КР. Большие расстояния от крупных ГЭС до потребителей и неплатежеспособность большей части населения приводят к тому, что технические и коммерческие потери электроэнергии составляют около 20% от поставленной энергии. Начиная с 1990 г. потребление электроэнергии на коммунальные и культурно-бытовые цели увеличилось почти в три раза и к настоящему времени составляет более 60% от общего потребления электроэнергии по республике. В Жеты-Огузском районе Иссык-Кульской области основным потребителем электроэнергии является население района. Среднее потребление составляет около 100 млн. кВт-ч электроэнергии в год. Более 60% от годового потребления приходится на холодные 5 месяцев с ноября по март, когда выработка электроэнергии крупных ГЭС Нижне-Нарынского каскада ограничена, из-за обязательств КР перед соседними странами.

Изменения среднемесячных потреблений электроэнергии в Жети-Огузском районе в 2001 и 2018 гг. показана на рис. 4.8. В 2018 г. 58% потребления электроэнергии были в отопительный период, что на 2,7% меньше, чем в 2001 г. Это объясняется тем, что с 2012 г. увеличен тариф электроэнергии за превышение ежемесячного лимита. Поэтому население начали для отопления использовать уголь. Такая тенденция увеличения сжигания твердого топлива в

КР повсеместна, которая может привести к увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу. Потребление электроэнергии в Жети-Огузском районе в 2018 г. увеличилось на 50% по сравнению с 2001 г. (рис.4.8).

Ежегодный рост потребления электроэнергии в районе составил 3%. НИСИ КР в 2014 г. составил прогнозный сценарий увеличения спроса на электроэнергию на 7% ежегодно при существующей выработке электроэнергии [203]. В данном случае дефицит в 2015 году должен был составить 4,2 млрд. кВт-час, а в 2017 году дефицит увеличится до 6,2 млрд. кВт-час, а в 2024 году может наступить кризис энергосистемы с огромным дефицитом в 17,3 млрд. кВт-час, если на протяжении 10 следующих лет не будут введены новые энергетические мощности. В Жети-Огузском районе прогнозный сценарий НИСИ КР не подтвердился. Поэтому для устойчивого обеспечения спроса электроэнергии района и при имеющемся пока гидроэнергетическом потенциале предлагается в ближайшей перспективе построить малые ГЭС в районе.

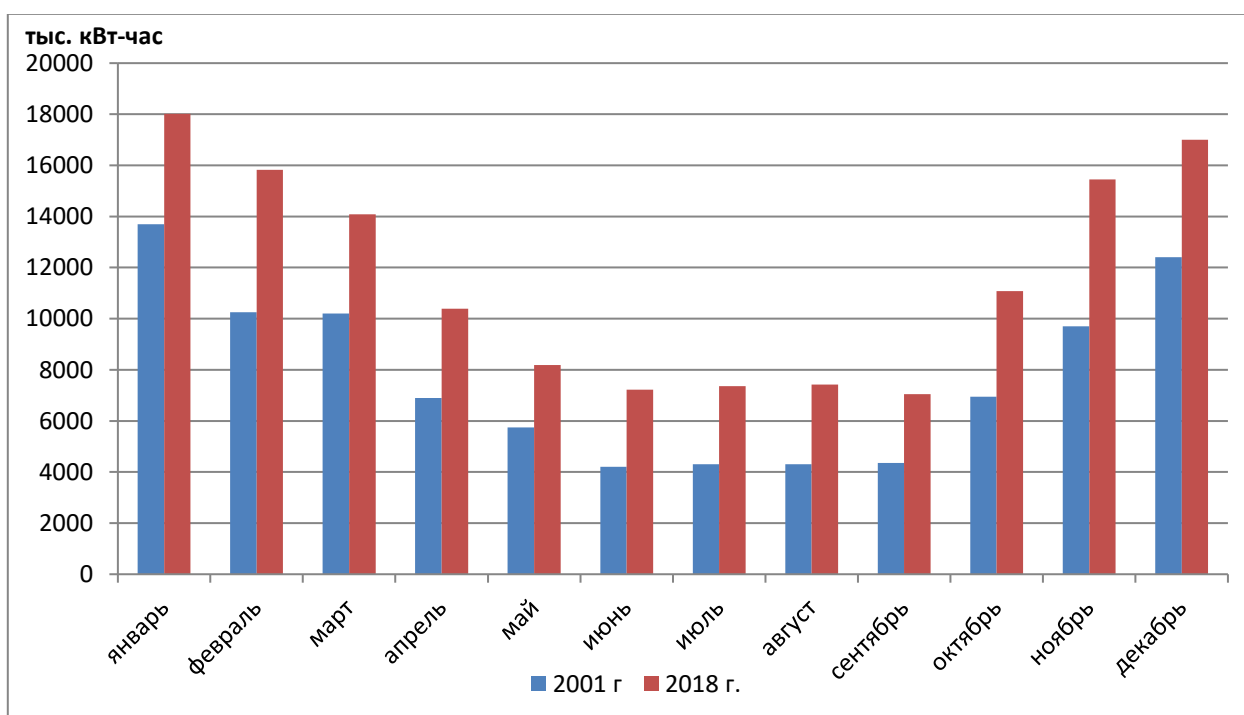


Рисунок 4.8 - Потребления электроэнергии в Жети-Огузском районе в 2001 и 2018 гг.

Река Жууку имеет наилучшие гидроэнергетические характеристики среди рек стекающий с хр.Тескей Ала-Тоо. Для определения возможности восстановления и строительства малых ГЭС были проведены теоретические и натурные инструментальные исследования гидрологических и гидроэнергетических характеристик рек Жууку и Чон-Кызыл-Суу. Потребителями электроэнергии, выработанной малыми ГЭС, будут предприниматели и местное население в селах Дархан, Сару и Кызыл-Суу. На р.Жууку около притока Кашка-Суу предполагаемое водохранилище обеспечит постоянно в течение года равномерный расход воды, необходимый для каскада малых ГЭС. Созданное водохранилище даст возможность направить на каскад малых ГЭС в холодный период года дополнительно около  $2 \text{ м}^3/\text{с}$  воды.

Создание каскада малых ГЭС планируется выполнить в три этапа:

- Первый этап предусматривает создание малой ГЭС Жууку-1расположенный на расстоянии 3 км к югу от с.Дархан, при этом водозаборный узел, шлюз-регулятор, деривационный канал, регулятор у напорного трубопровода будут выполнены с учетом пропускной способности до  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  воды.
- Водозаборный узел будет состоять из глухой плотины, устройства с автоматическим сбросом воды в реку и водовыпуска в деривационный канал.
- В точке забора воды из р.Жууку в деривационный канал река имеет широкую пойму. Поэтому часть поймы перегораживается глухой плотиной из местного грунта, взятого из верхнего бьефа. Ширина плотины по верху до 7 м.

- Часть плотины предусматривается выполнить в виде переливной стенки (ломаной полигональной стенки) из сборного и монолитного железобетона. Таким образом обеспечивается постоянный уровень воды в верхнем бьефе и упрощается работа по регулированию забора воды в деривационный канал.
- В створе плотины, на левом берегу реки, предусмотрено строительство водовыпуска в деривационный канал с глубинным затвором ГС 160-250.
- Деривационный канал представляет из себя металлические трубы с пропускной способностью  $4 \text{ м}^3/\text{с}$ . Диаметр трубы – 1 м и уклон – 0,001.
- Протяженность -1100 м, скорость течения – 0,9 м / с. Деривационный канал заканчивается регулятором.
- Регулятор имеет железобетонную монолитную конструкцию с вертикальными стенками, оборудованную затворами для подачи воды в напорный трубопровод и для сброса воды в отводящий канал.
- Напорный трубопровод, при первой очереди строительства, будет состоять из металлических труб длиной 70 м, диаметром 1 м около затворов регулятора и диаметром 0,6 м около гидротурбин.
- Здание станции планируется размером 12x12 м для общего размещения трех гидрогенераторов.
- Сброс после гидротурбин может осуществляться непосредственно в р. Жууку или в отводящий канал. Сброс оборудован регулятором того же типа, что и регулятор перед напорным трубопроводом. Сбросные каналы протяженностью 150 м и 50 м по своим поперечным размерам аналогичны деривационному каналу.
- Малая ГЭС Жууку-2 расположена ниже устья притока Жуукучак. Малая ГЭС Жууку-3 будет размещена выше устья притока Жуукучак.

- Схемы размещения малых ГЭС Жууку-2 и 3 подобные схеме размещения малой ГЭС Жууку-1.
- Река Жууку протекает в горной долине шириной по дну около 500 м. Русло реки прямолинейное, сложено валунами и галечниками, деформирующееся. Зимой наблюдаются забереги, ледяной мост, шуга, зажоры и донный лед.

