

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА**

**Научно-исследовательский  
центр экологии и окружающей  
среды Центральной Азии  
(Душанбе)**

**Институт водных  
проблем, гидроэнергетики  
и экологии**

---

**М.С. САФАРОВ, А.Р. ФАЗЫЛОВ**

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И  
МОНИТОРИНГ СЕЛЕОПАСНЫХ РАЙОНОВ  
ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ТАДЖИКИСТАНА**

**Душанбе  
«Промэкспо»  
2023**

ББК 20.1+20.280+26.89(2тадж)+92Я2  
УДК 627.141.1+551.583:528.8(575.3)  
С-12

**Рекомендовано к изданию решением Издательского совета  
Национальной академии наук Таджикистана от 3 апреля 2023, №13**

**Сафаров Мустафо Сулаймонович, Фазылов Али Рахматджанович.**  
Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных районов горных территорий Таджикистана. - Душанбе: «Промэкспо», 2023. -192 с.

В монографии рассмотрены особенности исследования опасных природных явлений, в условиях изменения климата, с применением инновационных технологий мониторинга труднодоступных зон, в частности селеопасных районов горных территорий Таджикистана. Разработаны рекомендации по применению дистанционных методов зондирования, в том числе беспилотных летательных аппаратов.

Монография рекомендуется специалистам и работникам МЭиВР РТ, КЧС и ГО, КООС, АМИ при Правительстве РТ, НАНТ; научным и педагогическим работникам, студентам, магистрантам и докторантам, и может служить в качестве учебного пособия в ВУЗах, а также при подготовке и переподготовке специалистов соответствующего профиля. Она также полезна широкому кругу читателей.

#### **Рецензенты:**

**Медеу А.Р.** (Казахстан) - д-р геогр. наук, профессор, академик НАН РК, председатель правления АО «Институт географии и водной безопасности» Министерства науки и высшего образования РК.

**Волосухин В.А.** (Россия) - д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, эксперт РАН, действительный член (академик) РАЕН, член Селевой ассоциации РФ, директор Института безопасности гидротехнических сооружений.

**Саидов М.С.** (Таджикистан) - д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Таджикского национального университета.

ISBN 987-99985-57-81-9

© Сафаров М.С., Фазылов А.Р., 2023.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>Глава 1. ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.....</b>	<b>11</b>
1.1. Общие сведения о дистанционном зондировании земли....	12
1.2. Аэрокосмические системы дистанционного зондирования Земли.....	14
1.3. Основные технологии и методы получения снимков.....	16
1.4. Географические информационные системы.....	27
<b>Глава 2. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЕЛЕОПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ.....</b>	<b>32</b>
2.1. Область применения современных методов и технологий дистанционного зондирования и мониторинга селеопасных горных территорий.....	32
2.2. Беспилотные летательные аппараты. Классификация, типы и область применения.....	35
2.2.1. Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных горных территорий. Методология организации полётов БПЛА.....	41
<b>Глава 3. ОПАСНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В ТАДЖИКИСТАНЕ.....</b>	<b>45</b>
3.1. Общие сведения о водных ресурсах и природных условиях Таджикистана.....	45
3.1.1. Основные характеристики речных бассейнов Таджикистана.....	57
3.1.2. Гидрологические и климатические условия Таджикистана.....	60
3.2. Современное состояние опасных гидрологических явлений гидрометеорологического характера в Республике Таджикистан.....	65
3.3. Основные факторы селеформирования в Таджикистане. Классификация, типология и анализ селевой безопасности.....	75

3.3.1.	Селепроявления - стихийные бедствия в Таджикистане.....	84
3.4.	Организация и проведение полевых исследований (проведение мониторинговых работ) в условиях горных территорий.....	92
<b>Глава 4.</b>	<b>МОНИТОРИНГ СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ТАДЖИКИСТАНА.....</b>	<b>101</b>
4.1.	Технология организации аэрофотосъёмки объекта исследования для горных условий Таджикистана.....	101
4.2.	Мониторинг подверженных риску стихийных бедствий горных территорий с использованием беспилотных летательных аппаратов и спутников.....	105
4.2.1.	Сравнительные исследования метеорологических данных (осадки, температура) с применением современных операционных систем дистанционного зондирования земли.....	113
4.2.2.	Особенности мониторинга селеопасных территорий с применением ДЗЗ при отсутствии стационарных метеоданных.....	124
4.2.3.	Мониторинг селеопасных горных территорий Таджикистана.....	128
4.2.4.	Противоселевые мероприятия и сооружения.....	149
4.2.5.	Анализ и оценка полученных результатов натуральных исследований.....	151
<b>Глава 5.</b>	<b>РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ДЗЗ ДЛЯ УСЛОВИЙ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ТАДЖИКИСТАНА.....</b>	<b>155</b>
5.1.	Рекомендации по управлению беспилотником в различных условиях горно-предгорной зоны с опасными гидрологическими процессами.....	155
5.2.	Методика разработки карт высокого разрешения для горно-предгорных зон Таджикистана.....	159
5.3.	Экономическая эффективность применения методов и технологий ДЗЗ.....	162
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>164</b>
	<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>168</b>

**ПОСВЯЩАЕТСЯ:**  
*Международному десятилетию действий  
«Вода для устойчивого развития, 2018-2028 годы»,  
«2025 год - Международный год сохранения ледников»*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

В монографии излагаются результаты исследований водных объектов и опасных гидрологических процессов связанные с водой; методы их мониторинга в различных условиях горно-предгорной зоны Республики Таджикистан, с применением дистанционных методов зондирования; выявления и изучения факторов провоцирующие возникновения селепроявлений, селевых бассейнов, зон формирования и схода селевых потоков; определение границ пострадавших территорий, оценка ущерба и др.

Представлены результаты проведённых комплексных исследований, селеопасных зон в РТ, современными методами дистанционного зондирования и мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), адаптированные для условий горно-предгорных зон Таджикистана, позволившие получить высококачественные цифровые данные.

Реализация комплексных научных исследований позволили осуществить аэрофотосъёмки, с применением БПЛА, на высоте выше 6000 м н.у.м. и разработать рекомендации по управлению беспилотным летательным аппаратом в труднодоступных территориях горно-предгорной зоны, с возможными проявлениями опасных природных процессах.

Авторы выражают свою признательность руководству Национальной академии наук Таджикистана (НАНТ); руководству и сотрудникам: Научно-исследовательского центра экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе); Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ;

Государственного научного учреждения «Центр изучения ледников НАНТ»; научно-исследовательских учреждений НАНТ, КЧСиГО при Правительстве РТ, а также Синьцзянского института экологии и географии Китайской академии наук, за оказанное содействие и всемерную поддержку в процессе реализации целей и задач исследований, результаты которых, явились основой для подготовки настоящей монографии.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются технологии наблюдения объекта на поверхности земли наземными, авиационными и космическими средствами дистанционного зондирования, позволяют получить не только информацию о состоянии и параметрах объектов, но также обеспечить дополнительной информацией существующие наземные системы мониторинга окружающей среды.

Использование современных методов дистанционного зондирования в том числе беспилотных летательных аппаратов, позволяют осуществить мониторинг окружающей среды и водных ресурсов, независимо от их удалённости, дорожной доступности и сложных географических рельефов, а также, быстро и эффективно отслеживать природные и антропогенные процессы, выявлять источники загрязнений, планировать природоохранные мероприятия и проводить научные исследования.

Современный этап развития космических методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) начался в 1972 году с запуска искусственного спутника Landsat с установленной на его борту аппаратурой MSS (Multispectral Scanner System), которая позволяла вести съёмку в четырех спектральных диапазонах, ширина каждого из которых составляла около 100 нм. При этом каждый пиксел космического снимка соответствовал площадке размером 80 метров на поверхности Земли и т.д.

Таджикистан является наиболее уязвимой к климатическим изменениям страной в Центрально-Азиатском регионе. Ежегодно в стране происходят многочисленные стихийные бедствия - сход лавин, землетрясения, оползни, а также опасные гидрологические процессы, в том числе сели, приводящие к серьёзным ущербам и, к сожалению, не редко сопровождающиеся человеческими жертвами. Минимизация вероятного ущерба может быть достигнута за счёт постоянного мониторинга и создания системы прогнозирования возможных проявлений стихийных бедствий,

позволяющие исследовать и выявить условия формирования и распространения явлений, а также связанные с ними катастрофы.

В Программе Третьей Всемирной конференции по снижению риска бедствий на 2015-2030 гг. были обозначены четыре приоритета действий, в условиях изменения климата (март, 2015, г. Сендай, Япония): понимание риска бедствий; усиление управления риском; инвестирование в снижение риска бедствий; повышение готовности к бедствиям (Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг.).

Национальная стратегия Республики Таджикистан по снижению риска стихийных бедствий подразумевает реализацию четырех ключевых задач: снизить к 2030 году количество погибших, пострадавших и объем ущерба в результате стихийных бедствий, по сравнению с периодом 2005-2015 годов; обеспечить доступ всех заинтересованных сторон к информации о риске стихийных бедствий; интегрировать меры по управлению риском стихийных бедствий в процессе развития; совершенствовать механизмы готовности и реагирования на бедствия (Источник: <https://khf.tj/sites/default/files/pdf/Nat-sionalnaya-Strategiya.pdf>).

Оценка риска стихийных бедствий и выполнение задач по предотвращению и управлению стихийными бедствиями, при мониторинге и картировании может быть достигнута с применением современных геоинформационных технологий. В частности, использование фотограмметрии и дистанционного зондирования являются наиболее эффективными в условиях горно-предгорной зоны Республики Таджикистан.

Таким образом, управление рисками стихийных бедствий, в том числе опасных гидрологических процессов, в условиях изменения климата, с использованием методов дистанционного мониторинга и ГИС-технологий способствующие возможному прогнозированию, предотвращению, смягчению последствий и исключения человеческих жертв является актуальной задачей.

Вопросы исследования селевых явлений изучались в работах С. Ашурова, В.П. Благовещенского, Ю.Б. Виноградова, В.А. Волосухина, М.С. Гагошидзе, С.А. Ерохина, В.В. Загинаева, Б.Д.

Зайкова, Э.В. Запорожченко, Х.А. Исмагилова, А. Р. Медеу, В. Ф Перова, С.Г. Рустамова, Д.Л. Соколовского, Б.С. Степанова, Е.А. Таланова, А.Р. Фазылова, С.М. Флейшмана, Г.И. Херхеулидзе, С.С. Черноморца, А.А. Яблокова, М.Р. Якутилова, Р.К. Яфязовой и др. В частности, в работах С. М. Флейшмана и В. Ф Перова значительное внимание уделено применению аэрофотосъёмки для мониторинга. Информации об исследованиях с применением аэрофотосъёмки, в особенности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при мониторинге и исследований селевых бассейнов в Таджикистане малы или отсутствуют.

Данная книга посвящена освещению результатов комплексных исследований селевых явлений и перспектив применения методов и технологий дистанционного зондирования и мониторинга поверхности Земли при помощи спутников и БПЛА, позволяющих получать актуальную информацию в условиях изменений климата. Проанализирована эффективность использования различных типов ДЗЗ, а также методов их применения для мониторинга и сбора данных селеопасных, труднодоступных горно-предгорных районов Таджикистана.

В ней изложены результаты исследований, полученные (в соавторстве) при реализации совместного проекта «Исследование по снижению риска и раннему предупреждению стихийных бедствий на территории Таджикистана» и «Мониторинг озера Сарез», научных учреждений Национальной академии наук Таджикистана (НАНТ) и Китайской академии наук (КАН), а также научно-исследовательских проектов «Временные и пространственные изменения ледников/ледниковых озёр Таджикистана и оценка их экологического риска», реализующийся Научно-исследовательским центром экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), а также Государственным научным учреждением «Центр изучения ледников НАНТ» и Институтом исследования Тибетского плато КАН; научно-исследовательской работы «Проблемы формирования и регулирования твёрдого стока на водных объектах Таджикистана и пути их разрешения», (2020-2024гг)

выполняемая в Институте водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ; проекта «Раннее предупреждение риска стихийных бедствий и использование беспилотных летательных аппаратов в Таджикистане», выполняемые Научно-исследовательским центром экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Институтом геологии, сейсмостойкости и сейсмологии НАНТ, Комитетом по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне при Правительстве Республики Таджикистан и Синьцзянским институтом экологии и географии КАН.

## Глава 1. ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В настоящее время для наблюдения Земли и наземных объектов с воздуха, и космоса используют спутники, самолеты, вертолеты, БПЛА и другие воздушные и космические аппараты благодаря которым появляется возможность провести исследование изучаемых объектов и получать информацию о них вне зависимости от расстояния и труднопроходимости района исследования.

Дистанционное зондирование можно определить, как метод измерения свойств объектов на земной поверхности, в котором используются данные, полученные с помощью воздушных летательных аппаратов и искусственных спутников Земли (ИСЗ). Из этого определения видно, что суть метода заключается в том, чтобы вместо проведения измерений по месту расположения объекта попытаться измерить его характеристики на расстоянии [1].

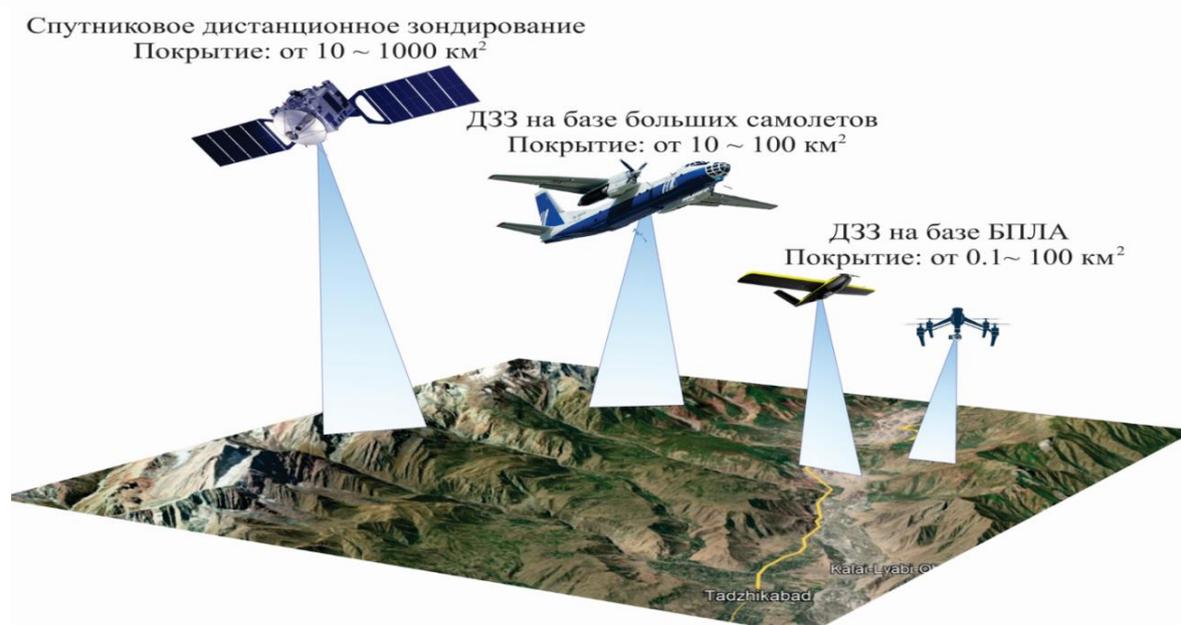
ДЗЗ способствует получению информации о поверхности Земли и объектах на ней, атмосфере, океане, верхнем слое земной коры бесконтактными методами, при которых регистрирующий прибор удален от объекта исследований на значительное расстояние. Общей физической основой дистанционного зондирования является функциональная зависимость между зарегистрированными параметрами собственного или отраженного излучения объекта и его биогеофизическими характеристиками, и пространственным положением. Суть метода заключается в интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удаленной от него точке пространства [2].