Гидрографическая характеристика:

- Длина реки – 55 км.
- Расстояние от гидропоста до устья – 19 км.
- Площадь водосбора -516 кв. км.
- Средневзвешенная высота водосбора – 3290 м.
- Уклон реки – 42 %.
- Площадь оледенения – 10 % или 51 кв. км.
- По данным каталога ледников в бассейне р. Жууку насчитывается 74 ледника, которые имеют общий объем 2,2 куб. км.
- Гидрологические характеристики, параметры стока, данные о режиме стока взяты из наблюдений на гидропосту р.Жууку-устье р.Жуукучак.
- Показатель питания – 2,95 (отношение объема стока за июль-сентябрь к объему стока за март-июнь).
- Объем стока за июль-сентябрь составляет 61% от годового стока.
- Коэффициент внутри годовой зарегулированности стока – 0,62.
- Минимальный расход воды бывает в марте месяце – около 1 м<sup>3</sup>/с.
- Максимальный расход воды наблюдался в июле-августе - 30-65 м<sup>3</sup>/с.

Технический гидроэнергетический потенциал р.Жууку определялся по результатам инструментального обследования реки в среднем и нижнем её течении.



На реке Жууку можно восстановить полностью разрушенные две деривационные малые ГЭС и построить еще одну новую деривационную малую ГЭС с плотинными водозаборами.

Принимая расход воды для этих малых ГЭС равным 0,75 от общего расхода на гидросту реки Жууку были определены установленные мощности: МГЭС Жууку-1 - 400 кВт; МГЭС Жууку-2 - 3600 кВт; МГЭС Жууку-3 - 5000 кВт.

Каскад малых ГЭС Жууку-1, 2, 3 с общей установленной мощностью 9,0 тыс. кВт может выработать в течение года около 34 млн. кВт-час электроэнергии, что составляет 30% потребность района в электроэнергии.

Строительство малых ГЭС на этой реке необходимо начать в ближайшие годы, чтобы максимально использовать гидроэнергетический потенциал до наступления прогнозного сценария уменьшения стока реки.

#### **Заключение по четвертой главе**

1. Проанализирована динамика использования воды на орошение в Иссык-Кульской котловине. Показано, что увеличение стока рек, сокращение забора воды на орошение и незначительное повышение увлажненности в котловине привело к увеличению притока в оз.Иссык-Куль в конце 90-х годов.
2. В основу управления режимом подземных вод и стабилизации уровня оз.Иссык-Куль должно быть положено регулирование поверхностного стока рек и организация оптимального орошения полей путем модернизации технологий полива сельхозкультур.
3. Предложены теоретические модели оценки изменений притока подземных вод в оз.Иссык-Куль. С экологической точки зрения наиболее перспективно использование капельного орошения, который минимизирует безвозвратные потери и водозабор поверхностных вод.

4. В условиях увеличения ледниковой составляющей стока рек на примере р.Жууку рекомендовано строительство малых ГЭС для максимального использования гидроэнергетического потенциала до наступления прогнозного сценария уменьшения стока.

## ВЫВОДЫ

1. На основе анализа климатических предикторов на действующих МС Иссык-Кульской котловины установлен положительный тренд температуры воздуха на 1,0-1,3 °С по всем высотным зонам за последние 70 лет при квазистационарном состоянии атмосферных осадков.
2. По модернизированной принятой ныне методике ("зимний" и "летний" балансы стратиграфической STR отчётной системы) оценки баланса массы опорного ледника Кара-Баткак установлена его деградация с 1956 с по 2018 гг. Объем ледника за этот период уменьшился почти на 86 млн. м<sup>3</sup>, что эквивалентно 30 м слоя стока со всей поверхности. Площадь открытой части ледника Кара-Баткак с 1981 по 2018 гг. сократилась на 17%; фирновая линия поднялась с высоты 3600-3900 м на более 4000 м.
3. Разницу в изменении баланса массы ледника Кара-Баткак за последние десятилетия предложено интерпретировать как добавку к речном стоку за счёт деградации оледенения. Этим обусловлено увеличение расходов воды в р.Чон-Кызыл-Суу от модальных среднегодовых значений 4,2 м<sup>3</sup>/с в период 1936-2015 гг. до 6,5 м<sup>3</sup>/с. Предложено экстраполировать данные ледниковой составляющей стока исследованного бассейна на другие реки ледниково-снегового типа.
4. Установлена взаимосвязь временного хода уровня оз.Иссык-Куль с ростом температуры воздуха, расходом воды в реках и водозабором на орошение.

Подъем уровня озера на 1,0 м с 1998 по 2012 гг. объясняется повышением на 0,6 °С среднемесячной температуры воздуха в период абляции ледников; заметным увеличением речного стока за счет талых вод; выпадением осадков среднем на 35 мм выше нормы; снижением в 2 раза объема забора воды на орошение по сравнению с 1970-1980 гг. Тренд спада уровня озера в последние годы (2013-2018 гг.) связан в основном с климатическими факторами и забором воды.

5. Для адаптации к изменяющемуся климату в основу управления режимом подземных вод и стабилизации уровня оз.Иссык-Куль рекомендовано эффективное регулирование поверхностного стока рек и организация оптимального орошения полей путем модернизации технологий полива. Разработаны теоретические модели оценки изменений притока подземных вод в оз.Иссык-Куль. С экологической точки зрения рекомендован наиболее перспективный сценарий капельного орошения, который минимизирует безвозвратные потери и водозабор поверхностных вод.
6. В условиях увеличения ледниковой составляющей стока рек на примере р.Жууку рекомендовано строительство малых ГЭС для максимального использования гидроэнергетического потенциала до наступления прогнозного сценария уменьшения стока.

## **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

Полученные результаты исследования могут быть применены при разработке проектов по рациональному использованию природных ресурсов Иссык-Кульской котловины. Рекомендованные адаптационные меры к изменению климатических условий Иссык-Кульской котловины могут быть полезны при проведении природоохранных мер и позволят сэкономить средства при проектировании строительства рекреационных сооружений. Результаты диссертации необходимы при разработке надежного долгосрочного прогноза ледниковых и климатических изменений и речного стока. Последнее позволит снизить имеющуюся в центрально-азиатском регионе напряженность при использовании водных ресурсов трансграничных рек.

Восстановление непрерывности рядов гидрометеорологических параметров и использование модернизированной принятой методики ("зимний" и "летний" балансы стратиграфической STR отчетной системы) оценки баланса массы опорных ледников позволит более точно установить тенденции новейшей эволюции оледенения Тянь-Шаня.

В основу управления режимом подземных вод и стабилизации уровня оз. Иссык-Куль должно быть положено регулирование поверхностного стока рек и организация оптимального орошения полей путем модернизации технологий полива сельскохозяйственных культур.

Эффективное решение этой проблемы может быть связано не с увеличением объемов водозаборов из природных источников, потенциал

которых со временем будет только сокращаться, а с рациональным использованием уже вовлеченных водных ресурсов. Переход на полив дождеванием посевных площадей зерновых культур и многолетних трав и капельное орошение Иссык-Кульской области позволит уменьшить потери воды, увеличить поступление воды в вегетационный период в оз.Иссык-Куль и обеспечить стабилизацию уровня озера.

Для покрытия растущей потребности региона в электроэнергии предлагается в ближайшие годы строить на горных реках малые ГЭС. Это позволит максимально использовать гидроэнергетический потенциал рек до наступления прогнозного сценария уменьшения ее стока.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://nsidc.org/charis/charis-news-press-resources/>
2. Забиров, Р.Д. Оледенение Киргизии[Текст] / Р.Д. Забиров // Природа Киргизии. –Фрунзе: Кыргызстан, 1962.
3. Диких, А.Н. Исследование режима оледенения, ледовых ресурсов и ледникового стока горной системы Тянь-Шаня[Текст]: дис. док. географических наук:07.00.02 / А.Н. Диких. –М., 1998.
4. Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Alatoo range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat [Text] / Narama С., Shimamura Y., Nakayama D., Abdrakhmatov K. // Annals of Glaciology. –2006. – № 43. – P. 223-229.
5. Берг, Л.С. Озеро Иссык-Куль[Текст] / Л.С. Берг // Землеведение. – 1904. – Т. 11. Кн. 1-2.
6. Берг, Л.С. Гидрологические исследования на Иссык-Куле в 1928 г. [Текст] / Л.С. Берг //Тр. ГГИ. – 1930. – Т 28. –С. 14–37.
7. Озеро Иссык-Куль [Текст]. – Л.: Гидрометиздат, 1946. – 148 с.
8. Матвеев, В.П. Гидрохимические исследования на озере Иссык-Куль в 1932 г. [Текст] / В.П. Матвеев //Озеро Иссык-Куль: Материалы по гидрологии, ихтиологии и рыбному хозяйству. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1935. – Т.111. Вып. 2. –С. 7-56.
9. Шульц, В.Л. Реки Средней Азии [Текст] / В.Л. Шульц. –М.:Географгиз, 1949.
- 10.Сапожников Д.Г. Современные осадки озера Иссык-Куль и его заливов [Текст]/Д.Г. Сапожников, М.А Виселкина. –М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 159 с.

11. Озеро Иссык-Куль: Очерки по физ. географии [Текст] / Коротаяев В. Н., Забирова Р.Д., Азыкова Э. К. и др. –Фрунзе: Илим, 1978. –210 с.
12. Шнитников, А.В. Иссык-Куль (природа, охрана и перспективы использования озера) [Текст] / А.В. Шнитников.– Фрунзе: Илим, 1979. – 196 с.
13. Шнитников, А.В. Озеро Иссык-Куль [Текст] / А.В. Шнитников//Озера Тянь-Шаня и их история. – Л.: Наука, 1980. –С. 5-66.
14. Романовский, В.В. Озеро Иссык-Куль как природный комплекс [Текст] / В.В.Романовский. – Фрунзе: Илим, 1990. – С.168.
15. Влияние изменений климата на горную экосистему Тянь-Шаня (на примере Иссык-Кульского и Чуйского бассейнов) [Текст].-Бишкек: Ас-Нур, 2014.-558 с.
16. Карамолдоев, Ж.Ж. Формирование стока рек Кыргызстана в маловодный период и его рациональное использование [Текст] / Ж.Ж.Карамолдоев. – Бишкек, 2002.
17. Исследования состояния луговой растительности прибрежной части озера Иссык-Куль [Текст] / В.М. Шихотов, А.К. Тыныбеков // Мониторинг і ацэнка стану расліннагапокрыва : Матэрыялыміж народнай навукова-практычнай канферэнцыі. –Мінск, 2003. – С. 222-224.
18. Филипповская, Л.В. Биосферная территория Иссык-Куль. Растительный покров лесного пояса хребта Терской Ала-Тоо в бассейнах рек Чон-Кызыл-Суу и Джети-Огуз Иссык-Кульский государственный заповедник [Электронный ресурс]/Филипповская Л.В. –Доступно по адресу: Информационный портал [welcome.kg](http://welcome.kg).
19. Маматканов, Д.М. Водные ресурсы горного Кыргызстана на современном этапе [Текст] / Д.М. Маматканов, Л.В. Бажанова, В.В Романовский. – Бишкек: Илим, 2006. – 276 с.
20. Диких, А.Н. Режим современного оледенения Центрального Тянь-Шаня [Текст] /А.Н. Диких. – Фрунзе: Илим, 1982. –159 с.

- 21.Цигельная, И.Д. Таяние ледников. Тянь-Шань (Терской Ала-Тоо) [Текст] / И.Д Цигельная; АН Киргиз.ССР// Материалы гляциологических исследований. – Фрунзе.–1961. – Вып. 3.
- 22.Диких, А.Н. Соотношение составляющих стока рек с ледниковым питанием при потеплении климата (на примере р.Чон-Кызыл-Су) [Текст] / А.Н. Диких, Л.Л. Диких //Экология Кыргызстана: проблемы, прогнозы, рекомендации. – Бишкек: Илим, 2000. –С.81-86.
- 23.Голубев, Г.Н. Схема расчёта водного баланса областей питания ледников [Текст] / Г.Н. Голубев // Материалы гляциологических исследований. – 1972. – Вып. 20. – С. 136-145.
- 24.Каталог ледников СССР [Текст].- т.14, Вып. 2, ч. 7. -Л.: ГИМИЗ, 1969.-80 с.
- 25.Большаков, М.Н. Опыт изучения особенностей формирования стока в горном бассейне р.Чон-Кызылсу [Текст] / М.Н. Большаков, В.И. Михайлова // Материалы совещания по вопросам экспериментального изучения стока и водного баланса речных водосборов. –Валдай, 1965.
- 26.Цигельная, И.Д. К вопросу о водопроницаемости почв бассейна реки Чон-Кызылсу [Текст] /И.Д. Цигельная // Работы Тянь-Шанской физико-географической станции. – Вып. V. – Фрунзе, 1962.
- 27.Цигельная, И.Д. Условия формирования склонового стока [Текст] / И.Д. Цигельная, Г.Н. Голубев. –Фрунзе: Изд-во АН Кирг.ССР, 1963.
- 28.Шпак, В.Г. Некоторые результаты изучения элементов водного баланса в бассейне р.Чон-Кызылсу[Текст] // В.Г. Шпак, В.И Михайлова // Вопросы водного хозяйства. – Вып. 4 (гидрология). – Фрунзе: Кыргызстан, 1965.
- 29.Благообразов, В.А. Вопросы сезонных и многолетних колебаний верхней границы вечной мерзлоты на сыртах Центрального Тянь-Шаня [Текст] / В.А Благообразов // Работы Тянь-Шанской физико-географической станции. –Вып. VI. –Фрунзе, 1964. –С. 65-76.



- 30.Хейфец, М.Н. Причины понижения уровня озера за последние десятилетия [Текст] / М.Н. Хейфец //Озеро Иссык-Куль. – Фрунзе: Илим, 1978. – С. 117-122.
- 31.Коротаев, В.Н. Береговая зона озера Иссык-Куль [Текст] / В.Н Коротаев. – Фрунзе, 1967. – 153 с.
- 32.Озеро Иссык-Куль: Очерки по физической географии [Текст]. – Фрунзе: Илим, 1978. – 211 с.
- 33.Озеро Иссык-Куль и тенденции его природного развития [Текст] //Под ред. Д.В. Севастьянова, Н.П. Смирновой. – Л.: Наука, 1986. – 256 с.
- 34.An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkul in Central Asia” [Text] / FrançoisCrétauх, StephaneCalmant, VladimirRomanovski, AntonShabunin, FlorentLyard, MurielBergé-Nguyen, AnnyCazenave, FabriceHernandez, FelixPerosanz// Journal of Geodesy . –Volume 83, Number 8. – Springer Berlin / Heidelberg, 2009. –P. 723-735.
- 35.The closed Lake Issyk-Kul as an indicator of global warming in Tien-Shan [Text] / Vladimir V. Romanovsky, SaadatTashbaeva, Jean-François Crétauх, StephaneCalmant, Vanessa Drolon // Natural Science. –2013. –Vol.5, No.5. – P. 608-623.
- 36.Absolute Calibration or Validation of the Altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan)[Text] /Jean-François Crétauх , Muriel Bergé-Nguyen, StephaneCalmant, NurzatJamangulova, RysbekSatylkanov, FlorentLyard, Felix Perosanz, Jacques Verron, Amanda SamineMontazem, Gianfranco Le Guilcher, DelphineLeroux, Joel Barrie, Philippe Maisongrande, Pascal Bonnefond //Remote Sens. – 2018. –10(11), 1679; doi:10.3390/rs 10111679.
- 37.Все об озере Иссык-Куль [Текст]:Энцикл.справ. пособие по природе и экологии озера и котловины / В.В. Романовский, В.А. Кузьмиченок, Д.М. Маматканов, А.О. Подрезов. –Бишкек, 2005. – С. 404.
- 38.Современные тенденции температуры воздуха и реакция на них различных видов водных ресурсов Иссык-Кульской котловины [Текст] / Д.М. Маматканов,

- А.Н. Диких, В.В. Романовский, М.Н.Суюнбаев, З.С.Шамбетов//Эхо науки. – 1997. – №2-3. –С. 96–101.
- 39.Все об озере Иссык-Куль. Энциклопедический справочник по озеру и котловине [Текст] / В.В. Романовский, В.А. Кузьмиченок, Д.М. Маматканов, А.О. Подрезов. – Бишкек, 2014. – С. 403.
- 40.Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм [Текст] // Всемирная метеорологическая организация. – 2017. – № 1203. 2. –14 с.
- 41.[http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\\_releases/documents/966\\_ru.pdf](http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/documents/966_ru.pdf).
- 42.<http://www.cru.uea.ac.uk>,Brohan et al., 2008
- 43.<http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm>; Smith et al., 2005
- 44.<http://data.giss.nasa.gov/gistemp>; Hansen et al., 2001
- 45.Груза, Г.В. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха [Текст] / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. – 194 с.
- 46.Сумарокова, В.В. Факторы таяния ледников в бассейне реки Ала-Арча. Гляциологические исследования на Тянь-Шане [Текст] / В.В. Сумарокова. – Фрунзе: Илим, 1965. –С. 36-45.
- 47.Цыценко, К.В. Испарение с поверхности горного водосбора [Текст] / К.В. Цыценко // Работы Тянь-Шанской физико-географической станции. – Вып. XI. –Фрунзе: Илим, 1965. – С. 57-76.
- 48.Романовский, В.В. Ритмичность климата и изменений уровня озера Иссык-Куль [Текст] / В.В. Романовский //Изучение гидродинамики озера Иссык-Куль с использованием изотопных методов. – Б.: Илим, 2005. –С. 81-89.
- 49.Leyton, L. Precipitationandforests. Proc. Jt. FAO-U.S.S.R. Int. Symp. on For. Influences and Water shed Manage[Text] /Leyton L., J.C. Rodda. –[Moscow, Aug. 17-Sept. 6, 1970]. –1972. –P. 16-27. FAO. Limstrom, G.A. 1960.