В современном понимании, термин «ДЗЗ» в основном относится к технологиям воздушного или космического зондирования местности с целью обнаружения, классификации и анализа объектов земной поверхности, а также атмосферы и океана, при помощи распространяемых сигналов (например, электромагнитной радиации). Дистанционное зондирование

предоставляет возможность получать данные об опасных, труднодоступных и быстро движущихся объектах, а также позволяет проводить наблюдения на обширных участках местности. Примерами применения дистанционного зондирования может быть мониторинг вырубки лесов (например, в бассейне Амазонки), состояния ледников в Арктике и Антарктике, измерение глубины океана с помощью лота. Дистанционное зондирование также приходит на замену дорогостоящим и сравнительно медленным методам сбора информации с поверхности Земли, одновременно гарантируя невмешательство человека в природные процессы на наблюдаемых территориях или объектах [3].

### 1.1. Общие сведения о дистанционном зондировании земли

В настоящее время ДДЗ включает в себя многообразие современных методов получения данных и изображений, начиная снимками с геостационарных спутников, охватывающих практически всю землю и заканчивая аэросъемками с использованием БПЛА небольших участков в несколько сотен квадратных метров (рисунок 1.1).



**Рисунок 1.1 - Наблюдения Земли и наземных объектов с использованием дистанционного зондирования**

Дистанционное зондирование Земли из космоса, энергично развивавшееся с начала 1960-х гг., в последние годы значительно расширило свои возможности и области применения за счет использования геоинформационных систем и технологий. Данные полученные посредством ДЗЗ, используются при создании и обновлении топографических карт, разработке природоохранных мероприятий, планировании работ в сельском, лесном, водном хозяйстве, горнодобывающих отраслях, изысканиях при разнообразном строительстве, мониторинге опасных природных явлений и техногенных чрезвычайных ситуаций. Фундаментальные и прикладные исследования в науках о Земле все шире опираются на материалы Дистанционное зондирование из космоса [4].

Для удовлетворения нужд различных категорий специалистов было разработано множество систем ДЗ, с помощью которых изучают пространственные, спектральные и временные параметры самых разнообразных объектов. Каждая из этих систем ориентирована на определенный круг задач и имеет свои особенности. Так, например, в метеорологии используется частая съемка территории с относительно низким пространственным разрешением. В картографии, наоборот, основным требованием является максимальное пространственное разрешение, а периодичность съемки может быть относительно низкой. В ряде задач, например, в военной разведке, возникает необходимость обеспечить не только высокое пространственное разрешение и высокую повторяемость съемки, но и очень быструю передачу данных наземным службам. Правильно откалиброванные данные ДЗЗ можно использовать также для проверки глобальных климатических моделей, предназначенных для моделирования и прогноза развития природной среды. Интересно, что в этом случае высокое пространственное разрешение является нежелательным из-за вычислительных ограничений, а наиболее важными требованиями становятся точность и постоянство калибровки датчиков во времени и пространстве [1].

Получение данных через определенные промежутки времени, высокая скорость получения и передачи изображений, а также возможность проведения комплексного анализа и оценки

динамики развития явлений на основе оперативного картографирования, как и с помощью спутниковых систем, как и с использованием БПЛА обеспечивающие большую обзорность и детализации, делают дистанционные методы зондирования земли одним из перспективных и актуальных направлений в научно-практических исследованиях поверхности Земли. Далее мы рассмотрим аэрокосмические системы ДЗЗ и обобщенные процессы, связанные с ними.

## **1.2. Аэрокосмические системы дистанционного зондирования Земли**

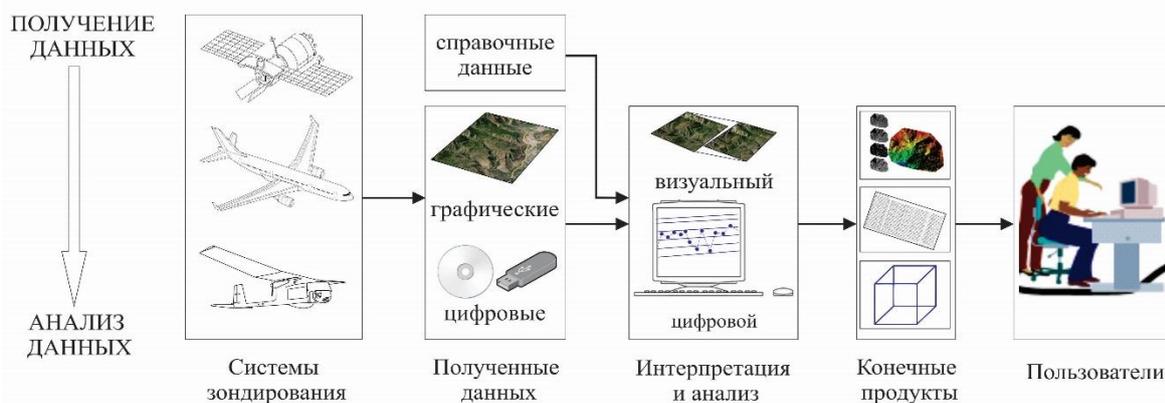
В середине XX в., когда такие новшества, как компьютеры, космические аппараты, радиоэлектронные съемочные системы, совершили революционные преобразования в традиционных аэрофотометодах зародилось аэрокосмическое зондирование. Космические снимки предоставили геоинформацию для решения проблем регионального и глобального уровней. Космические снимки, оперативно размещаемые в Интернете, становятся наиболее востребованной информацией о местности как для специалистов-профессионалов, так и для широких слоев населения. Разрешение и метрические свойства космических снимков открытого доступа быстро повышаются. Получают распространение орбитальные снимки сверхвысокого разрешения - метрового и даже дециметрового, которые успешно конкурируют с аэроснимками. Развитие всепогодной радиолокации превращает ее в прогрессивный метод получения метрически точной пространственной геоинформации, который начинает эффективно комплексироваться с оптическими технологиями аэрокосмического зондирования [5].

Быстро формируется рынок разнообразной продукции аэрокосмического зондирования Земли. Неуклонно увеличивается число коммерческих космических аппаратов, функционирующих на орбитах, особенно зарубежных. Наибольшее применение находят снимки, получаемые ресурсными спутниковыми системами Landsat (США), SPOT (Франция), IRS (Индия), картографическими

спутниками ALOS (Япония), Cartosat (Индия), спутниками сверхвысокого разрешения Ikonos, QuickBird, GeoEye (США), в том числе радиолокационными TerraSAR-X и TanDEM-X (Германия), выполняющими тандемную интерферометрическую съемку. Успешно эксплуатируется система спутников космического мониторинга RapidEye (Германия) [2].

Основными показателями снимков являются охват и пространственное разрешение. Но, к сожалению, обычно, чем больше охват получаемых снимков, тем ниже их разрешение. Поэтому приходится идти на компромиссные решения и выполнять одновременно съемку несколькими системами с различными параметрами. В зависимости от цели исследования выбираются определенный инструмент. Например, для крупномасштабных исследований актуальными считаются использование космические систем, которые позволяют охватить большие площади. Данные можно получить посредством интернета бесплатно. Для получения детальных снимков по конкретному району в настоящее время активно применяются самолеты, вертолеты и БПЛА.

На рисунке 1.2 показаны обобщенные процессы, связанные с аэрокосмическим дистанционным зондированием земли.



**Рисунок 1.2 - Процесс аэрокосмического дистанционного зондирования земли**

Процесс выполнения аэрокосмических исследований включает в себя получение и проверку данных с использованием различных систем зондирования, интерпретация для анализа графических и цифровых данных, а также изучение справочных данных об изучаемых объектах (материалы, карты, статистика или данные о

ранее проведенных полевых исследованиях). Далее информация компилируется, как правило, в виде карт, таблиц или цифровых пространственных данных, которые могут быть объединены с другими информациями в географической информационной системе (ГИС) где в конечном итоге информация предоставляется пользователям, которые применяют ее в процессе исследований и принятия решений. Ниже мы рассмотрим основные технологии и методы получения снимков.

### **1.3. Основные технологии и методы получения снимков**

В настоящее время используют различные технологии и получают снимки разных типов при съемке в разных спектральных диапазонах: *фотографические, сканерные, радарные, тепловые, спектрометрические.*

**Фотографические снимки** - это результат покадровой регистрации на фотопленку солнечного излучения, отраженного земными объектами. Космические снимки (КС) получают со спутников, космических кораблей и орбитальных станций, аэрофотоснимки получают с самолетов и вертолетов, БПЛА, подводные - фотокамерами, опускаемыми на глубину, а наземные – с помощью фототеодолитов. Отличительной чертой КС является высокая степень обзорности, охват одним снимком больших площадей поверхности. В зависимости от типа применяемой аппаратуры и фотопленок, фотографирование может производиться во всем видимом диапазоне электромагнитного спектра, в отдельных его зонах, а также в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. Трансформированные космические снимки используются для составления космофотосхем и космофотокарт и обычно легко привязываются к географической сетке координат. Космические снимки отличаются хорошими геометрическими свойствами и высоким качеством изображения [6].

Двумя основными параметрами, от которых зависит масштаб съёмки это высота фотографирования и фокусное расстояние аппарата. Космические аппараты позволяют получать плановые и

перспективные снимки земной поверхности в зависимости от наклона оптической оси.

В настоящее время используется фотоаппаратура с высоким разрешением, позволяющая получать космоснимки с перекрытием 60% и более. Спектральный диапазон фотографирования охватывает видимую часть ближней инфракрасной зоны (до 0,86 мкм). Известные недостатки фотографического метода связаны с необходимостью возвращения пленки на Землю и ограниченным ее запасом на борту. Однако фотографическая съемка - в настоящее время самый информативный вид съемки из космического пространства. Оптимальный размер отпечатка 18x18 см, который, как показывает опыт, согласуется с физиологией человеческого зрения, позволяя видеть все изображение одновременно [7].

**Сканерные съемки.** В настоящее время для съемок из космоса наиболее часто используются многоспектральные оптико-механические системы - сканеры, установленные на ИСЗ различного назначения. При помощи сканеров формируются изображения, состоящие из множества отдельных, последовательно получаемых элементов. Термин «сканирование» обозначает развертку изображения при помощи сканирующего элемента (качающегося или вращающегося зеркала), поэлементно просматривающего местность поперек движения носителя и посылающего лучистый поток в объектив и далее на точечный датчик, преобразующий световой сигнал в электрический. Этот электрический сигнал поступает на приемные станции по каналам связи. Изображение местности получают непрерывно на ленте, составленной из полос - сканов, сложенных отдельными элементами - пикселями. Сканерные изображения можно получить во всех спектральных диапазонах, но особенно эффективным является видимый и ИК-диапазоны [3].

При сканерной съемке изображение передается в виде матрицы простейших элементов - пикселей, значения каждого из которых представляется координатами пространства (x, y), длиной волны и временем. Снимки отображаются двоичными элементами с использованием 8-битной шкалы оттенков серого или 24-битной

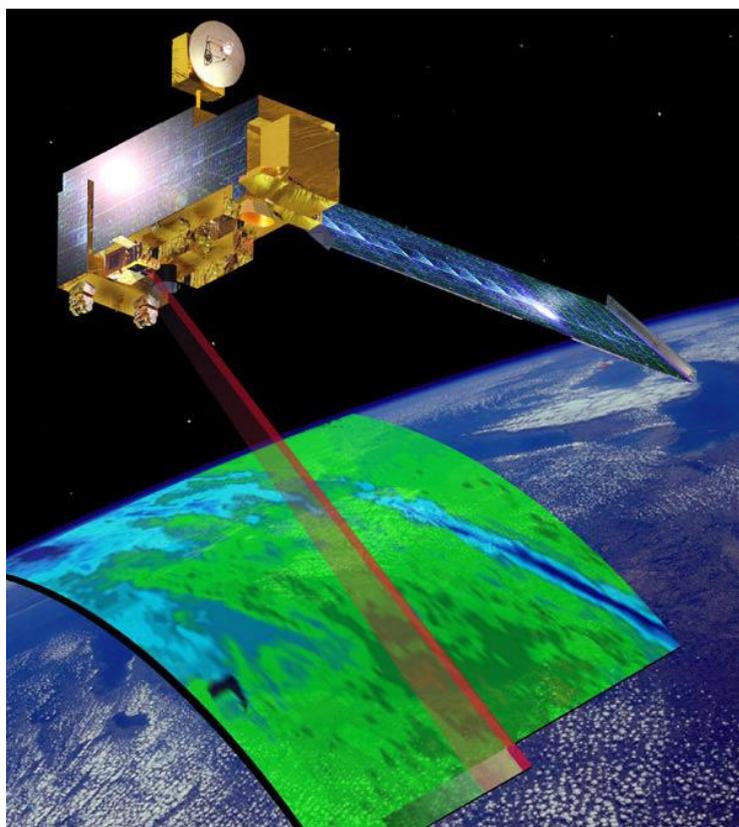
цветных снимков, получаемых смешением цветов R, G, B. Каждый пиксель отображается 256 элементами яркости и тремя векторами RGB. Процедура обработки снимков включает различные виды коррекции и последующего улучшения качества, включающего спектральное преобразование с целью улучшения контрастности. Дальнейшая обработка цифровых снимков связана с дешифрированием изображений. Процедура обработки снимков включает различные виды коррекции и последующего улучшения качества, включающего спектральное преобразование с целью улучшения контрастности. Дальнейшая обработка цифровых снимков связана с дешифрированием изображений [8-10].

Важнейшими характеристиками сканера являются угол сканирования (обзора) и мгновенный угол зрения, от величины которого зависят ширина снимаемой полосы и разрешение. В зависимости от величины этих углов сканеры делят на точные и обзорные. У точных сканеров угол сканирования уменьшают до  $\pm 5^\circ$ , а у обзорных увеличивают до  $\pm 50^\circ$ . Величина разрешения при этом обратно пропорциональна ширине снимаемой полосы. Хорошо зарекомендовал себя сканер нового поколения, названный «тематическим картографом», которым были оснащены американские ИСЗ Landsat 5, Landsat 7 [3].

Начиная с ноября 2012 года начал работать спутник Landsat 8, на котором установлены 2 инструмента: *Operational Land Imager (OLI)* – оперативный картограф Земли и *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* - Тепловой ИК-сенсор. Спектральные зоны сенсора OLI довольно близки к сенсору ETM+ (Landsat 7). Кроме ранее существовавших, добавлены 2 новые зоны: *Глубокий синий (канал 1)*, разработанный для исследования водных ресурсов и прибрежной зоны и *инфракрасный канал, лежащий на границе диапазонов NIR и SWIR (канал 9)* для исследования перистых облаков. Также добавлен канал обеспечения качества (*Quality Assurance*), содержащий сведения о присутствии таких объектов как облака, вода и снег. Инструмент TIRS (каналы 10 и 11) покрывает с разделением на два канала диапазон, соответствующий тепловому каналу 6 сенсора ETM. Для повышения качества материалов была увеличена разрядность данных с 8 до 12 бит на

пиксель. Всё это привело к увеличению объёма одной сцены с 200 до 800 Мб [11].

Сканер типа «тематический картограф» работает в семи диапазонах с разрешением 30 м в видимом диапазоне спектра и 120 м в ИК-диапазоне, дающий большой поток информации, обработка которой требует большего времени, приводящий к замедлению скорости передачи изображения (число пикселей на снимках достигает более 36 млн. на каждом из каналов). Сканирующие устройства могут быть использованы не только для получения изображений Земли, но и для измерения радиации - сканирующие радиометры, и излучения - сканирующие спектрометры [3]. На рисунке 1.3 представлена концепция сканирования MODIS (на спутнике Aqua).