50. Пономаренко, П.Н. Атмосферные осадки Киргизии [Текст] / П.Н. Пономаренко. –Л: Гидрометеиздат, 1976. –134 с.
51. Григорьев, А.А. Осадки Чуйской долины [Текст] / А.А. Григорьев // Сб. работ Фрунзенской гидрометеорологической обсерватории. – Вып. 1. –Фрунзе, 1964.
52. Диких, А.Н. Режим ледников и водный баланс северного склона хр. Терской Ала-Тоо[Текст] / А.Н. Диких, В.Н. Михайлова. –М.: Наука, 1976. –131 с.
53. Диких, А.Н., Снежный покров высокогорной зоны Киргизии [Текст] / А.Н. Диких. – Фрунзе: Илим, 1978. –102 с.
54. Михайлова, В.И. Распределение осадков в бассейне р. Чон-Кызыл-Суу[Текст] / В.И. Михайлова //Изв. АН Киргиз.ССР, серия естеств. и техн. наук. –1962. – т.4, Вып. 5 (водное хозяйство).
55. Изучение условий формирования природных вод Иссык-Кульской котловины с помощью трития [Текст] / В.В. Романов, Л.С. Власова, А.В. Месхетели, Л.В. Сальнова//Водные ресурсы. – 1989. –№4. – С.82-93.
56. Новак, В.А. К вопросу об испарении с поверхности озера Иссык-Куль [Текст] / В.А. Новак, В.В. Романовский //Физико-географические исследования озера Иссык-Куль и его берегов. –Фрунзе: Илим, 1988. – С. 52–73.
57. Климат Киргизской ССР [Текст] / Под ред. З.А.Рязанцевой. –Фрунзе: Илим, 1965. –291 с.
58. Константинов, А.К. Испарение в природе [Текст] / А.К. Константинов. –Л., Гидрометеиздат, 1986. –532 с.
59. Романовский, В.В. Термический режим озера Иссык-Куль[Текст] / В.В. Романовский, Я.С.Стависский // Тянь-Шаньская физико-географическая станция и исследование высокогорной Киргизии. –Фрунзе: Илим, 1980. – С.159-167.

- 60.Ковда, В.А. Основы учения о почвах [Текст] / В.А Ковда. –Москва: Наука, 1973.
- 61.Raper, S.C.B. The potential for sea level rise: New estimates from glacier and ice cap area and volume distributions [Text] /Raper S.C.B., Braithwaite R. J// Geophys. Res. Lett. – 2005. – 32, L05502, doi: 10.1029/2004GL021981.
- 62.Dyurgerov, M.B. Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot. Institute of Arctic and Alpine Research [Text] /Dyurgerov M.B., M.F. Meier // Occasional Paper 58. – 2005.
- 63.IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Text] / (eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M.C. Marquis, K. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller) // Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge and New York. – 2007. – 996 p.
- 64.Гляциологический словарь [Текст] / Под ред. В.М. Котлякова. – Л.: ГИМИЗ, 1984. –527 с.
- 65.Калесник, С.В. Очерки гляциологии [Текст] / С.В. Калесник. –М.: Географгиз, 1963. –551 с.
- 66.Тронов, М.В. Ледники и климат [Текст] / М.В. Тронов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. –408 с.
- 67.Войтковский, К.Ф. Реакция горных ледников на изменения климата [Текст] / К.Ф Войтковский // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 86. – М.: РАН, 1999. –С. 128-132.
- 68.Авсюк, Г.А. Искусственное усиление таяния льда и снега горных ледников[Текст] / Г.А. Авсюк //Труды Института географии АН СССР. –1953. – т.56.

- 69.Цыкин, Е.Н. Приход вещества в фирновых зонах ледников (метод изучения с помощью термозондирования) [Текст] / Е.Н. Цыкин //Результаты исследования по программе МГГ, Гляциология. – М.: Изд-во АН СССР. –1962. –№8.
- 70.Шумский, П.А. Основы структурного ледоведения [Текст] / П.А. Шумский. – М.: изд-во АН СССР, 1955. – 492 с.
- 71.Aizen, V.B., Aizen, E.M., SurazakovA.B. KuzmichenokV.A. 2006. Assessment of Glacial Area and Volume Change in Tianshan (Central asia) During the Last 150 years Using Geodetic, Aerial Photo, ASTER and SRTM Data. AnnalsofGlaciology, V.43.
- 72.Оледенение Тянь-Шаня [Текст] / А.Н. Диких, М.Б.Дюргеров, И.В. Рацек, А.М. Сокальская, Е.Н. Вилесов, Ян Синюань; под ред. М.Б. Дюргерова. –М., 1995. –С. 131-168.
- 73.Кузьмиченок, В.А. Математико-картографическое моделирование возможных изменений водных ресурсов и оледенения Кыргызстана при изменении климата [Текст] / В.А. Кузьмиченок // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. –2003 . –Том 3, N 6. –С. 53-64.
- 74.Волошина, А.П. Климат высокогорной зоны [Текст] / А.П. Волошина, К. Сьенчень; Под ред. М.Б. Дюргерова // Оледенение Тянь-Шаня. –М.: Изд-во ВИНТИ, 1995. –С. 43-59.
- 75.Каульбарс, А.В. Материалы по географии Тянь-Шаня, собранные во время путешествия 1869 г. [Текст] / А.В Каульбарс // Записки РГО по общей географии. – СПб., 1875.–т.5.
- 76.Калесник, С.В. Ледники верховьев Большого Нарына [Текст] / С.В. Калесник // Тр. ледн. экспедиций, 2. –Л., 1935. –С. 83-186.
- 77.Оледенение Тянь-Шаня [Текст] / Под ред. М.Б. Дюргерова, ЛюШаохая, Се Зичу. –М., 1995. – 233с.

78. Вилесов, Е.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX в. [Текст] / Е.Н. Вилесов, В.Н. Уваров. - Алматы: Казахский гос. ун-т, 2001. - 252 с.
79. Bolch, T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data [Text] / Bolch T. // Global and Planetary Change 56. – 2007. – P. 1-12.
80. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan [Text] / Li B., Zhu A.X., Zhang Y., Pei T., Qin C., Zhou C. // Journal of Glaciology. 52. – 2006. – P. 425-432.
81. Mass balance and recession of Urumqi glacier No. 1, Tien Shan, China, over the last 45 years [Text] / Jing Z., Jiao K., Yao T., Wang N., Li Z. // Annals of Glaciology 43. – 2006. – P. 214-217.
82. Khromova, T.E. Late-twentieth century changes in glacier extent in the Ak-shirak Range, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery, Geophys [Text] / Khromova T.E., Dyurgerov M.B., Barry R.G. // Res. Lett., 30(16). – 2003, 1863, doi:10.1029/2003GL017233.
83. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data [Text] / Aizen V.B., Kuzmichenok V. A., Surazakov A.B., Aizen E.M. // Annals of Glaciology, 43. – 2006– P. 202-213.
84. Полевые исследования по теме "Разработка научных основ искусственного усиления таяния ледников Средней Азии" [Текст] / Л.Д. Долгушин и др. // Материалы гляциологических исследований. Хроника обсуждения. - М., 1965. - № 11.
85. Пальгов, Н.Н. Связь между температурой воздуха и таянием ледников Заилийского Алатау [Текст] / Н.Н. Пальгов // Вестн. АН КазССР. - 1946. - № 10 (19).

86. Сочеванов, В.Е. Процессы стаивания на поверхности ледника Башкара [Текст] / В.Е. Сочеванов // Тр. ледниковых экспедиций. – Вып. 1. – Л., 1936.
87. Bozhinskiy, A.N. Role of debris cover in the thermal physics of glaciers [Text] / Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V. // Journ. of Glaciology. – 1986, 32 (111): 255–266.
88. Popovnin, V.V. Influence of sub-debris thawing on ablation and runoff of the Djankuat glacier in the Caucasus [Text] / Popovnin V.V., Rozova A.V. // Nordic Hydrology. – 2002, 33 (1): 75–94; A.A.
89. Резепкин, В.В. Эволюция поверхностной морены ледника Джанкуат к 2025 г. [Текст] / В.В. Резепкин, В.В. Поповнин // Лед и снег. – 2018. – № 58 (3). – С. 307–321.
90. Баков, Е.К. Закономерности движения и динамики ледников Центрального Тянь-Шаня [Текст] / Е.К. Баков. – Фрунзе: Илим, 1983. – С. 14.
91. Aizen, V.B. Glaciers and hydrological changes in the Tien Shan: simulation and prediction [Text] / Aizen V.B., Aizen E.M., Kuzmichonok V.A. // Environmental Research Letters. – 2007. – V. 2. 045019. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045019.
92. Bolch, T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data [Text] / Bolch T. // Global and Planetary Change. – 2007. – V. 56. – P. 1–12.
93. Dyrgerov, M. Reanalysis of Glacier Changes: from the IGY to the IPY, 1960–2008 [Text] / Dyrgerov M. // Data of Glaciological Studies. – 2010, publ. 108. – P. 6–115.
94. Kutuzov, S. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatau, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century [Text] / Kutuzov S., Shahgedanova M. // Global and Planetary Change. – 2009. – V. 69. – P. 59–70.

95. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013 [Text] / Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A. et al. // *Science of the Total Environment*. – 2016. – V. 562. – p. 364–378. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.162>
96. Sub-debris melt rates on southern Inylchek Glacier, central Tian Shan [Text] / Hagg W., Mayer C., Lambrecht A., Helm A. // *Geografiska Annaler*. – 2008. – Vol. 90 A. – P. 55–63.
97. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) [Text] / Sorg A., Bolch T., Stoffel M. et al. // *Nature Climate Change*. – 2012. – V. 2. – P. 725–731. DOI:10.1038/nclimate1592.
98. Модельные исследования эволюции горных ледников на примере ледника Сары-Тор (Внутренний Тянь-Шань) [Текст] / О.О. Рыбак, Е.А. Рыбак, Н.А. Яицкая, В.В. Поповнин, И.И. Лаврентьев, Р. Сатылканов, Б. Жакеев // *Криосфера Земли*, 2019. – т. XXIII, № 3. – С. 33–51. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(33-51).
99. Brief communication: contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir–Karakoram–Himalaya [Text] / Kääh A., Treichler D., Nuth C., Berthier E. // *The Cryosphere*. – 2015. – V. 9. – P. 557–564. – <http://dx.doi.org/10.5194/tc-9-557-2015>.
100. Соломина, О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене [Текст] / О.Н. Соломина. – М.: Научный мир, 1999. – 264 с.
101. Забиров, Р.Д. Оледенение Средней Азии [Текст] / Р.Д. Забиров // Работы Тянь-Шанской физико-геогр. станции. Гляциология. – Вып. 1. – Фрунзе, 1958.
102. Изменения ледников снежного покрова и мерзлоты в Китае. Доклад на Международном семинаре «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии [Текст] / Син Ли, ГодонЧенг, Худзюндзин, ЁнпингШен, Тао Че, Рюдзин, Ли



Зонгву, ЖутонгНань, ДзянВанг, Ерсиканг. –Алматы, 2006, 28-30 ноября. – С. 238-251.

103. Aizen, V.B. Glaciers and snow cover in Central Asia as indicators of climate change in earth-ocean-atmosphere system [Text] / Aizen V.B., Aizen E.M. //Regional hydrological Response to Climate Warming. – 1997. – Kluwer academic Publ. – P.269.

104. Кошоев, М.К. Колебания ледников Центрального Тянь-Шаня в XX веке [Текст] / М.К. Кошоев // Режим ледников Центрального Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим, 1986. –С 31-59.

105. Каталог ледников СССР [Текст].-т.14, Вып. 2, ч. 7.-Л.: ГИМИЗ, 1969.-80 с.

106. Каталог ледников СССР [Текст].-т.14, Вып. 1, ч. 5.-Л.: ГИМИЗ, 1977.-80 с.

107. Каталог ледников СССР [Текст].-т.14, Вып. 2, ч. 5.-Л.: ГИМИЗ, 1976.-80 с.

108. Корженевский Н.Л. Каталог ледников Средней Азии [Текст] / Н.Л. Корженевский. –Ташкент, 1930.

109. Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins, a guide to measurement and data computation [Text] // Technical Papers in Hydrology. UNESCO. 5. – Paris, 1970. – 20 p.

110. Котляков, В.М. Некоторые предложения по оптимизации представления масс-балансовых данных в изданиях Всемирной службы мониторинга ледников [Текст] / В.М, Котляков, В.В. Поповнин, Д.Г.Цветков // Материалы гляциологических исследований.–Вып. 73. – 1992. –С. 161-167.

111. Последние публикации Всемирной службы мониторинга ледников: традиции и прогресс [Текст] / В.М. Котляков, Г.Б. Осипова, В.В. Поповнин, Д.Г. Цветков // Материалы гляциологических исследований. – 1997. – Вып. № 82. – С. 125-139.

112. Mayo, L.R. A system to combine stratigraphic and annual mass-balance systems: a contribution to the International Hydrological Decade [Text] / Mayo L.R., Meier M.F., Tangborn W.V. // Journ. of Glaciology. – v. 11, № 61. – 1972. – P. 1-14.
113. Ostrem, G. Glacier mass-balance measurements [Text] / Ostrem G., Brugman M. // NHRI Sci. Rep. – № 4. Saskatoon. – 1991. – 224p.
114. Ходаков, В.Г. Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР [Текст] / В.Г. Ходаков. – М.: Наука, 1978. – 194 с.
115. Кузьмиченок, В.А. Изменения ледников хребта Ак-Шыйрак с 1943 по 1977 годы [Текст] / В.А. Кузьмиченок. – М.: ГУГК, 1990.
116. Романовский, В.В. Уровень озера Иссык-Куль как индикатор современных изменений климата [Текст] / В.В. Романовский // Наука и новые технологии. – 1999. – №2. – С.72-76.
117. Гляциологический словарь [Текст] / Под ред. В.М. Котлякова. – Л.: ГИМИЗ, 1984. – 527 с.
118. Забиров, Р.Д. Современное и древнее оледенение в бассейне оз. Иссык-Куль [Текст] / Р.Д. Забиров // Гляциологические исследования на Тянь-Шане. – Фрунзе: Илим, 1975. – С. 7–16.
119. Изменение подходов к расчету баланса масс ледников Внутреннего Тянь-Шаня [Текст] / Б. Эрменбаев, Д. Маматканов, Р. Сатылканов, В.В. Поповнин // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2019. – № 4. – С. 116 – 121.
120. Первые итоги наблюдений за колебаниями ледника Карабаткак на Тянь-Шане по новой программе [Текст] / Е.К. Баков, А.Н. Диких, Л.Л. Диких, Р.Д., Забиров, А.А. Клепова, Т.А. Купидонова // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 36. – 1979. – С. 165-170.

121. Котляков, В.М. Современные исследования балансов льда, воды и тепла в репрезентативных ледниковых бассейнах [Текст] / В.М. Котляков // *Материалы гляциологических исследований*. – Вып. 21. – 1973. – С. 206-219.
122. Дюргеров, М.Б. Расчёт баланса массы ледниковых систем [Текст] / М.Б. Дюргеров // *Материалы гляциологических исследований*. – Вып. 57. – 1986. – С. 8-15.
123. Голубев, Г.Н. Гидрология ледников и некоторые основные её проблемы [Текст] / Г.Н. Голубев // *Материалы гляциологических исследований*. – Вып. 18. – 1971. – С. 73-86.
124. Голубев, Г. Н. Баланс массы ледника Джанкуат в 1967-1971 гг. и методы его измерения и расчёта [Текст] / Г.Н. Голубев, М.Б. Дюргеров // *Материалы гляциологических исследований*. – Вып. 21. – 1973. – С. 80-88.
125. Дюргеров, М.Б. Изменчивость аккумуляции и абляции горных ледников [Текст] / М.Б. Дюргеров, Г.И. Ольшанский, Н.В. Прохорова // *Материалы гляциологических исследований*. – Вып. 65. – 1989. – С. 92-102.
126. Дюргеров, М.Б. Методические основы и программа наблюдения за колебаниями внешнего массообмена и баланса массы ледников [Текст] / М.Б. Дюргеров // *Материалы гляциологических исследований*. – Вып. 64. – 1988. – С. 153-163.
127. Østrem, G. Glacier mass-balance measurements – A manual for field and off ice work [Text] / Østrem G., Stanley A. – Ottawa, Canada, 1969. – 125 p.
128. Dyurgerov, M.B. Glacier Mass Balance and Regime: Data of Measurements and Analysis [Text] / Dyurgerov M.B. // *Occasional Paper*. – No. 55. – Boulder, Colorado, 2002.
129. Бажев, А.Б. Роль внутреннего инфильтрационного питания в балансе массы ледников и методы его определения [Текст] / А.Б. Бажев // *Материалы гляциологических исследований*. – Вып. 21. – 1973. – С. 219-231.