**Рисунок 1.3 - Концепция сканирования MODIS (на спутнике Aqua) [12-13]**

*Радарная съёмка* - одна из видов аэрокосмической съёмки, осуществляемой радиолокатором - активным микроволновым датчиком, способным излучать и принимать отражённые от земной поверхности поляризованные радиоволны в определённом

диапазоне длин волн. Используется в условиях, когда непосредственное наблюдение поверхности планет затруднено различными природными условиями: плотной облачностью, туманом и т.п. Она может проводиться в темное время суток, поскольку является активной. Для радарной съемки обычно используются радиолокаторы бокового обзора (ЛБО), установленные на самолетах и ИСЗ. С помощью ЛБО радиолокационная съемка осуществляется в радиодиапазоне электромагнитного спектра. Сущность съемки заключается в посылке радиосигнала, отражающегося по нормали от изучаемого объекта и фиксируемого на приемнике, установленном на борту носителя. Радиосигнал вырабатывается специальным генератором. Время возвращения его в приемник зависит от расстояния до изучаемого объекта. Этот принцип работы радиолокатора, фиксирующего различное время прохождения зондирующего импульса до объекта и обратно, используется для получения РЛ-снимков [3].

Входными данными для обработки в специализированных программных комплексах являются интерферометрическая пара радарных снимков. Ограничением для возможности интерферометрической обработки пары радарных снимков являются пространственная и временная базы [14-15].

Радиолокационная съемка широко применяется в решении прикладных задач: обновлении существующих топографических карт, проведении всепогодного мониторинга различного характера, наблюдении за смещением поверхности земли. При должной комплексной обработке материалы радиолокационной съемки на сегодняшний день могут являться наиболее целесообразным и экономически выгодным решением для создания цифровых моделей местности и рельефа [16].

При дешифрировании радарных снимков следует учитывать тон изображения и его текстуру. Тоновые неоднородности РЛ-снимка зависят от литологических особенностей пород, размера их зернистости, устойчивости процессам выветривания. Тоновые неоднородности могут варьировать от черного до светлого цвета. Опыт работы с РЛ-снимками показал, что черный тон

соответствует гладким поверхностям, где, как правило, происходит почти полное отражение посланного радиосигнала. Крупные реки всегда имеют черный тон. Текстурные неоднородности РЛ-снимков зависят от степени расчлененности рельефа и могут быть тонкосетчатыми, полосчатыми, массивными и др. Полосчатая текстура РЛ-изображения, например, характерна для горных районов, сложенных часто чередующимися слоями осадочных или метаморфических пород, массивная - для районов развития интрузивных образований. Особенно хорошо получается на РЛ-снимках гидросеть. Она дешифрируется лучше, чем на фотоснимках. Высокое разрешение РЛ-съемки в районах, покрытых густой растительностью, открывает широкие перспективы ее использования [17].

Радарные системы бокового обзора с конца 70-х годов стали устанавливаться на искусственных спутниках Земли (ИСЗ). Первый радиолокатор был установлен на американском спутнике "Сисат", предназначенном для изучения динамики океанических процессов. Позднее был сконструирован радар, испытанный во время полетов космического корабля "Шатл". Информация, полученная с помощью этого радара, представляется в виде черно-белых и ложноцветных синтезированных фото-телеизображений или записей на магнитную ленту. Разрешающая способность 40 м. Информация поддается числовой и аналоговой обработке, такой же, что и сканерные снимки системы "Landsat". Это в значительной мере способствует получению высоких результатов дешифрирования. Во многих случаях РЛ снимки оказываются геологически более информативными, чем снимки "Лэндсат". Наилучший результат достигается и при комплексном дешифрировании материалов того и другого видов. РЛ снимки успешно используются для изучения трудно- или недоступных территорий Земли, пустынь и областей, расположенных в высоких широтах, а также поверхность других планет [18].

В отличие от оптических датчиков, которые улавливают только отраженную энергию и поэтому нуждаются в солнечном излучении, радар излучает собственное излучение, которое может проходить сквозь облака. Эта энергия, как правило, в

микроволновом диапазоне электромагнитного спектра, попадает на Землю и возвращается к ее датчику даже ночью или в облачных условиях (рисунок 1.4).

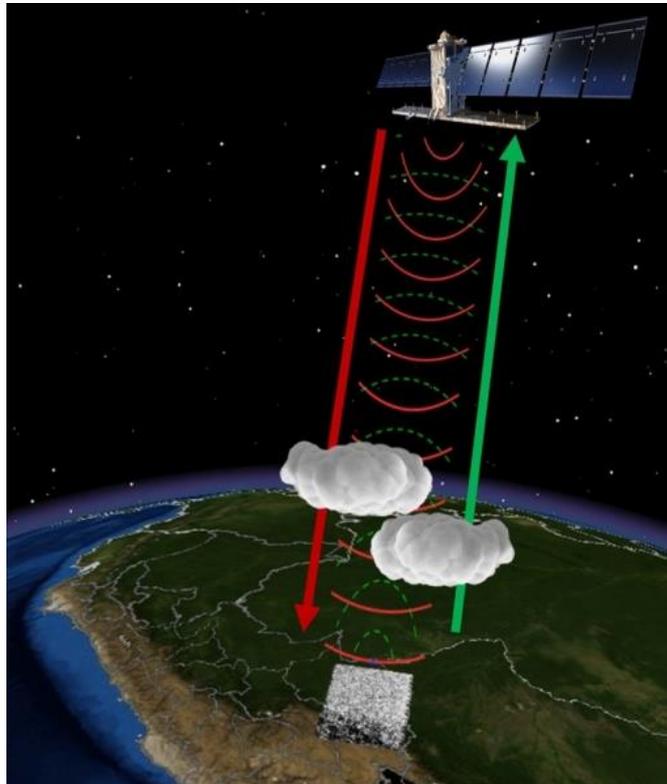


Рисунок 1.4 - Особенности радарной съёмки

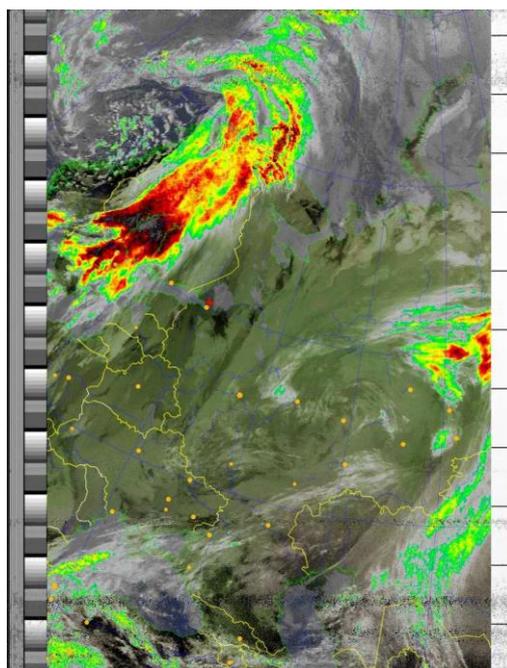
Радиолокационный датчик обнаруживает, измеряет и измеряет время обратно рассеянного микроволнового излучения. Время, необходимое для того, чтобы излучение дошло до объекта и вернулось обратно к датчику, определяет расстояние объекта от датчика. Радар не может видеть цвет, но эта разница во времени позволяет ему определять структуру и шероховатость поверхности объектов, таких как здания или деревья разной высоты, ширины и плотности. Этот процесс повторяется для всех объектов по мере прохождения спутника, что позволяет ему создавать двухмерное изображение поверхности под ним Радар возвращается к дистанционному зондированию благодаря бесплатным глобальным изображениям в режиме, близком к реальному времени [19].

**Тепловые съемки.** Инфракрасная (ИК), или тепловая, съемка основана на выявлении тепловых аномалий путем фиксации

теплового излучения объектов Земли [1], обусловленного эндогенным теплом или солнечным излучением. Она широко применяется в геологии. Температурные неоднородности поверхности Земли возникают в результате неодинакового нагрева различных ее участков. Инфракрасный диапазон спектра электромагнитных колебаний условно делится на три части (в мкм): • ближний (0,74-1,35), • средний (1,35-3,50) • дальний (3,50-1000) [2, 20].

Первые изображения Земли из космоса в тепловом инфракрасном диапазоне были получены с американского метеорологического спутника TIROS-1. Спутник запускался в интересах Национального аэрокосмического агентства (NASA) и Министерства обороны США. Несмотря на то, что данные, полученные сенсорами спутников TIROS-1 и 2, характеризовались низким пространственным разрешением, была впервые показана возможность использования данных теплового дистанционного зондирования для решения целого ряда метеорологических задач. С 1962 года осуществляются запуски спутников серии «Космос», которые составили существенную часть советской программы космических исследований. Очень важную роль спутники «Космос» сыграли в совершенствовании службы погоды: на базе метеоспутников «Космос-144» и «Космос-156» в 1967 году была создана экспериментальная метеорологическая система «Метеор» [21].

Со временем космические технологии получения спутниковых данных в тепловом диапазоне совершенствовались как в отношении пространственного разрешения, так и температурного. Например, снимки, получаемые радиометрами со спутника NOAA (в начале 70-х годов, характеризовались пространственным разрешением 6 км при температурном разрешении 1°C; затем сканирующая система AVHRR спутника NOAA позволила получать тепловые инфракрасные снимки с пространственным разрешением 1,1 км и температурным 0,1 - 0,2 °C [22]. На рисунке 1.5 представлен прием данных со спутника NOAA.



**Рисунок 1.5 - Прием данных со спутника NOAA [23]**

Совершенствование технологии получения тепловых изображений привело к разработке радиометров, позволяющих регистрировать тепловое излучение Земли не в одном канале, а в нескольких узких спектральных каналах в диапазоне от 8 до 14 мкм. Использование нескольких спектральных каналов теплового инфракрасного диапазона обеспечивает развитие различных направлений исследования Земли и планет, например, определение температуры поверхности суши и океана, распознавание геологических структур и типов горных пород на основе тепловой инфракрасной спектрометрии. Геостационарные и полярноорбитальные метеорологические спутники получают снимки с пространственным разрешением 1000 м в надире. Это разрешение является достаточным для исследования теплового баланса Земли, формирования изображений глобального распределения температур на поверхности суши и океана. Интервалы получения изображений составляют от 15 — 30 мин. (Meteosat-9 и Meteosat-8 соответственно) до нескольких часов [22]. MSG-1 (Meteosat-8) был запущен в 2002 году, а MSG-2 (Meteosat-9) - в 2005 году. Сведения о космических системах дистанционного зондирования Земли в тепловом диапазоне, начиная с самых первых представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Космические системы дистанционного зондирования Земли в тепловом диапазоне [22]

Название системы	Космический аппарат	Страна	Время действия, годы	Тепловые диапазоны, мкм	Пространственное разрешение, м
<i>TIROS 1-10</i>	<i>TIROS</i>	США	1960 - 1965	тепловой ИК	8000; 1000
<i>Метеор</i>	<i>Метеор</i>	СССР, РФ	1967 - 2002	тепловой ИК	17000; 1000 - 2000
<i>AVHRR</i>	<i>NOAA</i>	США	с 1970 по н.в.	3,55 - 3,93; 10,3 - 11,3 11,5 - 12,5	6000 1100
<i>GOES</i>	<i>GOES</i>	США	с 1975 по н.в.	10,2 - 11,2; 11,5 - 12,5	2000
<i>Meteosat</i>	<i>Meteosat</i>	Европа	1977 - 1997	тепловой ИК	2500 - 5000
<i>SeaSAT</i>	<i>SeaSAT</i>	США	1978	тепловой ИК	7000
<i>CZCS</i>	<i>Nimbus-7</i>	США	1978 - 1978	10,5 - 12,5	800
<i>HCMM</i>	<i>HCMM</i>	США	1978 - 1980	10,5 - 12,5	500 - 600
<i>MSS</i>	<i>Landsat-3</i>	США	1978 - 1983	10,4 - 12,5	240
<i>TM</i>	<i>Landsat-5</i>	США	1984 - 2011	10,4 - 12,5	120
<i>ATSR</i>	<i>ERS-1</i>	Европа	1991 - 2000	3,7; 12	1100
<i>МСУ-СК</i>	<i>Ресурс-О1</i>	Россия	1994 - 2001	3,5 - 4,1; 10,6 - 12,6	600
<i>ATSR</i>	<i>ERS-2</i>	Европа	с 1995 по н.в.	3,7; 12	1100
<i>OCTS</i>	<i>ADEOS-I</i>	Япония	1996 - 1997	3,35 - 3,88; 8,25 - 8,80 10,3 - 11,4; 11,4 - 12,7	700
<i>ASTER</i>	<i>Terra</i>	США	с 1999 по н.в.	8,125 - 8,475; 8,475 - 8,825 8,925 - 9,275; 10,25 - 10,95 10,950 - 11,650	90
<i>MODIS</i>	<i>Terra, Aqua</i>	США	с 1999 по н.в.	16 каналов в диапазоне 3,660 — 14,385	1000
<i>ETM+</i>	<i>Landsat-7</i>	США	с 1999 по н.в.*	10,4 - 12,5	60
<i>TIRS</i>	<i>Landsat-8</i>	США	с февраля 2013 по н.в.	10,6 - 11,2; 11,5 - 12,5	100
<i>GLI</i>	<i>ADEOS-II</i>	Япония	2002 - 2003	6 каналов в диапазоне 3 — 13	1000
<i>MTI</i>	<i>MTI</i>	США	март - ноябрь 2000	8,0-8,4, 8,4 - 8,8; 10,2 - 10,7	20
<i>МСУ-МР</i>	<i>Метеор-М №1</i>	Россия	с 2009 по н.в.	3,5 - 4,1; 10,5-11,5 11,5 - 12,5	1000

\* после аварии на спутнике в мае 2003 г. снимки поступают в режиме выключенного корректора линий сканирования (*Scan Line Corrector — Off*).

В географических исследованиях, в настоящее время, наилучшее пространственное разрешение тепловых инфракрасных снимков (60 м) даёт система ЕТМ+. Семейство спутников Landsat уже многие годы является ценным источником данных дистанционного зондирования для географических исследований среднего масштаба. Система ЕТМ+ получает изображения в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах, а также панхроматические снимки высокого разрешения, что даёт возможность комбинировать данные дистанционного зондирования различных типов в географических исследованиях для получения наилучших результатов. Современные спутниковые съёмочные системы получают тепловые снимки совместно с данными в других зонах спектра, что позволяет использовать их, объединяя достоинства разных типов данных [22].

**Спектрометрическая (СМ) съёмка** проводится с целью измерения отражательной способности горных пород. Знание значений коэффициента спектральной яркости горных пород расширяет возможности реологического дешифрирования, придает ему большую достоверность. Горные породы имеют различную отражательную способность, поэтому отличаются величиной коэффициента спектральной яркости. СМ-съёмка делится на [7]:

- микроволновая (0,3 см-1,0 м), являющаяся универсальной, так как исключает влияние атмосферы;
- ИК или тепловая (0,30 – 1000 мкм), выявляющая температурные неоднородности по энергетической яркости изучаемых объектов;
- спектрометрия видимого и ближнего ИК-спектра излучения (0,30 - 1,40 мкм), фиксирующая спектральное распределение отражательного радиационного излучения.

Дистанционное спектрометрирование Земли позволяет измерять спектральный состав излучения, отраженного природными объектами в диапазоне электромагнитного спектра 0,4–2,5 мкм. Отраженное земной поверхностью излучение проходит в спектрометрах через собирающую оптическую систему и разделяется специальным устройством на спектральные составляющие. Их амплитуды измеряются и регистрируются [24].

Таким образом различные технологии получения снимков с использованием методов ДЗЗ совместно с подключением ГИС технологии в настоящее время позволяют решать многие задачи, в том числе обновления и поддержания в актуальном состоянии практически всего масштабного ряда картографических данных. Ниже мы более подробно рассмотрим географические информационные системы (ГИС).

#### **1.4. Географические информационные системы**

В конце XX века появился новый тип информационных систем – геоинформационные системы (ГИС), а с середины 90–х годов ГИС приобрели уже статус серьезного стратегического резерва в экономике тех стран, которые вступили в период становления информационного общества.

ГИС-технология объединяет традиционные операции при работе с базами данных, такими, как запрос и статистический анализ, с преимуществами полноценной визуализации и географического (пространственного) анализа, которые предоставляет карта. Эти особенности отличают ГИС от других информационных систем и обеспечивают уникальные возможности их применения в широком спектре задач, связанных с анализом и прогнозом явлений и событий окружающего мира, с осмыслением и выделением главных факторов и причин, а также их возможных последствий, с планированием стратегических решений и текущих последствий предпринимаемых действий. ГИС – это инструментарий, с помощью которого можно решить такие задачи, для которых до этого не существовало готовых законченных решений [25].

Развитие программных обеспечений, а также увеличение мощности современных компьютеров позволили наряду с традиционными подходами к различным видам планирования работ и исследований применять ГИС технологии. ГИС технологии позволяют обрабатывать пространственные компоненты картографических данных и непространственные компоненты.

Основная идея состоит в том, что любая часть информации, которая когда-либо связана с определенным местом, то есть имеет свои географические координаты, и что обычно представляющее определенное явление в реальной жизни, имеющие определенную форму и объем которые являются пространственным компонентом картографических данных. ГИС также должна иметь возможность обрабатывать непространственные характеристики (называемые атрибутами), которые описывают пространственные компоненты картографических данных. Картографические данные состоят из двух компонентов. С одной стороны, у нас есть геометрические данные, то есть реальные объекты карты, объекты на карте, которые представляют объекты в реальной жизни. Это может быть точка, представляющая источник воды, линия, представляющая реку, или область, представляющая озеро, на самом деле, большинство объектов вокруг нас могут быть представлены этими тремя типами геометрических фигур. Точка также может быть высотной отметкой на карте, телевышкой, навигационным маяком и т. д. - линия может быть дорогой, линией электропередач или судоходным путем - местность - лесом, очертанием города или зона ограниченного доступа вокруг чувствительного объекта. Суть геометрических объектов заключается в том, что мы знаем, где они находятся, и у нас есть информация об их местоположении. Обычно это записывается как координаты, которые могут быть долготой и широтой или какой-либо другой из существующих систем координат, которые мы используем [26].

ГИС является набором инструментов, где можно вводить, хранить, редактировать, анализировать и выводить данные карты. Она является эквивалентной любой информационной системе, то есть она основана на технологии базы данных для обработки данных, но она выходит за рамки традиционной базы данных в том отношении, что она также содержит аспекты картографии и обрабатывает географические координаты.

В геоинформационных системах используются пространственные данные, атрибутивные данные, библиотеки условных знаков, и метаданные. Пространственные данные содержат информацию о

пространственном положении объектов и описывают их геометрию. Атрибутивные данные описывают качественные и количественные свойства пространственных объектов. Библиотеки условных знаков содержат наборы стандартных условных знаков, символов и принятых обозначений для отображения пространственных объектов в конкретной предметной области. Метаданные, как правило, содержат информацию о самих данных, т.е. об источниках данных, методах получения данных, конкретных исполнителях получивших данные и т.п. [27].

Основной единицей в ГИС являются данные. Данные (лат. datum - акт) - совокупность фактов и сведений, представленных в каком-либо формализованном виде для их использования в науке и других сферах человеческой деятельности. Под данными в среде ГИС понимается информация, известная об объектах реального мира; результаты наблюдений и измерений этих объектов. Элемент данных содержит две главные компоненты: географические сведения, описывающие его местоположение в пространстве относительно других объектов (пространственные данные), и атрибутивные данные, которые описывают сущность, характеристики, переменные и значения. ГИС как любая система состоит из совокупности связанных между собой подсистем (рисунок 1.6). Можно выделить 4 основных подсистемы [28]:

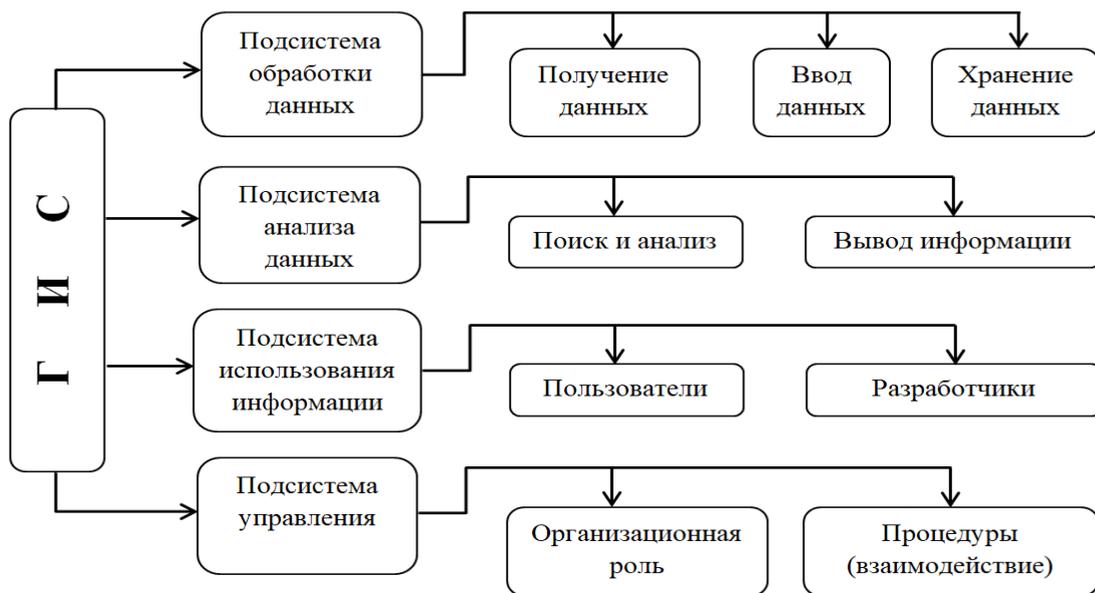
- *подсистема обработки данных* состоит из следующих элементов: получение данных - с карт, растровых изображений или в ходе полевых исследований; - ввод данных - полученные данные необходимо ввести в цифровую базу данных, например, отвекторизовать; - хранение данных - необходимо решить вопросы: как часто данные используются, как их следует обновлять, являются ли они закрытыми, в каком формате происходит сохранение данных (для каждого программного обеспечения используется свой формат) и др.;

- *подсистема анализа данных* состоит из следующих элементов: поиск и анализ информации - от простых ответов на запросы до сложного статистического анализа, а также анализа больших массивов данных; - вывод информации - как и куда должна

выводиться информация (цифровые карты, планы), на экран, на бумажный носитель, выкладываться в интернет и т.п.;

- *подсистема использования информации*: пользователями могут быть научные работники, специалисты по планированию, управляющий персонал и др. Необходимо наладить взаимодействие пользователей с разработчиками ГИС, чтобы функционал системы соответствовал задачам пользователей;

- *подсистема управления*, где можно выделить: организационная роль - отдел ГИС обычно представляет собой отдельное подразделение в составе крупной организации (аналогично вычислительному центру в университетах), основная задача - оказывать услуги по составлению баз пространственных данных и их анализу. В число сотрудников могут входить: системный программист, администратор базы данных, оператор системы, системный аналитик, операторы устройств ввода графической информации (например, обычно в штате центра ГИС в агентстве по управлению ресурсами насчитывается 5–7 человек). – Процедуры взаимодействия – для эффективного функционирования системы необходимы тесные контакты группы ГИС и остальных сотрудников организации, для чего создаются необходимые процедуры взаимодействия, или регламенты.



**Рисунок 1.6 - Подсистемы ГИС**

Функции и достоинства ГИС включают [29]:

- геопространственный анализ специальных и общегеографических данных;

- моделирование геопространства - создание моделей геопространства;

- сбор и подготовка геоинформации - получение исходных данных для моделирования;

- визуализация - требуется для контроля и восприятия человеком результатов пространственного анализа;

Геоинформационные системы обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными информационными системами, как в визуальном представлении пространственных данных, так и в проведении анализа этих самых данных. В области визуального представления [29]:

- многослойность карт, созданных с помощью ГИС, означает, что однотипные пространственные объекты расположены в отдельном слое, который можно включить или отключить;

- ГИС обладают способностью внесения полноценного масштабного ряда, то есть возможность создания в одной ГИС карт разного масштаба и отображение нужной из них;

- существует возможность трёхмерного представления карты; цифровую карту, созданную с помощью ГИС, можно вывести на печать и получить полноценную бумажную копию.

В области аналитики ГИС также имеют несколько очень важных преимуществ [29]:

- автоматизированный расчет длин, площадей, буферных зон, экспозиции;

- возможность вносить любое количество информации на карту;

- оперативное изменение данных.

## **Глава 2. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЕЛЕОПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

### **2.1. Область применения современных методов и технологий дистанционного зондирования и мониторинга селеопасных горных территорий**

Анализ существующих результатов исследований опасных гидрологических явлений, указывают на то, что наиболее «предпочтительной и результативной методологией является - практическая, ориентированная на выявление общей сущности гравитационных природных катастроф (обвалов, оползней, селей различного вида) и проблем определения возможностей и поиска путей их локального прогнозирования» [30].

Значительное воздействие на гидрологические процессы (в т.ч. селевые) оказывают современные быстрые изменения климата, требующие принятия срочных мер по обеспечению устойчивости территорий и адаптации к ним, к которым могут быть отнесены: совершенствование систем мониторинга (в том числе с использованием технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)) и методов прогнозирования; разработка эффективных мероприятий по уменьшению ущерба от стихийных природных явлений [31-33].

Изучение удалённых, в особенности труднодоступных горных территорий осуществляются применением ДЗЗ, аэрофотографирования, снимков со спутников, интернет ресурсов (Google Earth и др).

ДЗЗ (см. гл.1.) являющийся технологией наблюдения объекта на поверхности земли наземными, авиационными и космическими средствами с использованием инструментальных методов дистанционного (неконтактного) получения информации о состоянии и параметрах объектов, обеспечивающая дополнительной информацией существующие наземные системы

мониторинга окружающей среды [3-34] имеет широкие возможности к применению в условиях Таджикистана.

К основным сферам применения ДЗЗ в условиях Таджикистана относятся:

- гидрологические исследования (управление и оценка водных ресурсов, мониторинг таяния снегов, прогноз паводков и т.д.);
- сельское хозяйство (метеопрогноз, выявление ареалов сельскохозяйственных культур, мониторинг состояния растительного покрова, создание карт типов почв, предупреждение градобитий и т.д.);
- экологические исследования (охрана окружающей среды, мониторинг её состояния и загрязнения и т.д.);
- гляциологические исследования (исследования ледников, снежного покрова, ледяного покрова водоёмов и т.д.);
- геолого-геоморфологические исследования (идентификация типов горных пород, локализация геологических аномалий, мониторинг изменения рельефа земной поверхности, мониторинг тектонических движений, прогноз опасных экзогенных геологических процессов и явлений и т.д.);
- топографо-геодезические исследования и картография (получение точных данных о высоте и привязка их к системе координат, производство карт и внесение изменений в них);
- управление рисками стихийных бедствий (контроль объёма паводков, предупреждение о селях, лавинах, оползнях, песчаных и пылевых бурях и т.д.).

Одним из методов ДЗЗ является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), управляемых в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режимах для осуществления аэрофотосъёмки, принимающиеся в дальнейшем для создания карт и трёхмерных моделей местности. При этом БПЛА позволяют (даже в условиях облачности) получать чёткие фото - и видеоизображения с высоким разрешением и осуществлять исследования, исчисляемые минутами, а иногда часами. Немаловажным фактором является и то, что, используя БПЛА, можно без риска для жизни людей проникать в

труднодоступные районы, что особенно актуально в горных и предгорных частях Таджикистана [33].

Информация о применении БПЛА в Таджикистане очень мало или же практически отсутствуют. Есть несколько работ по применению БПЛА, но они не отражают все возможности их применения более широко. В работе Кодирова А.А. [35] представлена информация об использовании небольшого квадрокоптера Phantom-4 (Фантом-4), с 40м, 80м и 120м для небольшого участка, а также представлен пример выбора предпроектных вариантов дорог на участке Яван-Душанбе территории Таджикистана [36].

Ввиду небольшого объёма заряда аккумулятора (28 минут), а также малой возможности по расстоянию полёта использованный квадрокоптер предназначен для мониторинга небольших территорий. В силу вышеизложенного квадрокоптер (Dji Phantom-4) а также Dji Inspire 1 нами были использованы для аэрофото-видео-съёмки лишь небольших и близлежащих участков.

Следует отметить, что ввиду отсутствия информации о комплексном применении БПЛА в Таджикистане анализ областей применения современных методов и технологий дистанционного зондирования и мониторинга стихийных бедствий, водных объектов горных территорий были осуществлены по существующей литературе и опыту применения БПЛА в странах СНГ.

Опыт применения и результаты исследований по применению БПЛА приведены в работах В.Н. Журавлева В.Н. [37] и Д.И. Думина [38], Атутова Ж.В. по определению границы зоны распространения отложений твердого стока образовавшихся после прохождения селевых потоков [39]. Атутовым Ж.В., и Макаровым С.А. на основе анализа аэрофотоснимков, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 3 Advanced, были определены пространственные закономерности формирования морфодинамических селевых зон - зарождения, транзита и аккумуляции. В частности, этими исследователями при исследованиях высокогорной зоны обозначены зоны зарождения и транзита грязекаменных потоков, а в пределах переходной зоны от днищ впадин к горам – зоны транзита водогрязевых потоков [40].

Исследователем Ерофеевым А.А. и др. представлена результаты аэрофотосъёмки, осуществлённые с 12 по 16 июля 2017 года горно-ледникового бассейна Актру (Республика Алтай, Российская Федерация). При этом, в качестве съёмочного оборудования был использован малый мультироторный БПЛА DJI MAVIC [41].

Область применения БПЛА, технологии и технические средства являются наиболее мобильными и широко используются в мире при мониторинге окружающей среды и водных объектов и на наш взгляд, наступил период активного их применения при ЧС в странах СНГ [42].

## **2.2. Беспилотные летательные аппараты. Классификация, типы и область применения**

Как было сказано выше ДЗЗ как система мониторинга поверхности Земли, с использованием современных методов и технологий базируется на использовании самолётов, вертолётов и БПЛА (*аэрофотоснимки*),- спутников, космических кораблей и орбитальных станций (*космические снимки (космоснимки)*), фотокамер, опускаемыми на глубину (*подводные*) и фототеодолитов (*наземные*) [142].

«Дешифровочные признаки (формы, размеры, тон объектов) являются основой для процесса дешифровки космоснимков» [43].

Космическое фотографирование особенно эффективно в труднодоступных горно-предгорных зонах Таджикистана.

«Снимки с пространственным разрешением 10 и менее метров распространяются по достаточно высоким ценам, по данным 2010 г. в среднем примерно 15–30 у.е. за 1 км<sup>2</sup>, при минимальной площади заказа 25 км<sup>2</sup>. Стоимость снимков определяется поставщиком данных на момент поставки и зависит от разных факторов (например, площади, покрываемой снимками, новая съёмка или материалы из архива и т.п.)» [44].

Другим видом аэрофотосъёмки с воздуха были съёмки, осуществляемые с самолётов. «Первые удачные опыты были проведены ещё на рубеже XIX и XX веков» [3].

«На территории Таджикистана Р.Д. Забиров в своих исследованиях по оледенению Памира широко использовал материалы аэрофотосъёмок и установил, что площадь современного оледенения советского Памира составляет 8041 км<sup>2</sup>, а количество ледников – 1085» [45-46].

«Аэровизуальные исследования по оценке селеопасности высокогорных озёр Памира проводились 1967 году геологами ПО «Таджикгеология» и Института ВСЕГИНГЕО (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии)» [46-47].

«А.И. Шеко и А.М. Лехатинов составили карту динамики развития Усойского завала масштаба 1:5000 на основе современной топографии, дешифрирования аэрофотоснимков и аэровизуальных наблюдений» [46].