- 130.Цыкин, Е.Н. Приход вещества в фирновых зонах ледников (метод изучения с помощью термозондирования) [Текст] / Е.Н. Цыкин. – М.: Изд-во АН СССР //Результаты исследования по программе МГГ, Гляциология. – 1962. – №8.
- 131.Михаленко, В.Н. Роль наложенного льда в массообмене ледников континентальных районов [Текст] / В.Н. Михаленко, С.Н.Ушнурцев // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 70. –1991. – С. 67-71.
- 132.Расчленение гидрографа реки Джанкуат, Центральный Кавказ, с помощью изотопных методов водные ресурсы [Текст] / Ю. К. Васильчук, Е.П. Рец, Ю.Н. Чижова и др. –Том 43, № 6. –2016. – С. 579–594.
- 133.Бажанова, Л.В. Динамика оледенения в условиях современного изменения климата на примере ледника Кара-Баткак, хребет Тескей Ала-Тоо[Текст] / Л.В. Бажанова, Р.А.Сатылканов, Б.О. Эрменбаев //Вестник КРСУ. – Бишкек, 2017. –№ 4. – С. 189-194.
- 134.Иванов, Н. Н. Об определении величин испаряемости [Текст] / Н. Н. Иванов //Изв. ВГО. –т. 86, № 2. –1954.
- 135.Михаленко, В.Н. Баланс массы отдельных ледников и бассейнов [Текст] / В.Н. Михаленко, М.Б. Дюргеров, ЛюШаохай; под ред. М.Б. Дюргерова // Оледенение Тянь-Шаня. –М., 1995. – С. 79-100.
- 136.Авсюк, Г.А.Палеогляциология: предмет и методы, задачи и успехи [Текст] / Г.А.Авсюк, М.Г. Гросвальд, В.М. Котляков // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 19. – 1972. – С. 92-98.
- 137.Ходаков, В.Г. Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР [Текст] / В.Г. Ходаков. – М.: Наука, 1978. –194 с.
- 138.Zhang, J. Mass balance studies on Glacier No. 1 in Urumqi River, Tianshan – J. Glaciol [Text] / Zhang J. //Geocryol. –1981. – № 3. –Р. 32-40.
- 139.Губанов, А.С. Масс-балансовый мониторинг ледников массива Ак-Шийрак[Текст]: Дипломная работа / А.С. Губанов. –МГУ, 2017.

140. Геткер, М.И. Расчет месячных сумм твердых осадков по общим месячным суммам осадков и средним месячным значениям температуры воздуха [Текст] / М.И. Геткер, Г.Е. Глазырин, Ю.Н. Емельянов // Труды САРНИГМИ. – Вып. 62 (77). – 1972. – С. 39-45.
141. Кренке, А.Н. 1966. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха [Текст] / А.Н. Кренке, В.Г. Ходаков // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 12. – 1966. – С. 153-163.
142. Расчеты некоторых характеристик таяния и его тепловых ресурсов с помощью ЭВМ [Текст] / В.Р. Барбаш, Р.Г. Бочарова, Н.В. Давидович, А.Н. Кренке // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 43. – 1982. – С. 114-119.
143. Кузьмиченок, В.А. Цифровые модели характеристик увлажнения Кыргызстана [Текст] / В.А. Кузьмиченок. – Бишкек, 2008. – С. 227.
144. Айзин, В.Б. Реконструкция баланса массы ледника Голубина [Текст] / В.Б. Айзин // Материалы гляциологических исследований. – Вып. 62. – 1988. – С. 119-126.
145. Иверонова, М.И. Особенности режима снежного покрова на ледниках (на примере одного из ледников хр. Терской Алатау) [Текст] / М.И. Иверонова // Основные методические указания по гляциологическим исследованиям, выпуск 15. Приложения. – М., 1957. – С. 21-30.
146. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1981.
147. Космический снимок Landsat 2017.
148. Satylkanov, R. Ablation of Ice and Snow of Kara-Batkak Glacier and Its Impact on River Flow [Text] / Satylkanov R. // Journal of Climate Change. – Vol. 4. – No. 2 (2018). – P. 1-14.

149. Сатылканов, Р.А. Временная изменчивость атмосферных осадков Иссык-Кульской котловины [Текст] / Р.А. Сатылканов // Вестник Забайкальского государственного университета. – Чита, РФ. – 2017. – № 10. – С. 29-37.
150. Волошина, А.П. Справочное пособие по гляциометеорологии [Текст] / А.П. Волошина. – М., 2006. – 63 с.
151. Диких, А.Н. Особенности таяния ледника Карабаткак [Текст] / А.Н. Диких // Гляциологические исследования на Тянь-Шане. – Вып. 6. – Фрунзе. Изд-во АН КиргССР. – 1964. – С. 35-39.
152. Кренке, А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР [Текст] / А.Н. Кренке. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.
153. Онучин, А.А. Влияние лесистости и климатических факторов на годовой сток рек Прииссыккуля [Текст] / А.А. Онучин, К.К. Гапаров, Н.А. Михеева // Лесоведение. – 2008. – № 6. – С. 45-52.
154. Иверонова, М.И. Процессы формирования современных морен в Тянь-Шане [Текст] / М.И. Иверонова // Работы Тянь-Шанской физико-географической станции. – Вып. 2. – М.: Изд-во АН СССР, 1952.
155. Максимов, Е.В. Изменение климата и горного оледенения в новой эре (в внутренней структуре 1850-летнего ритма) [Текст] / Е.В. Максимов // Изв. ВГО. – т. 14, Вып. 2. – 1982.
156. Марков, К.К. О форме и происхождении морен в горах [Текст] / К.К. Марков // Ученые записки МГУ. География. – Вып. 119, кн. 2. – 1946.
157. Серебрянный, Л.Р. Методика изучения конечных морен горных ледников [Текст] / Л.Р. Серебрянный, А.В. Орлов. – Геоморфология. – 1980. – № 4.
158. On the cause of glacier mass balance variations in the Tien Shan mountains [Text] / Dyurgerov M.B., Mikhalenko V.N., Kunakhovitch M.G. et al. // GeoJournal. – v. 33, No. 2/3. – 1994. – P.311-317.

159. Mikhalenko, V.N. Glaciers in the Tien Shan: processes in relation to climate and river runoff [Text] / Mikhalenko V.N., Dyurgerov M.B. // Arctic, Antarctic and Alpine Research. – 2004.
160. Дюргеров, М.Б. Реконструкция баланса массы, пространственного положения и жидкого стока ледника Джанкуат со второй половины XIX века [Текст] / М.Б. Дюргеров, В.В. Поповнин // МГИ. – Вып. 40. – 1981. – С.73-82.
161. Больш, Т. Значение ледников, каменных глетчеров и насыщенной льдом вечной мерзлоты Северного Тянь-Шаня как водонапорной башни в условиях изменения климата. Доклад на Международном семинаре «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии [Текст] / Т.Больш, С. Марченко. – Алматы, 2006.
162. Сю, Джианчу. Изменения климата и их воздействие на ледники и управление водными ресурсами в Гималаях. Доклад на Международном семинаре «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии [Текст] / Сю Джианчу, Эрун Шестра, Мэтс Эрикссон. – Алматы, 2006.
163. Aizen, V. 1995. Climate, snow cover, glaciers and runoff in Tien Shan, Central Asia [Text] / Aizen V., Aizen E. Malock J. // Water resources bulletin. – V.31. – № 6. Desember. – P.1-28.
164. WWF Nepal Program, 2005. [Text] / San deep Chamling Rai (coordinator), Trishna Gurung (ed.), Arun. B. Shrestha, Rajesh Kumar, Yongping Shen // An Overview of Glaciers Retreat, and Subsequent Impacts in Nepal, India and China. March. – 2005.
165. Благовещенский, В.П. Колебания снежности в горных районах Юго-Восточного Казахстана [Текст] / В.П. Благовещенский, Н.В. Пиманкина // Гидрометеорология и экология. – 1997. – №3. – С.187-197.
166. Финаев, А.Ф. Анализ гидрометеорологических наблюдений в Таджикистане за период 1990-2005 гг. Доклад на Международном семинаре «Оценка снежно-

- ледовых и водных ресурсов Азии [Текст] / А.Ф. Финаев. –Алматы, 2006. – С. 135-151.
- 167.Climate and Hydrologic Changes in the Tien Shan, Central Asia [Text] / Aizen V.B., Aizen E.M., Malock J.M., Dozier J. //Journal of Climate. – Vol. 10. # 6. – 1997. –Р.1393 1404.
- 168.Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху [Текст] / Под ред. В.М. Котлякова. –М.: Наука, 2006. –482 с.
- 169.Глазырин, Г.Е. Сведения о системе гидрометеорологического мониторинга в Узбекистане. Доклад на Международном семинаре «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии [Текст] / Г.Е. Глазырин.-Алматы, 2006.-С.152-177.
- 170.Макаревич, К.Г. Изменение оледенения Тянь-Шаня в XX веке [Текст] / К.Г. Макаревич, ЛюШаохай //Оледенение Тянь-Шаня. –М., 1995. –С. 189-213.
- 171.McCabe, G.J.Variability in winter mass balance of Northern Hemisphere glaciers and relations with atmospheric circulation[Text] / McCabe G.J., Fountain A.G.,Dyurgerov M. // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – [2000] 32(1): 64-72.
- 172.Кузьмиченок, В.А. Изменения ледников хребта Ак-Шыйрак с 1943 по 1977 годы [Текст] / В.А. Кузьмиченок. – М.: ГУГК, 1990.
- 173.Авсюк, Г.А. Измерение температур льда ледника Кара-Баткак[Текст] / Г.А. Авсюк // Труды Ин-та геогр. АН СССР. – Вып. 60. – 1954. – С. 31-39.
- 174.Овчаров, Е.Е.Гидрология и гидрометрия [Текст] / Е.Е. Овчаров, Н.Н.Захаровская. –Л.: Гидрометеиздат, 1986. – С.230.
- 175.Бажанова, Л.В. Оценка источников питания рек высокогорного пояса на фоне климатических изменений (на примере р.Кашка-Тор, бассейн р. Чон-Кызыл-Суу) [Текст] / Л.В. Бажанова, Р.А. Сатылканов // Вестник КРСУ. – Бишкек. –2017. –№ 5.