Для проведения аэрофотосъёмки с применением самолётов и вертолетов требуется большие экономические затраты на техническое обслуживание, а также топливо, что в свою очередь приводит к увеличению стоимости конечной продукции. «Использования традиционных авиационных комплексов не имеют рентабельности при съёмке небольших территориях и объектов» [48].

Одними из современных инструментариев процесса дистанционного зондирования земли являются так называемые «беспилотные летательные аппараты - БПЛА», то есть летательный аппарат без бортового пилота-человека.

БПЛА, в основном, это самолёты с дистанционным управлением (например, пилотируемым пилотом из наземной станции) или самолёты, летающие автономно на основе заранее запрограммированных планов полёта или более сложных систем динамической автоматизации [49].

По Фетисову В.С. «БПЛА - это летательный аппарат многоразового или условно-многоразового использования, не имеющий на борту экипажа (человека-пилота) и способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в воздухе для выполнения различных функций в автономном режиме или посредством дистанционного управления» [50].

В последние десятилетия широкое распространение получили беспилотные воздушные суда, производимые в странах Азии, Европы и Северной Америки (рисунок 2.1). При этом лидерами мирового рынка являются компании SenseFly (Швейцария), DJI (КНР) и 3D Robotics (США).



**Рисунок 2.1 – Количество компаний-производителей беспилотных воздушных судов в различных странах мира [51]**

«Постоянное стремление в миниатюризации электроники, для практичности и удобства позволяет производить БПЛА меньшие по размеру, одновременно оснащая их камерами и другими датчиками для поддержки сбора данных» [52].

«Использование этих систем дают перспективные для прикладных задач ожидаемые результаты и предоставляют широкие возможности, которые раньше были недостижимы» [53].

В зависимости от задачи картографирования и мониторинга необходимо выявить различия в конструкции и технических решениях разных типов как - самолетный, вертолетный и мультироторные [54].

БПЛА классифицируются также, на учёте производительности системы, то есть на системы с открытым исходным кодом и на системы с ручным управлением (класс OM), а также системы Micro и Mini (класс M) и беспилотные летательные аппараты, обладающие большие грузоподъемности (класс L). Характеристика БПЛА с точки зрения навигационных датчиков и качества географической привязки, а также и сбора пространственных данных показано в таблице 2.1 [55].

Таблица 2.1 - БПЛА с точки зрения лётных характеристик и навигации

Датчики и сенсоры	Геопривязка	Возможность	Требования	Категория БПЛА
Нет GPS/ INS	Post	0	Низкая точность	OM -класс
GPS и INS потребительского класса	Post/direct	+	Умеренная точность [дм-м]	M- & L-класс
DGPS/ навигация и тактический INS	Post/direct	++	Высокая точность [см]	M- & L-класс

Примечание: (0: минимальное значение, +: среднее значение, ++: лучшее значение)

Использованные нами типы БПЛА и их характеристики обеспечившие наибольший потенциал для недорогого картирования и использованные при картографировании и исследовании зон подверженных риску стихийных бедствий на территории Таджикистана представлены в таблицах 2.2, 2.3, 2.4.

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики БПЛА QC-2 Micro

Рисунок	Основные технические характеристики	
		Длина
Ширина		1,8 м
Макс. Загрузка		0,5 кг
Взлётный вес		3,5 кг
Крейсерская скорость		60 км/ч
Макс. высота н.у.м.		5000 м
Длительность полёта		около 1 час

Таблица 2.3 – Основные технические характеристики квадрокоптера DJI Inspire 1 pro

Рисунок	Основные технические характеристики	
		Макс. Скорость
Масса		3400 г
Макс. высота н.у.м.		4500 м
Длительность полёта		15 минут (прибл.)

Таблица 2.4 – Основные технические характеристики квадрокоптера DJI Phantom 4

Рисунок	Основные технические характеристики	
	Макс скорость	20 м/сек.
	Масса	1380 г
	Макс. высота н.у.м.	6000 м
	Длительность полёта	28 минут (прибл.)

К основным параметрам, определяющие способ старта, посадку, грузоподъёмность, процесс полёта и съёмки, вне зависимости от типов и моделей, относят размер, вес и их форму.

Начиная с 2017 г. по настоящее время Научно-исследовательским центром экологии и окружающей среды совместно с научными учреждениями НАНТ вышеизложенные методы, технологии и технические средства активно применяются для мониторинга окружающей среды и ОПЯ, в том числе при непосредственном личном участии Сафарова М.С. были организованы и проведены исследования, полевые-мониторинговые работы с использованием с типов БПЛА (таблицы 2.2, 2.3, 2.4).

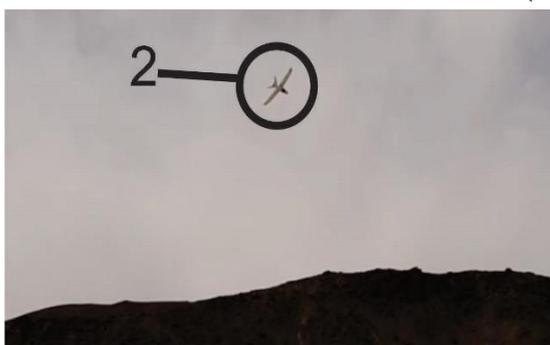
В частности, современные технологии и технические средства были использованы при:

- изучении современного состояния Сарезского озера (2017, 2019, 2022гг.) с участием учёных и специалистов из Научно-исследовательского центра экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Синьцзянского института экологии и географии Китайской академии наук, Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороны при Правительстве Республики Таджикистан, Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ, Агентство по гидрометеорологии Комитет охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и Институт горной опасности и окружающей среды Китайской Академии наук (рисунок. 2.2) [56];

- мониторинге пастбищ (2019 г.) в Дангаринском районе Хатлонской области и в Варзобском районе в рамках проекта «Изучение структуры и продуктивности фитоценозов аридных пастбищ Таджикистана в связи с изменением климата и антропогенными воздействия»;
- комплексном изучении ущелья Камароб (Раштский район) (2019 г.);
- мониторинге современного состояния ледников (2019-2020 гг.);
- учёте численности диких животных и аэрофотосъёмка для составления карты местности. (2020);
- мониторинге зоны схода селевого потока в Хуросонском районе (август 2020г.).



(a)



(b)



(c)

**Рисунок 2.2 -Мониторинг озера Сарез (24.08.2019г.). а - Усойская плотина и река Бартанг; б- процесс мониторинга; с - вид нижнего бьефа. 1 - выходы фильтрационных потоков на Усойской плотине и исток р. Бартанг, 2 - БПЛА в полете. Съёмки Сафарова М.С. (min. - 4270м. н.у.м.; max. - 5160м. н.у.м.)**

Ниже освещены вопросы, связанные с дистанционным зондированием и мониторингом селеопасных горных территории, а также *организации полётов БПЛА*.

### 2.2.1. Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных горных территорий. Методология организации полётов БПЛА

Реализация исследований включала в себя комплекс данных полученные с применением спутниковых снимков Landsat, Sentinel, радарных снимков SRTM, космоснимки с ресурса Google Earth, а также данных полученные с помощью БПЛА.

Аэрофотосъёмка местности была выполнена по заранее разработанным (заданным) маршрутам, с указанием схемы полета в виде сетки (рисунок 2.3а) [57]. При этом учитывался факт рекомендуемого перекрытия: 75% - продольное перекрытие и 60% - поперечное перекрытие. Обязательным условием было то, что поперечное и продольные перекрытия и высота полёта должны быть запланированы с учётом типа местности.

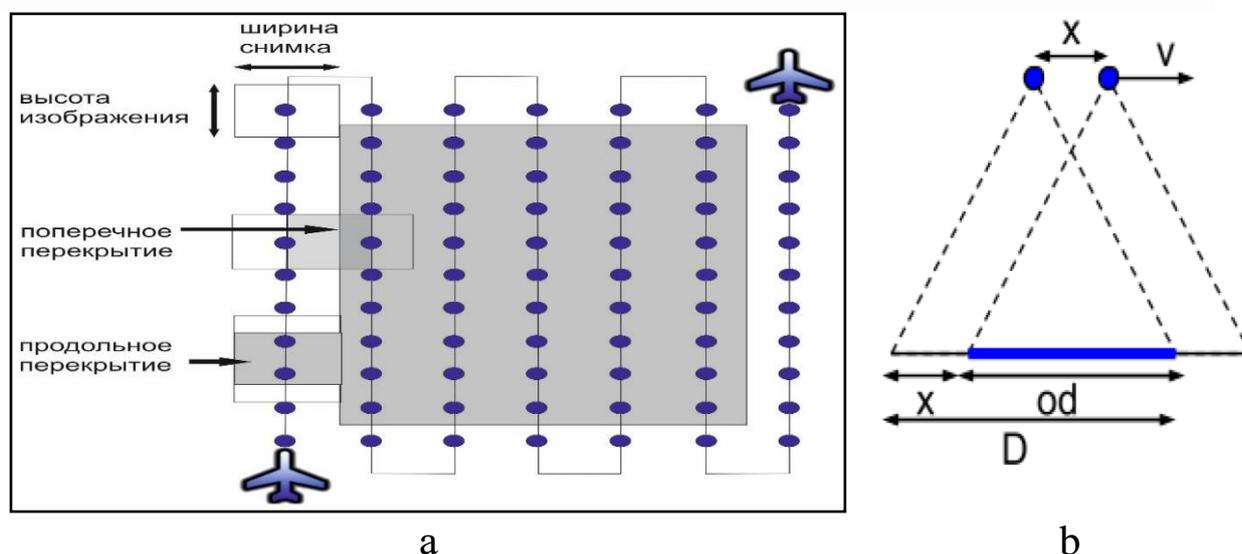


Рисунок 2.3 – Схема проведения аэрофотосъёмки с БПЛА

Целесообразно, поперечное и продольные перекрытия для лесистой местности, территории с плотной растительностью и равнинной местности с сельскохозяйственными полями необходимо увеличить до 85% и 70% соответственно. Следует

также увеличить высоту полёта чтобы легче было отождествить одинаковые объекты на перекрывающихся изображениях.

Скорость съёмки изображения для достижения заданного фронтального перекрытия зависит от скорости БПЛА / самолёта, GSD и пиксельного разрешения камеры (рисунок 2.3b) [58]:

$$od = \text{перекрытие} * D \quad (3.1)$$

$$x = D - od \quad (3.2)$$

$$t = x / v \quad (3.3)$$

где:  $D$  - расстояния, охватывающий территорию одним изображением в направлении полёта [м]; перекрытие - процент желаемого фронтального перекрытия между двумя изображениями;  $od$  - перекрытие двух изображений в направлении полёта [м];  $x$  - расстояние между двумя положениями камеры в направлении полёта [м];  $v$  - скорость полёта [м/с];  $t$  - время, прошедшее между двумя изображениями (скорость изображения) [с];

GSD - расстояние выборочного контроля земли, т.е. расстояние между центрами двух последовательных пикселей на земле, влияющий на точность и качество конечных результатов, а также на детали, которые видны в окончательной ортомозаике.

При полете БПЛА, его камера была ориентирована шириной сенсора (длинный размер) перпендикулярно направлению полёта (рисунок 2.4).

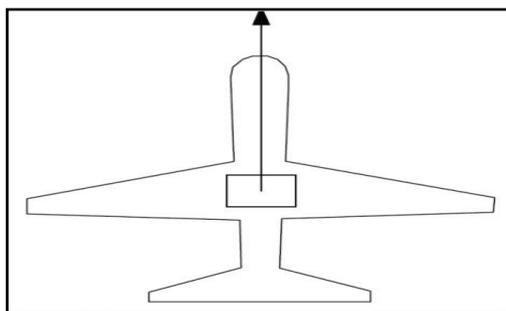
$$D = Dh = (imH * GSD) / 100 \quad (3.4)$$

где:

$Dh$  - расстояние, пройденное на земле одним изображением по высоте

(высота следа) [м];  $imH$  - высота изображения [пиксель]; GSD - желаемый GSD [см / пиксель].

Аэрофотосъёмка территории с целью мониторинга и картографирования местности, как было отмечено выше, проводится по за ранее заданному маршруту, с заданием высоты, скорости полёта, перекрытия снимков и др. необходимых условий, достаточных для проведения целенаправленных полётов.

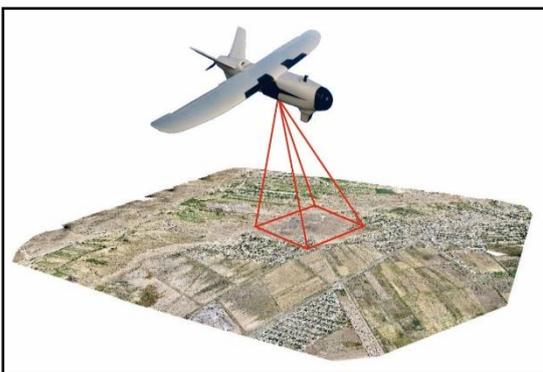


**Рисунок 2.4 – Схема расположение камеры перпендикулярно направлению полёта**

При этом необходимо иметь ввиду, что квадрокоптеры полезны для аэрофото - видео съёмок небольших территорий, а БПЛА самолетного типа (рисунки 2.5 и 2.6) позволяют захватить значительные площади и расстояния.



**Рисунок 2.5 - Комплекс управления БПЛА для проведения аэрофото-съемки. 1 - Пульт управления, 2 - антенна, 3 - наземная станция**



**Рисунок 2.6 - Схема аэрофотосъемки с воздуха с помощью БПЛА. Хуросонский район.**

Процесс исследований с применением БПЛА включает в себя, прежде всего подготовительные работы:

- анализ метеоусловий в районе проведения работ, для планируемых дней календарного плана;
- анализ района исследования, орография, расстояния, площадь и предполётный план полётов (можно выполнить и перед полётом БПЛА);
- получение разрешения для проведения полётов в данном районе в органах, регулирующие полёты БПЛА в Таджикистане (для проведения полётов также необходимо иметь лицензию).

Алгоритм проведения полевых - мониторинговых работ с применением БПЛА включает в себя:

- выбор оптимального места для взлёта и посадки БПЛА и визуального наблюдения района исследования, с учётом всех препятствия, осложняющие взлёт и посадку БПЛА. Точку старта необходимо выбрать максимально высокой и убедиться в отсутствии препятствий для обеспечения прямой радиовидимости. Вместе с тем точку старта необходимо выбрать минимально удаленным от исследуемого объекта, определив при этом скорость и направление ветра, имея ввиду, что направление ветра на земле и в районе проведения аэрофотосъёмки могут различаться;

- проверку предполётного задания (или её корректировка после визуального осмотра района исследования);

- проведение аэрофотосъёмки (после взлёта и достижения необходимой безопасной высоты БПЛА и наблюдение состояние судна, БПЛА отправляется на миссию где согласно заранее разработанным маршрутам и достигнув координаты первой точки начинает аэрофотосъёмку). При этом оператору необходимо постоянно наблюдать за техническим состоянием БПЛА (заряд аккумуляторов, высота полёта, связь и что не мало важно скорость и направление ветра характерное быстрым изменением в условиях горных районов);

- посадка БПЛА производится в ручном режиме на брюхо (фюзеляж);

- загрузка снимков с БПЛА и данные GPS для дальнейшего обработки и получение результатов;

- повторное проведение полётов (по необходимости в случае технических проблем).

Таким образом, при проведении полётов над территориями, где наблюдается резкий подъем горных вершин необходимо задать правильную траекторию полёта с целью получению нужного результата и избежание потери БПЛА. Так, например, если место взлёта БПЛА находится на высоте 3000 м н.у.м. море, а вершина гор на высоте 3700 м н.у.м, то необходимо сначала поднять БПЛА на высоту 1000 м над поверхностью земли, а затем отправить её на миссию (аэрофотосъёмку). Высоту точки возвращения необходимо определить заранее, исключив при этом, столкновения БПЛА со скалами.

## **Глава 3. ОПАСНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В ТАДЖИКИСТАНЕ**

В ближайшие десятилетия особая роль в селепроявлениях будет принадлежать климатическому фактору, т.е. его изменению, прежде всего, в горных районах средних широт с континентальным климатом, несущим в настоящее время оледенение. Вероятность возникновения селевых паводков за счет снеготаяния или при осадках менее 100 мм/сут не превышает 7-13%, при дождях с суточным слоем от 20 до 40,0 мм она возрастает до 30-57%, а особо опасных селей - до 11-12%. Однако формирование селевых паводков зависит не только от интенсивности дождя, но и от соответствующих почвенных условий, растительности, температуры воздуха и других факторов. Изменение климата - повышение температуры, приводит к быстрому таянию ледников и снежных полей, способствующие возникновению селей. Особой катастрофичностью характерных для территории ЦА, являются селевые потоки - гляциосели, образующиеся при прорыве приледниковых горных озер.

### **3.1. Общие сведения о водных ресурсах и природных условиях Таджикистана**

По инициативе Республики Таджикистан, Генеральной ассамблеей Организации Объединённых Наций принята резолюция 71/222, провозгласивший период 2018-2028 гг. Международным десятилетием действий «Вода для устойчивого развития». Целями Десятилетия стали повышенное внимание к устойчивому развитию и комплексному управлению водными ресурсами для достижения социально-экономических и природоохранных целей и к осуществлению и пропаганде соответствующих программ и проектов, а также к расширению сотрудничества и партнёрства на всех уровнях для содействия реализации согласованных на международном уровне целей и задач, связанных с водными ресурсами, в том числе содержащихся

в Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [59].

Исследованиям комплексного использования и рационального управления водными ресурсами существенный вклад внесли, С.Т. Алтунин, К.Ф. Артамонов, Я.В. Бочкарев, В.И. Данилов-Данильян, З.В. Кобулиев, К.А. Кожобаев, В.С. Лапшенков, Г.В. Лопатин, Н.И. Маккавеев, Д.М. Маматканов, У.И. Муртазаев, Х.М. Мухаббатов, К.И. Россинский, В.П. Светицкий, А.А. Соколов, И.И. Саидов, А.Р. Фазылов, Т.М. Чодураев, Г.И. Шамов, В.Л. Шульц, О.П. Щеглова и другие учёные.

Оценка характера климатических трансформаций и экстремальных явлений, как и последствия интенсивного таяния ледников, наводнений, засух и оползней, как ожидается, будут представлять реальную угрозу для достижения целей по устойчивому развитию страны, а также защите водных ресурсов в регионе, в частности [60]. Освоение горно-предгорных территорий, в том числе в Таджикистане, связано как с природными стихийными явлениями, так и с антропогенным воздействием на окружающую среду.

Таджикистан расположен в центре Евразийского континента в юго-восточной части Центральной Азии, занимая площадь 142,6 тыс. км<sup>2</sup> является горной страной с отметками абсолютных высот от 300 до 7495 м. (рисунок 3.1 и таблица 3.1).

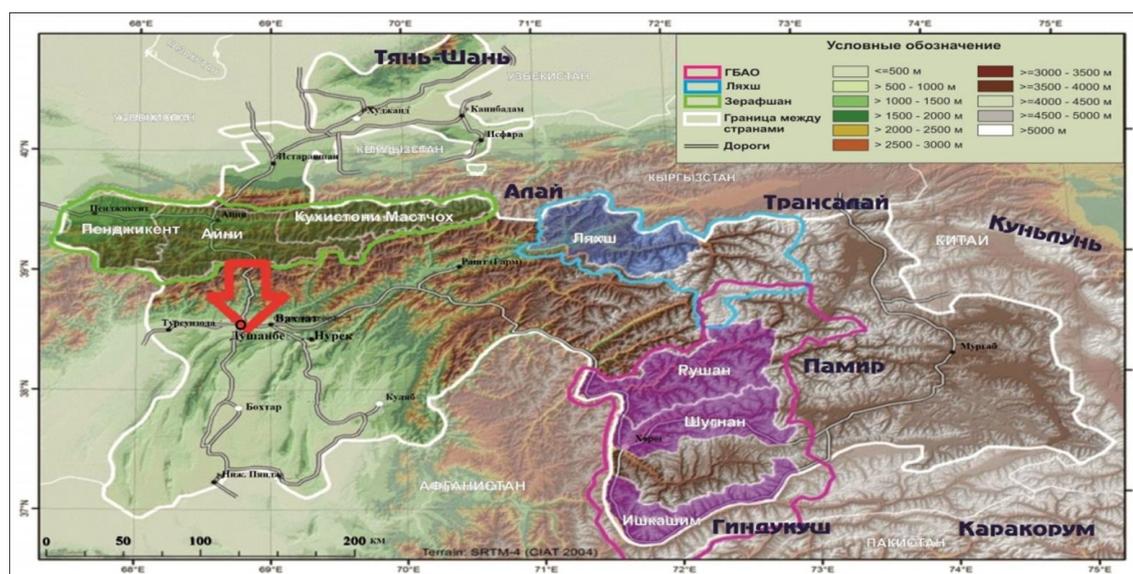


Рисунок 3.1 – Гипсометрическая карта РТ

Горы занимают 93% его территории, которая подразделяется на 5 природно-географических областей (Северный Таджикистан, Центральный Таджикистан, Юго-западный Таджикистан, Западный Памир и Восточный Памир), со свойственными им климатическим условием, рельефом, геологическим строением, растительностью, животным миром и др.

Таблица 3.1 – Распределение территории Таджикистана по крутизне склонов (одна тысяча гектаров %)

Территория	Крутизна склонов в градусах								Общая площадь
	0-2	2-5	5-10	10-15	15-20	20-30	>30	Осыпи, камни	
Памир	-	<u>768,3</u> 15,7	<u>29,3</u> 0,5	<u>157,2</u> 2,8	<u>97,2</u> 1,2	<u>1141</u> 18,3	<u>2127</u> 30,7	<u>2105</u> 30,5	<u>6424,3</u> 100
Всего по РТ	<u>862,3</u> 6	<u>1371</u> 9,6	<u>391,9</u> 2,7	<u>821,6</u> 5,8	<u>1271</u> 8,9	<u>2429</u> 17	<u>4105</u> 28,7	<u>3035</u> 21,3	<u>14286,5</u> 100

*Примечание – Менее 5° - слабопокатые; 5-10° - покатые, сильнопокатые; 10-15° - крутые; 15-20° - очень крутые; 30-45° - чрезвычайно крутые; более 45° - обрывистые.*

РТ граничит (рисунок 3.2) на севере и западе «с Узбекистаном (910км), Кыргызстаном (630 км), на юге с Афганистаном (1030 км) и на востоке с Китаем (430 км)» [61].



Рисунок 3.2 – Физическая карта Таджикистана

Территория Таджикистана включает в себя часть Ферганской долины (север); хребты (Зерафшанский, Туркестанский, Гиссарский и Алайский) расположенные в центре; Памир с

высочайшим пиком на земле – Сомони и долины на юго-западе - Вахшская, Гиссарская и др.

Это особенность рельефа является благоприятным фактором для формирования водных ресурсов, но, с другой стороны, вызывает в этих странах дефицит пригодных для обработки земель» [62].

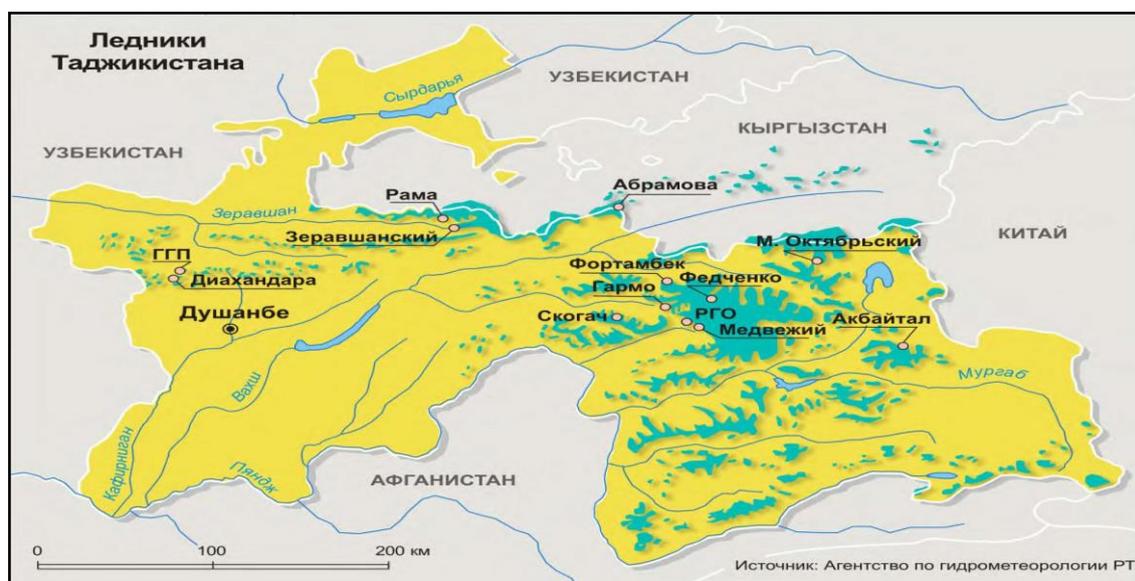
Морфометрия и климат способствовали тому, что Таджикистан является центром современного крупного оледенения в ЦА, а ледники вместе с вечными снегами - хранилища воды, служат регуляторами климата и стока, и формируют запасы пресных вод и питающие реки Аральского бассейна.

Среднегодовые температуры, в зависимости от высоты расположения местности, могут быть от + 17°C и более на юге страны до -6°C и меньше на Памире. Особенно суровым климатом отличается Восточный Памир, где абсолютный минимум достигает -61°C (озеро Булункуль). На юге страны абсолютный максимум температур воздуха достигает +45°C (Пяндж). В жарких низинных пустынях Южного Таджикистана и холодных высокогорных пустынях Восточного Памира среднегодовое количество осадков колеблется от 70 до 160 мм, тогда как максимум осадков наблюдается в Центральном Таджикистане, и может превышать 1800 мм [63].

**Ледники.** Генеральная Ассамблея ООН 14 декабря в ходе 77-й сессии, при поддержке представителей 153 стран - членов ООН единогласно приняла резолюцию «2025 год - Международный год защиты ледников», инициированную Таджикистаном. В резолюции подчеркивается важность ледников как составного компонента гидрологического цикла и серьезное влияние их ускоренного таяния на климат, окружающую среду, здоровье человека и устойчивое развитие. Констатировано, что последствия глобального потепления стали причиной значительного сокращения креосферы, снижения устойчивости в высокогорных регионах; изменения количества и сезона водотока, а также водных ресурсов в бассейнах снежных и ледниковых рек, влияющие на снижение местной сельскохозяйственной продукции, увеличение нехватки воды и повышение среднего уровня моря.

На основе принятой резолюции, высказанные предложения получили поддержку со стороны государств-членов ООН и приняты решения: «Объявление 21 марта Международным Днём защиты ледников»; «Объявление 2025 года Международным Годом защиты ледников»; «Создание международного трастового фонда при ООН для содействия защите ледников»; «Проведение в 2025 году Международной конференции по защите ледников в городе Душанбе».

«Ледники Таджикистана (рисунок 3.3) покрывают площадь не менее 9000 км<sup>2</sup> и занимая около 6% территории страны, играют важнейшую роль в формировании водных ресурсов реки Амударья - крупнейшей водной артерии Центральной Азии и бассейна Аральского моря» [64].

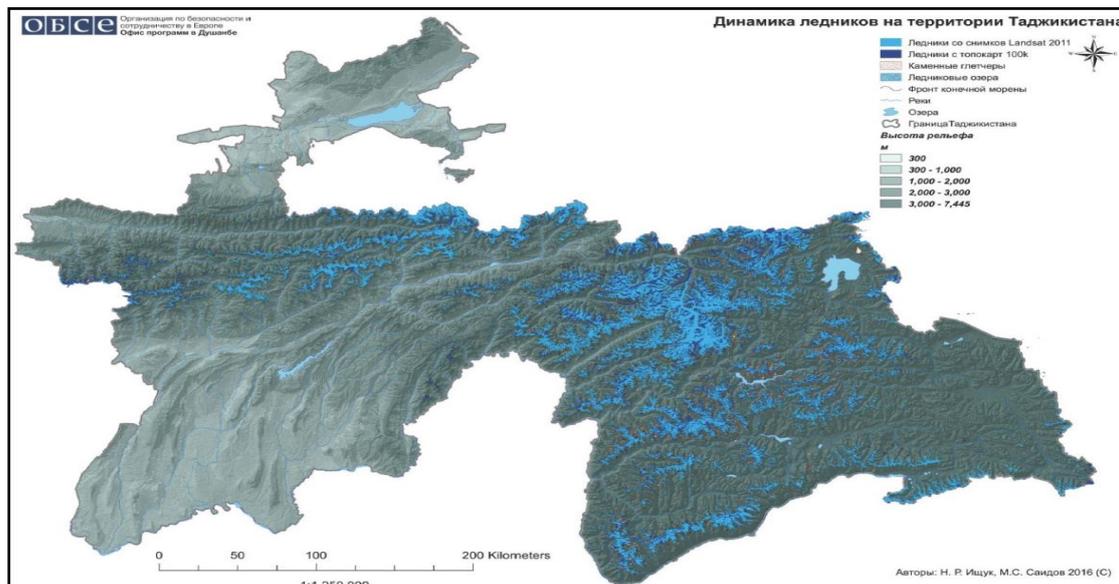


**Рисунок 3.3 – Ледники Таджикистана**

Крупнейшей областью современного оледенения в регионе является Памир, площадь оледенения которого равна почти 7900 км<sup>2</sup>. На Памире насчитывается 16 ледников протяжённостью более 15 км и 7 ледников протяжённостью свыше 20 км. Самый крупный ледник - один из наибольших долинных ледников земного шара - ледник Федченко длиной около 77 км и площадью 907 км<sup>2</sup> [65].

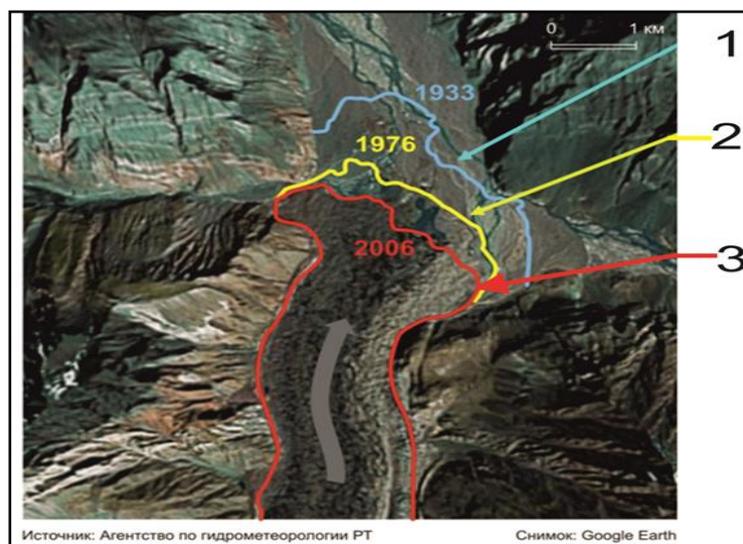
В Таджикистане за последние 30 лет из 14 тысяч ледников, имеющих жизненное значение для всего региона, исчезли более 1000 [66]. Из общего количества существующих ледников, 7 имеют длину свыше 20 км [63- 64, 67].

На рисунке 3.4 показана динамика ледников Таджикистана на основании снимков Landsat 2011 г. и топографических карт [68].



**Рисунок 3.4 – Динамика ледников Таджикистана по данным Н. Р. Ищука и М. С. Саидова**

За период проведения дистанционных наблюдений (1966-2000 гг.) система ледника Федченко сократилась на 44 кв. км (6%). Происходит и деградация других ледников [64]. Отступление языка ледника Федченко представлено на рисунке 3.5.