176. Romanovsky, V.V. Water level variations and water balance of Lake Issyk-Kul: Lake Issyk-Kul: Its Natural Environment [Text] / Romanovsky V.V. // IV. Earth and Environmental Sciences. –Vol.13. – 2002. –P.45.
177. Крицкий, С.Н. Колебания уровня замкнутых водоемов [Текст] / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель // Тр. Гидропроектов. –сб. 12. –М.-Л.: Энергия, 1964.
178. <http://www.stat.kg/media/publicationarchive/c5cbabd4-7ac9-4e76-9393-230e31c4b1c1.pdf>
179. Гидрогеология СССР. Киргизская ССР [Текст]. –Том 40. –М.: Недра, 1971. –487 с.
180. Гронская, Т.П. Обзор исследований водного баланса озера Иссык-Куль [Текст] / Т.П. Гронская // Тр. ГГИ. – Вып. 230. –Л.: Гидрометеиздат, 1976. – С.15-20.
181. Каплинский, М.Н. Динамика водного баланса озера Иссык-Куль при современном состоянии орошения и на перспективу [Текст] / М.Н. Каплинский, М.И. Косухина // Вопросы водного хозяйства. –Вып. 44. –1978. – С.103-115.
182. Раткович, Д.Я. Водный баланс и режим уровня озера Иссык-Куль [Текст] / Д.Я. Раткович // Водные ресурсы. – 1977. –№5. – С. 20-33.
183. Гронская, Т.П. Водный баланс и ожидаемые уровни воды озера Иссык-Куль [Текст]: Автореф. дис. канд. геогр. наук / Гронская Т.П. – Л., 1983. – С. 16.
184. Государственное агентство по охране окружающей среды и лесному хозяйству при Правительстве Кыргызской Республики. Второе Национальное сообщение Кыргызской Республики по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата [Электронный ресурс] / ГАООСЛХ (2008/2009). –Бишкек, 2008. –Доступно по адресу: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/kyrnc2r.pdf>.
185. Климатический профиль Кыргызской Республики. Государственное агентство охраны окружающей среды и лесного хозяйства при Правительстве

Кыргызской Республики [Электронный ресурс] / Ильясов Ш., Забенко О., Гайдамак Н., Кириленко А., Мырсалиев Н., Шевченко В., Пенкина Л.; Программа развития Организации Объединенных Наций. – Бишкек, 2013. – Доступно по адресу:

[http://www.kg.undp.org/content/dam/kyrgyzstan/Publications/env-energy/kgz\\_Kyrgyzstan%20Climate%20profile\\_RUS\\_for%20web-opt.pdf](http://www.kg.undp.org/content/dam/kyrgyzstan/Publications/env-energy/kgz_Kyrgyzstan%20Climate%20profile_RUS_for%20web-opt.pdf).

186. Второе национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата [Электронный ресурс] / Узгидромет (2008). – Доступно по адресу: [http://unfccc.int/national\\_reports/non-annex\\_i\\_natcom/items/10124.php](http://unfccc.int/national_reports/non-annex_i_natcom/items/10124.php).

187. ADB (2014). Climate Change and Sustainable Water Management in Central Asia. ADB Central and West Asia Working Paper Series. No. 5. May 2014 [Electronic resource] / Asian Development Bank, Manila. – URL: <https://www.adb.org/publications/climate-changeand-sustainable-water-management-central-asia>.

188. Westphal, M. (2008). Summary of the Climate Science in the Europe and Central Asia Region: Historical Trends and Future Projections. The World Bank [Electronic resource]. URL: [https://www.google.ru/urlsa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjQxJWx\\_a3TAhWzbZoKHQCPBZEQFgglMAA&url=http%3A%2F%2Fsiteresources.worldbank.org%2FECAEXT%2FResources%2F258598-1243892418318%2Fwestphal\\_summary\\_climate.pdf&usg=AFQjCNE3I4cJTVAELcL4NgrFOO6jYWsvAg&cad=rjt](https://www.google.ru/urlsa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjQxJWx_a3TAhWzbZoKHQCPBZEQFgglMAA&url=http%3A%2F%2Fsiteresources.worldbank.org%2FECAEXT%2FResources%2F258598-1243892418318%2Fwestphal_summary_climate.pdf&usg=AFQjCNE3I4cJTVAELcL4NgrFOO6jYWsvAg&cad=rjt).

189. <http://greenword.ru/2010/10/water.html>

190. <https://studfiles.net/preview/4258029/page:5/>

191. Водная инициатива Европейского Союза и Национального диалога по водной политике в Кыргызстане [Текст] / UNECE. Современные технологии орошения и возможность их применения в Кыргызстане. – Бишкек, 2015. – 69 с.

- 192.Каплинский, М.И. Водный баланс озера Иссык-Куль за многолетний период [Текст] / М.И.Каплинский, Л.С.Тимченко // Тр. Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института. Озера и водохранилища Средней Азии. –Выпуск 50 (131). –Ленинград: Гидрометеоиздат, 1977. – С. 87-101.
- 193.Полубаринова-Кочина, П.Я. Теория движения грунтовых вод [Текст] / П.Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
- 194.Шестаков, В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа [Текст] / В. М. Шестаков. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965. – 221 с.
- 195.Подземные воды Прииссыккуля и пути их рационального использования. – Фрунзе: Илим, 1988. –204 с.
- 196.Приоритетные направления адаптации к изменению климата в Кыргызской Республике до 2017 года [Текст]: Постановление Правительства Кыргызской Республики от 2 октября 2013 года № 549.
- 197.Костяков, А. Н. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод [Текст] / А. Н. Костяков, Н. Н. Фаварин, С. Ф. Аверьянов. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 451 с.
- 198.Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод [Текст] / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. –664 с.
- 199.Шестаков, В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа [Текст] / В. М. Шестаков. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1965. – 221 с.
- 200.Подземные воды Прииссыккуля и пути их рационального использования [Текст]. –Фрунзе: Илим, 1988. – 204 с.
- 201.Стрельцов, Е.А. Отчет о результатах комплексной геолого-гидро-геологической съемки масштаба 1:50000 Джеты-Огузском и Тонском районах [Текст] / Е.А. Стрельцов. –Бишкек: ТГФ, 1977. – 328 с.

202. Отчет лаб. Информационного обеспечения ИВПиГЭ НАН КР. Развитие геоинформационно-справочной системы Иссык-Кульской области по водоземельным и гидроэнергетическим ресурсам, разработка пилотных проектов по селам Жети-Огузского района: Кызыл-Суу, Сару[Текст]. –Бишкек, 2015.

203. Аналитическая записка. Современная ситуация в энергетике Кыргызской Республики [Текст] / НИСИ КР. –Бишкек, 2014. – С. 9-10.