**Рисунок 3.5 – Отступление языка ледника Федченко [69].**  
 1 - второй Международный полярный год и Таджикско-Памирская экспедиция 1932-1933 гг., 2 - регулярные наблюдения за ледником Гидрометслужбой, 3 - первая экспедиция на ледники Таджикистана за годы независимости в 2005-2006 гг.

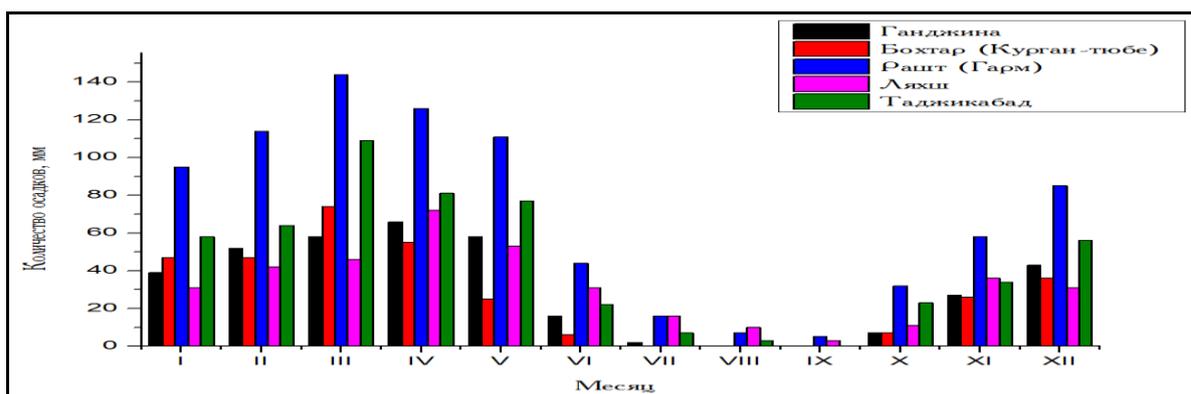
**Осадки.** «Количество осадков в основном определяется глобальной атмосферной циркуляцией и орографическими особенностями местности» [63-64, 70]. Наблюдается, большие различия в распределения осадков по территории республики ввиду сложности и орографического строения (таблица 3.2. и рисунок 3.7). Карта метеорологической наблюдательной сети Таджикистана показано в рисунке 3.6.



**Рисунок 3.6 – Метеорологическая наблюдательная сеть Республики Таджикистана**

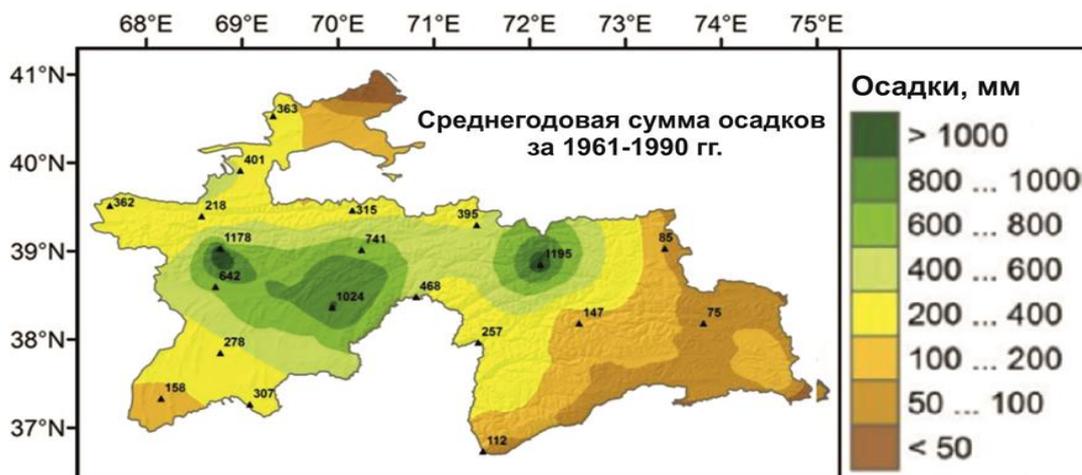
**Таблица 3.2 – Ср. количество осадков (с поправками) к показаниям осадкомера (мм) [71]**

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Душанбе	74	84	127	123	81	20	0	0	0	23	57	71	660
Файзабад	115	126	198	175	116	28	0	0	0	31	70	105	964
Худжанд	19	20	30	28	21	11	5	1	1	16	19	22	193
Бохтар	47	47	74	55	25	6	0	0	0	7	26	36	323
Шаартуз	28	28	39	29	13	3	0	0	0	3	15	21	179
Ганджина	39	52	58	66	58	16	2	0	0	7	27	43	368
Куляб	74	80	120	92	61	10	0	0	1	17	44	68	567
Рашт (Гарм)	95	114	144	126	111	44	16	7	5	32	58	85	837
Ляхш	31	42	46	72	53	31	16	10	3	11	36	31	382
Таджикабад	58	64	109	81	77	22	7	3	0	23	34	56	534
Хорог	33	34	42	45	27	11	4	0	2	13	21	25	257
Мургаб	6	4	7	9	16	17	10	11	9	3	3	2	97
Булун-Куль	11	12	17	22	14	4	1	0	1	5	7	10	104
Калаихумб	62	73	102	76	54	22	7	1	3	23	46	60	529



**Рисунок 3.7 – Количество осадков (с поправками) для объектов исследования**

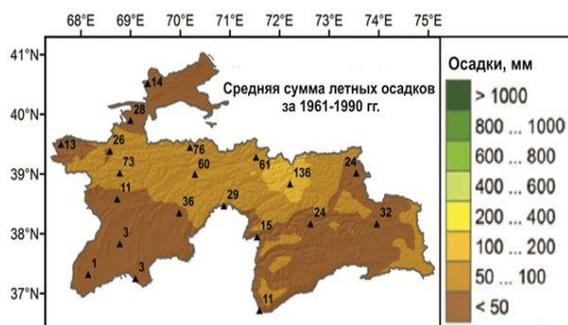
При подсчёте среднего количества осадков за период 1961-1990 гг. Тадж-Гидромет (2016) указывает, что годовой объём может варьироваться от менее 50 мм до более 1000 мм внутри страны. Самыми сухими территориями Таджикистана в среднем являются восточная горная местность и южная низменность, в основном ежегодно получающая менее 200 мм осадков [72]. Интерполированная сумма среднегодовых, летних и весенних суммы осадков в Таджикистане на основе данных 1961-1990 гг. показаны на рисунках 3.8, 3.9 и 3.10 [72-73].



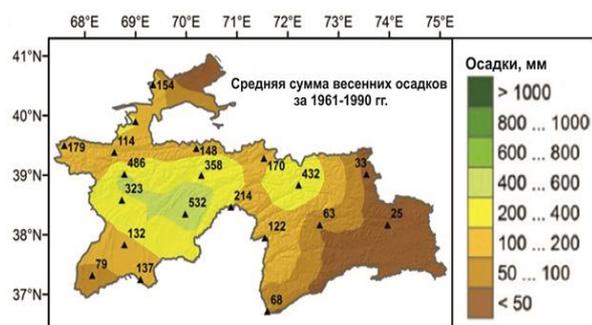
**Рисунок 3.8 – Интерполированная сумма среднегодовых суммы осадков в Таджикистане с 1961-1990 гг.**

«Анализ изменения годовых сумм осадков показал их незначительное увеличение (в среднем 8%) на территории до 2500 м и небольшое уменьшение (3%) в высокогорной местности. На Восточном Памире (4000-6000 м) повсеместно произошло уменьшение количества осадков на 5-10%, а в южных низинных

районах республики (Курган-Тюбе, Шаартуз). В центральном Таджикистане (Федченко, Калайхумб, Рашт, Файзабад, Хушъери) осадки увеличились на 5-10%. В предгорных районах южного Таджикистана (Дангара, Куляб) наблюдалось увеличение осадков на 20%. В таджикской части Ферганской долины наблюдалось небольшое увеличение осадков на 5-10%» [70].

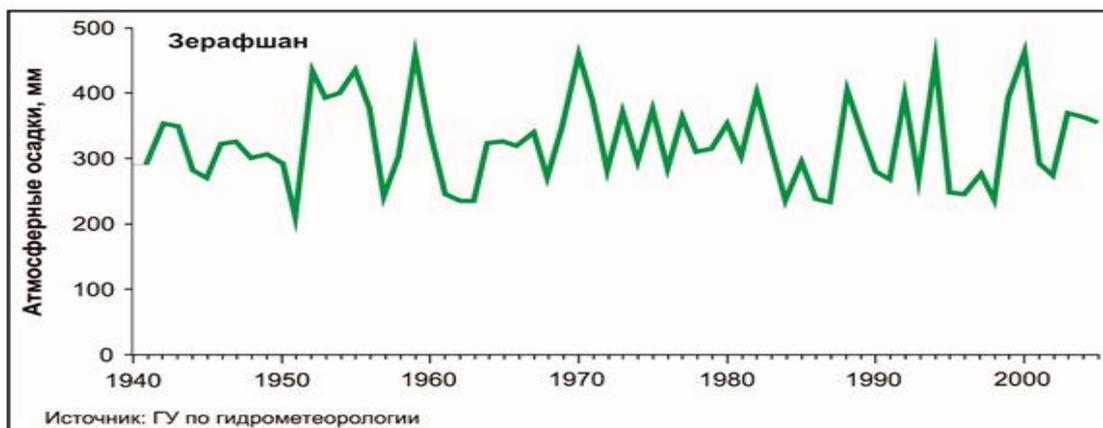


**Рисунок 3.9 –**  
**Интерполированная средняя**  
**сумма летних осадков**  
**в Таджикистане с 1961-1990 гг.**



**Рисунок 3.10 –**  
**Интерполированная средняя**  
**сумма весенних осадков в**  
**Таджикистане с 1961-1990 гг.**

Динамика выпадения годового количество атмосферных осадков в метеостанции Дехавз (высота 2560 м н.у.м.), им. Горбунова (высота 4169 м н.у.м.) и Мургаб (высота 3576 м н.у.м.) показаны на рисунках 3.11, 3.12 и 3.13.



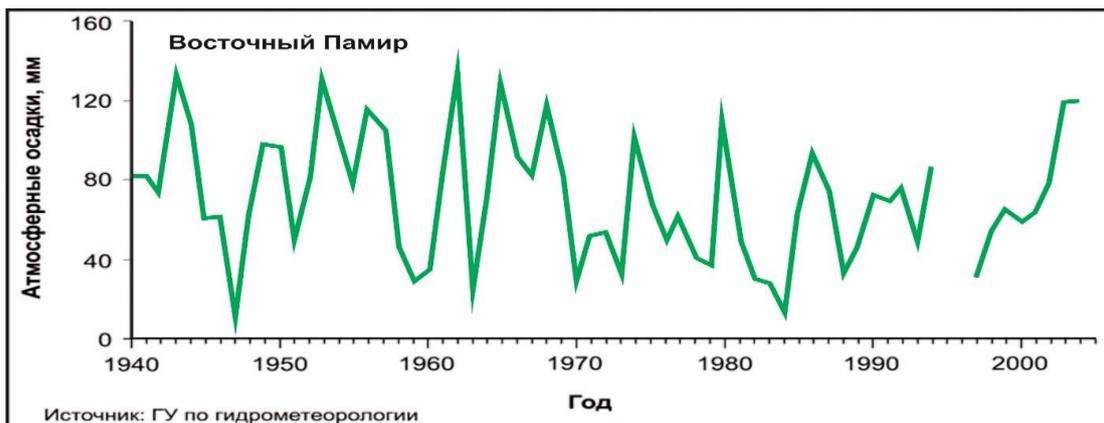
**Рисунок 3.11 – Динамика выпадения годового количество**  
**атмосферных осадков в метеостанции Дехавз (2560 м н.у.м.) [70]**

Годовое количество осадков в последнее десятилетие (2000-2010 гг.) оказалось выше многолетней нормы, за исключением

отдельных годов, что отразилось на повышенной водности рек. За последнее десятилетие засушливыми оказались 2000-2001 гг. и 2008 г., когда осадков выпало на 30-50% меньше нормы [74].



**Рисунок 3.12 – Динамика выпадения годового количество атмосферных осадков в метеостанции им. Горбунова (4169 м н.у.м.) [70]**



**Рисунок 3.13 – Динамика выпадения годового количество атмосферных осадков в метеостанции Мургаб (3576 м н.у.м.) [70]**

Годовое количество осадков в последнее десятилетие (2000-2010 гг.) оказалось выше многолетней нормы, за исключением отдельных годов, что отразилось на повышенной водности рек. За последнее десятилетие засушливыми оказались 2000-2001 гг. и 2008 г., когда осадков выпало на 30-50% меньше нормы [74].

**Геология.** Сложность геологического строения территории Таджикистана и многообразие её полезных ископаемых обусловлены её расположением на стыке двух крупнейших геосинклинально-складчатых подвижных поясов - Урало-Монгольского и Средиземноморского, к которым соответственно

относятся каледониды Северного Тянь-Шаня, герциниды Южного Тянь-Шаня и герцинско-киммерийский Северо- и Южно-Памирский геосинклинально-складчатые пояса. Между каледонидами Северного Тянь-Шаня и герцинидами Южного Тянь-Шаня расположены герциниды Кураминской зоны и Ферганская эпигерцинская мезозойско-кайнозойская депрессия [75].

Строение и геологическое формирование Таджикистана освещены в работах А.П. Марковского, Р.Б. Баратова, М.М. Кухтикова, В.И. Буданова и др. Академик Р.Б. Баротов внёс вклад в изучение истории геологии и горнодобывающего дела [76-94]. Ш.Ш. Деникаевым сделан большой вклад в изучение связей гравитационно-склоновых процессов на бортах Сарезского озера с геолого-тектоническим строением и сейсмичностью района и оценке перспектив медно-никелевого оруденения Северного Памира и в обобщении геологических материалов по Памиру [78, 79].

**Гидрогеология.** «Подземные воды Таджикистана чрезвычайно разнообразны по своему химическому составу и вкусовым качествам, по условиям залегания, стоку и движению. В вертикальном геологическом разрезе чётко выделяются две гидродинамические зоны: *верхняя* с активным водообменном и преимущественным развитием пресных гидрокарбонатов подземных вод хорошего качества; *нижняя* - охватывающая глубокие горизонты артезианских бассейнов с затруднённым водообменном» [95].

«Опираясь на учение о зональности подземных вод, при гидрогеологическом районировании необходимо учитывать в равной мере геологические и физико-географические факторы для вод верхней зоны, а для вод нижней зоны преимущественно геологические» [96].

Подземные воды, крупных долин рек Сырдарья, Вахш, Кафирниган, Кызылсу, Яхсу и межгорных впадин, используются в народном хозяйстве Таджикистана (рисунок 3.14).

«Ресурсы подземных вод Таджикистана оцениваются в 18,7 км<sup>3</sup>/год. При этом эксплуатационные ресурсы составляют 2,8

км<sup>3</sup>/год, а водоотбор, осуществляемый с помощью 9000 пробуренных скважин, составляет в среднем 2,3 км<sup>3</sup>/год» [97].



**Рисунок 3.14 – Основные зоны распространения внутренних подземных вод Таджикистана [98]**

Схема расположения трансграничных зон возможного соприкосновения подземных вод Таджикистана показано на рисунке 3.15.



**Рисунок 3.15 – Схема расположения трансграничных зон возможного соприкосновения подземных вод Таджикистана [98]**

### 3.1.1. Основные характеристики речных бассейнов Таджикистана

«Водные ресурсы горных зон Центральной Азии, занимая 20% площади Аральского бассейна (350 тыс. км<sup>2</sup>), дают около 90% поверхностного стока, составляющие 115 млрд. м<sup>3</sup> год (речные системы рек Амударьи и Сырдарьи) (рисунок 3.16). В Таджикистане зона формирования стока рек составляет 90% его территории. В соответствии с данными Министерства энергетики и водных ресурсов РТ общий сток рек, формирующихся здесь, составляет 64км<sup>3</sup>/год, (в бассейне р. Амударьи 62,9 км<sup>3</sup>/год, Сырдарьи 1,1 км<sup>3</sup>/год)» [99].