### Приложение 1. Global Glacier Change Bulletin (2014-2017), No. 2, 3

[https://wgms.ch/downloads/WGMS\\_GGCB\\_02.pdf](https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_02.pdf)

[https://wgms.ch/downloads/WGMS\\_GGCB\\_03.pdf](https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_03.pdf)

GLACIER_NAME	WGMS_ID SYS FROM TO	AREA	BW	BS	BA	ELA	AAR	INVESTIGATORS_(SPONS_AGENCY)
KG KARA-BATKAK 813	STR 20139999 20140916	2.78	340	-1290	-950			Popovnin V., Satylkanov R., Ermenbayev B. (all: TshMRC)
KG KARA-BATKAK 813	STR 20140916 20150922	2.74	500	-1380	-880	4070	34	Popovnin V., Satylkanov R., Ermenbayev B. (all: TshMRC)
KG SARY TOR (NO.356) 805	STR 20149999 20150905	2.65	420	-1240	-820	>4800	0	Popovnin V., Satylkanov R., Ermenbayev B. (all: TshMRC)
KG BORDU 829	STR 20159999 20160830	4.96	490	-940	-	4400	17	Popovnin V. (MGU), Satylkanov R. (TshMRC), Ermenbayev B. (TshMRC)
KG BORDU 829	STR 20160830 20170905	4.91	240	-1580	-1480	4690	0	Popovnin V. (MGU), Satylkanov R. (TshMRC), Ermenbayev B. (TshMRC)
KG KARA-BATKAK 813	STR 20150922 20160929	2.5	550	-940	-390	4000	41	Popovnin V. (MGU), Satylkanov R. (TshMRC), Ermenbayev B. (TshMRC)
KG KARA-BATKAK 813	STR 20150905 20160830	2.46	560	-1680	-1120	4030	38	Popovnin V. (MGU), Satylkanov R. (TshMRC), Ermenbayev B. (TshMRC)
KG SARY TOR (NO.356) 805	STR 20150905 20160830	2.65	420	-1210	-790	>4800	0	Popovnin V. (MGU), Satylkanov R. (TshMRC), Ermenbayev B. (TshMRC)
KG SARY TOR (NO.356) 805	STR 20160830 20170904	2.64	180	-1660	-1340	>4760	0	Popovnin V. (MGU), Satylkanov R. (TshMRC), Ermenbayev B. (TshMRC)

### Приложение 2. Баланс массы ледника Кара-Баткак за период 1957-2018 гг. Реконструированные значения выделены отдельно.

<b>Балансовый год</b>	<b>Аккумуляция Ак, мм вод. экв.</b>	<b>Абляция Аб, мм вод. экв.</b>	<b>Баланс массы вп, мм вод. экв.</b>
<b>1956/57</b>	548	-579	<b>-31</b>
<b>1957/58</b>	728	-665	<b>63</b>
<b>1958/59</b>	737	-1081	<b>-344</b>
<b>1959/60</b>	666	-957	<b>-291</b>
<b>1960/61</b>	474	-1280	<b>-806</b>
<b>1961/62</b>	656	-742	<b>-86</b>
<b>1962/63</b>	666	-706	<b>-40</b>
<b>1963/64</b>	893	-749	<b>144</b>
<b>1964/65</b>	711	-752	<b>-41</b>
<b>1965/66</b>	879	-1035	<b>-156</b>
<b>1966/67</b>	796	-786	<b>10</b>
<b>1967/68</b>	613	-1265	<b>-652</b>
<b>1968/69</b>	665	-665	<b>0</b>
<b>1969/70</b>	619	-801	<b>-182</b>
<b>1970/71</b>	722	-574	<b>148</b>
<b>1971/72</b>	610	-557	<b>53</b>
<b>1972/73</b>	496	-1249	<b>-753</b>
<b>1973/74</b>	632	-683	<b>-51</b>
<b>1974/75</b>	505	-980	<b>-475</b>
<b>1975/76</b>	444	-1285	<b>-841</b>
<b>1976/77</b>	371	-1235	<b>-864</b>
<b>1977/78</b>	406	-1582	<b>-1176</b>
<b>1978/79</b>	573	-1074	<b>-501</b>
<b>1979/80</b>	670	-1034	<b>-364</b>
<b>1980/81</b>	577	-1024	<b>-447</b>
<b>1981/82</b>	323	-1107	<b>-784</b>
<b>1982/83</b>	211	-1159	<b>-948</b>
<b>1983/84</b>	235	-1807	<b>-1572</b>
<b>1984/85</b>	263	-1555	<b>-1292</b>
<b>1985/86</b>	663	-1055	<b>-392</b>
<b>1986/87</b>	432	-1114	<b>-682</b>
<b>1987/88</b>	791	-1247	<b>-456</b>
<b>1988/89</b>	691	-1087	<b>-390</b>
<b>1989/90</b>	730	-1508	<b>-778</b>
<b>1990/91</b>	–	–	<b>-398</b>
<b>1991/92</b>	–	–	<b>-352</b>
<b>1992/93</b>	–	–	<b>-185</b>

<b>1993/94</b>	–	–	<b>-505</b>
<b>1994/95</b>	–	–	<b>-515</b>
<b>1995/96</b>	585	-959	<b>-374</b>
<b>1996/97</b>	462	-1110	<b>-648</b>
<b>1997/98</b>	771	-1131	<b>-360</b>
<b>1998/99</b>	–	–	<b>-320</b>
<b>1999/00</b>	–	–	<b>-569</b>
<b>2000/01</b>	–	–	<b>-758</b>
<b>2001/02</b>	–	–	<b>-525</b>
<b>2002/03</b>	–	–	<b>-230</b>
<b>2003/04</b>	–	–	<b>-536</b>
<b>2004/05</b>	–	–	<b>-471</b>
<b>2005/06</b>	–	–	<b>-822</b>
<b>2006/07</b>	–	–	<b>-596</b>
<b>2007/08</b>	–	–	<b>-938</b>
<b>2008/09</b>	–	–	<b>-74</b>
<b>2009/10</b>	–	–	<b>-267</b>
<b>2010 /11</b>	–	–	<b>-728</b>
<b>2011/12</b>	–	–	<b>-561</b>
<b>2012/13</b>	–	–	<b>-566</b>
<b>2013/14</b>	340	-1290	<b>-950</b>
<b>2014/15</b>	500	-1380	<b>-880</b>
<b>2015/16</b>	550	-940	<b>-390</b>
<b>2016/17</b>	560	-1680	<b>-1120</b>
<b>2017/18</b>	460	-1270	<b>-810</b>

**Приложение 3.** Прибавка/убыль стока с ледника Кара-Баткак за период 2018-2100 гг. (при ежегодном увеличении темпы таяния ледника 13,4 мм вод.эquiv. за последний 47 лет).

Год	Площадь ледника Кара-Баткак, км <sup>2</sup>	Сток р.Кашка-Тор, тыс.м <sup>3</sup>	Изменение стока р.Кашка-Тор, тыс.м <sup>3</sup>	Величина изменения стока, %
2018	2,476	3133,1		
2019	2,462		3276,6	5
2020	2,448		3257,8	4
2021	2,434		3238,9	3
2022	2,419		3220,1	3

2023	2,405		3201,2	2
2024	2,391		3182,4	2
2025	2,377		3163,5	1
2026	2,363		3144,7	0
2027	2,349		3125,8	0
2028	2,334		3107,0	-1
2029	2,320		3088,1	-1
2030	2,306		3069,3	-2
2031	2,292		3050,4	-3
2032	2,278		3031,6	-3
2033	2,264		3012,8	-4
2034	2,250		2993,9	-4
2035	2,235		2975,1	-5
2036	2,221		2956,2	-6
2037	2,207		2937,4	-6
2038	2,193		2918,5	-7
2039	2,179		2899,7	-7
2040	2,165		2880,8	-8
2041	2,150		2862,0	-9
2042	2,136		2843,1	-9
2043	2,122		2824,3	-10
2044	2,108		2805,5	-10
2045	2,094		2786,6	-11
2046	2,080		2767,8	-12
2047	2,065		2748,9	-12
2048	2,051		2730,1	-13
2049	2,037		2711,2	-13
2050	2,023		2692,4	-14
2051	2,009		2673,5	-15
2052	1,995		2654,7	-15
2053	1,980		2635,8	-16
2054	1,966		2617,0	-16
2055	1,952		2598,2	-17
2056	1,938		2579,3	-18
2057	1,924		2560,5	-18
2058	1,910		2541,6	-19
2059	1,896		2522,8	-19
2060	1,881		2503,9	-20
2061	1,867		2485,1	-21
2062	1,853		2466,2	-21
2063	1,839		2447,4	-22
2064	1,825		2428,5	-22

2065	1,811		2409,7	-23
2066	1,796		2390,8	-24
2067	1,782		2372,0	-24
2068	1,768		2353,2	-25
2069	1,754		2334,3	-25
2070	1,740		2315,5	-26
2071	1,726		2296,6	-27
2072	1,711		2277,8	-27
2073	1,697		2258,9	-28
2074	1,683		2240,1	-29
2075	1,669		2221,2	-29
2076	1,655		2202,4	-30
2077	1,641		2183,5	-30
2078	1,626		2164,7	-31
2079	1,612		2145,9	-32
2080	1,598		2127,0	-32
2081	1,584		2108,2	-33
2082	1,570		2089,3	-33
2083	1,556		2070,5	-34
2084	1,542		2051,6	-35
2085	1,527		2032,8	-35
2086	1,513		2013,9	-36
2087	1,499		1995,1	-36
2088	1,485		1976,2	-37
2089	1,471		1957,4	-38
2090	1,457		1938,6	-38
2091	1,442		1919,7	-39
2092	1,428		1900,9	-39
2093	1,414		1882,0	-40
2094	1,400		1863,2	-41
2095	1,386		1844,3	-41
2096	1,372		1825,5	-42
2097	1,357		1806,6	-42
2098	1,343		1787,8	-43
2099	1,329		1768,9	-44
2100	1,315		1750,1	-44