«Река Амударья, основной сток которого формируется на территории РТ является крупнейшей рекой Центральной Азии, длиной 2540 км, а с площадью бассейна 309 тыс. км<sup>2</sup>» [100].

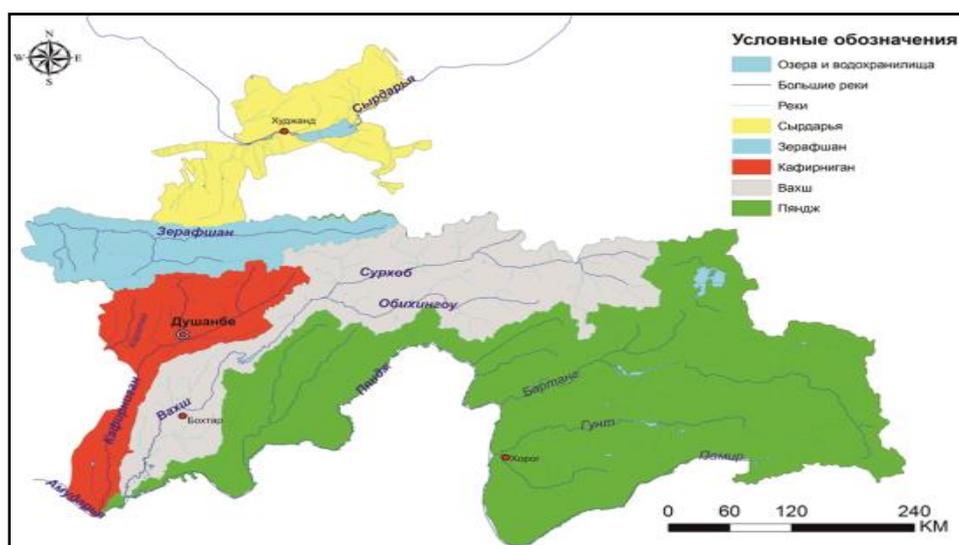
«Река Сырдарья, длиной 3019 км, с площадью бассейна 219 тыс. км<sup>2</sup>, истоки которого лежат в Центральном (Внутреннем) Тянь-Шане, после слияния р. Нарын с р. Карадарья называемая Сырдарья, с наибольшим стоком в июне - вторая по водности и первая по длине река ЦА. Питание - ледниковое и с преобладанием снегового, с весенне-летним половодьем, начинающееся с апреля» [101].



Рисунок 3.16 – Среднее потребление воды по каналам бассейна Аральского моря [100]

«Речная сеть Таджикистана делится Алайско-Туркестанской горной цепью и Гиссарским хребтом на три системы: Сырдарьинскую на севере, Зе-рафшанскую-в центре и Амударьинскую-на юге. Кроме того, на Восточном Памире имеются бессточные котловины с озёрами Каракуль и Шоркуль и р. Маркансу» [102-103].

Согласно статье 22 Водного кодекса Республики Таджикистан принятого 2 апреля 2020 года, «бассейновые зоны являются основной единицей управления водными ресурсами и состоят из речных бассейнов и связанных с ними подземных водных объектов на территории Республики Таджикистан» [104]. В Таджикистан установлены следующие бассейновые зоны (рисунок 3.17): Сырдарьинская; Зеравшанская; Пянджская; Вахшская; Кафирниганская.



**Рисунок 3.17 – Главные речные бассейны**

«Гидрографическую сеть Таджикистана составляют более 25 тысяч рек общей протяжённостью 69,2 тыс. км. Из них 947 рек имеют длину от 10 до 100 км, 16 рек - от 100 до 500 км и 4 реки длиннее 500 км» [105].

Карта главных рек Таджикистана с месяцами наибольшего речного стока показанная на рисунке 3.18, составлена нами с использованием существующих карт [106-107]. Состояние гидрологической сети и карта расположение сеть гидрологических наблюдений показано на таблице 3.3 и рисунке 3.19.



Рисунок 3.18 – Месяцы наибольшего стока рек Таджикистана



Рисунок 3.19 – Гидрологическая наблюдательная сеть Республики Таджикистана

Таблица 3.3 – Состояние гидрологической сети [108]

Бассейн реки	Кол. гидропостов	Набл. за уровнем воды	Измерение расход воды	Кол. временно закрытых гидропостов	Замыкающий створ (вид наблюдение)
Сырдарья	6	4	3	2	р. Сырдарья – Кызылкишлак (уровень и расход воды)
Пяндж	43	41	13	2	р. Пяндж – Ниж. Пяндж (уровень воды)
Вахш	18	16	12	2	р. Вахш – зап. «Тигровая балка» (уровень и расход воды)

Продолжение таблицы 3.3

Кафиниган	13	12	8	1	р. Кафирниган – Тартки (уровень и расход воды)
Зерафшан	16	16	13	0	д. Зеравшан – Дупули (уровень и расход)
<b>Всего по Республики</b>	96	89	49	7	

### 3.1.2. Гидрологические и климатические условия Таджикистана

Реки Таджикистана имеют снеговое, снегово-дождевое, снегово-ледниковое и ледниково-снеговое питание» (рисунок 3.20) [95].

**Реки ледниково-снегового питания.** Вахш, Бартанг, Гунт (рисунок 3.21 а, б), Обихингоу, Шахдара, Ванч, Язгулем, Зеравшан, Фандарья, Ягноб, Искандердарья, Магиян, Кштут, Сырдарья и Исфара являются реками данного типа, которые начинаются высоко в горах, где постоянно скапливаются ледники и снег. На высокогорном Памире-Дарвазе находится источники р. Вахш и Пянджа являющийся главными притоками Амурдарьи. На июль и август приходится наибольший сток воды, в основном за счет таяния снегов и ледников [95].

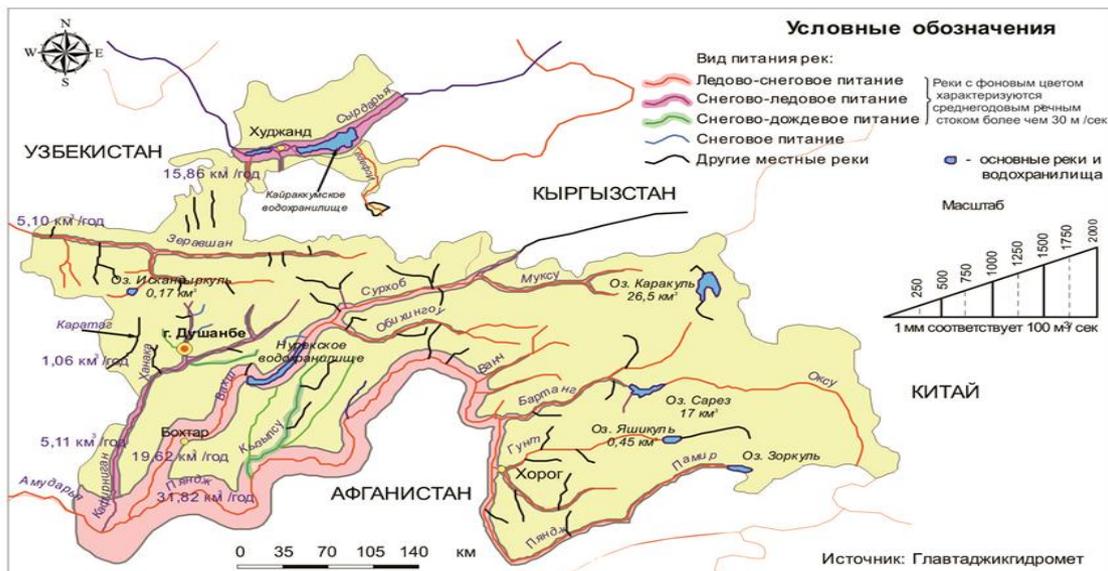


Рисунок 3. 20 – Среднегодовой речной сток за 1961- 1990 гг. рек Таджикистана [109]



а)



б)

Рисунок 3.21 – Средний расход воды р. Вахш (а) и Гунт (б) по десятилетиям [110]

**Реки снегово-ледникового питания.** К рекам этого типа относятся Кафирниган (рисунок 3.22), Варзоб (рисунок 3.23), Каратаг, Шеркент, Ханака и Сангикар. На май и июнь приходится наибольший сток. **Реки снегово-дождевого питания.** Кызылсу (южная) и Яхсу (наибольший сток в марте-мае) являются реками данного типа [95].



Рисунок 3.22 – График годового стока реки Кафирниган в Таджикистане с 1940 г. по 2010 г [74]



Рисунок 3.23 – График годового стока реки Кафирниган в Таджикистане с 1940 г. по 2010 г [74]

**Реки снегового питания.** К данному типу относятся небольшие притоки в среднем и нижнем течение р. Кафирнигана, Иляка, Лучоба и Варзоба (Гурке). В Таджикистане кроме того имеются формирующиеся от родников речки [95].

По морфологическим признакам и по характеру хозяйственного использования горные реки подразделяются на четыре основных участка: высокогорный (выше 3500 м, н.у.м.), горный (1600-3500 м, н.у.м.), предгорный (900-1600 м, н.у.м.) и долинный (300 - 900 м, н.у.м.).

«Последнее десятилетие оказалось самым тёплым, с увеличением температуры поверхности планеты почти на 1°С» [64].

«Согласно региональным исследованиям изменения температуры, в ЦА произошло потепление климата. Сопоставление температур поверхности в течение двух периодов – 1942–1972 гг. и 1973–2003 гг. - показывает, что среднегодовая температура увеличилась на 0,5°С» [111].

МГЭИК отмечает, что «за последнее столетие средняя температура воздуха на поверхности земли в ЦА увеличилась с 1°С до 2°С» [112-113].

«Метеорологические данные по двум горным странам – Кыргызстану и Таджикистану показывают чёткую тенденцию потепления. За последние 50–70 лет температура в горных районах этих стран увеличилась в среднем на 0,3°С–1,2°С» [70, 112, 114].

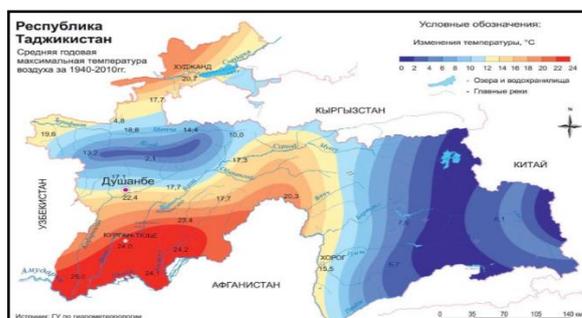
Для наглядности ниже на рисунке 3.24 приведены данные среднегодовой максимальной температура воздуха в РТ за период 1940-2010 гг.

По температурным показателям воздуха в Республике Таджикистан за период 1990-2012 гг. (рисунок. 3.25) присутствует отклонение в сторону повышения [115].

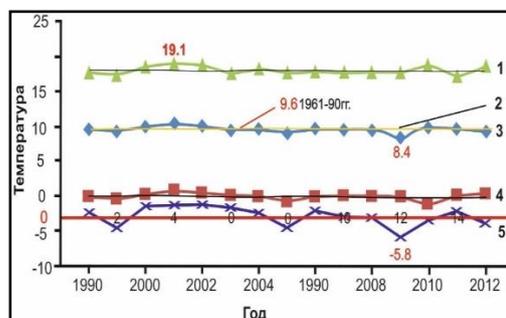
На рисунке 3.25: 1-максимальная среднемесячная температура; 2- многолетняя средняя температура за 1961-1990 гг.; 3-среднемесячная температура воздуха в РТ; 4 - отклонение среднегодовой температуры от средней многолетней температуры; 5 - минимальная средняя месячная температура.

«Срединный прогноз изменений в средних годовых температурах предполагает увеличение на 4,0°С к 2100 году.

Тенденция потепления ускорила свой ход, и каждые десять лет с 1970-х гг. наблюдалось повышение температуры в среднем: на  $0,15^{\circ}\text{C}$  зимой,  $0,3^{\circ}\text{C}$  - весной, без изменений – летом и на  $0,2^{\circ}\text{C}$  – осенью. В высокогорьях тенденция потепления отмечалась каждые десять лет и составила  $0,2^{\circ}\text{C}$ » [116].



**Рисунок 3.24 – Среднегодовая максимальная температура воздуха в Таджикистане за период 1940-2010 гг.**



**Рисунок 3.25-Максимальная среднегодовая температура воздуха в Таджикистане с 1940 по 2010 гг. [31]**

«На равнинной территории РТ, за десятилетие, среднегодовая температура увеличилась на  $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$  с наибольшим увеличением температуры на  $0,5-0,8^{\circ}\text{C}$  в п.г.т. Дангара и в г. Душанбе, в горных регионах на высоте от 1 000 до 2 500 метров н.у.м. на  $0,3-0,5^{\circ}\text{C}$ , а в районах, выше 2 500 метров н.у.м., увеличение составило  $0,2-0,4^{\circ}$ » [112].

«Согласно климатической модели, к концу века в южной области РТ, а также в горах Центрального Таджикистана и в западной части Памира, по сравнению с базовым периодом 1961–1990 гг вероятность резкого повышения температуры составить около  $5^{\circ}\text{C}$ » [112, 32].

Ниже приведены данные «Наблюдаемые изменения климата и сценарии для Центральной Азии» [112]. Таблица составлена на основании Национальных сообщений Казахстана (2013г.), Кыргызстана (2009г.), Таджикистана (2014г.), Туркменистана (2015г.), Узбекистана (2008г.). См. таблицы 3.4 и 3.5.

«Изменение климата негативно сказывается и на развитии озер, что отражается в интенсивном таянии вечной мерзлоты, разрушении плотин озер, а также ливневыми осадками в

высокогорной зоне, являющимися дополнительным фактором, способствующим таянию ледников» [117].

Таблица 3.4 – Данные изменения климата для Центральной Азии

	Казахстан		Кыргызстан		Таджикистан		Туркменистан		Узбекистан	
	Н	С	Н	С	Н	С	Н	С	Н	С
Темп.	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Экстр. темп. (+)	↑	↑	⊗	⊗	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Осадки	↑↓	↑↓	↑	↑↓	↓	↑↓	↓	↓	↑	↑
Экстр. осадки	↑↓	↑↓	⊗	↑↓	↑	⊗	⊗	⊗	↑	↑↓

	Тенденция увеличения		Тенденция уменьшения	Н - Наблюдения
	Смешенная тенденция		Нет данных	С - Сценарий.

Таблица 3.5 – «Прогнозируемое воздействие изменения климата на ключевые секторы Центральной Азии при различных уровнях глобального потепления» [54]

	1° C (≈2010)	1,5° C (≈2030)	2° C (≈2030)	3° C (≈2030)	4° C (≈2030)	5° C
Экстремальная жара	Повреждение земель	15%	30%	70%	80%	
Ледники	Потеря массы ледников Тянь-Шаня на 31%		31-66%	54-57%	50-78%	
Вода		Снижение годового стока в Центральной Азии на 41% Сдвиг** 30-60 дневного пика в бассейне р. Сырдарьи		Снижение водосбора и стока воды в Центральной Азии на 41%		
Продовольствие		20-57%-ая потеря урожая в Узбекистане	Угроза урожаю пшеницы в Казахстане термическим стрессом	Угроза урожаю пшеницы в Казахстане опустыниванием	30%-ая потеря урожая в Таджикистане	
Здоровья			Десятикратное увеличение селеопасности в Казахстане			
Энергетика		2,58%-ое увеличение гидроэнергетического потенциала в Центральной Азии				

\* По сравнению с температурами доиндустриального уровня  
\*\* С весеннего/раннелетнего к позднелетнего/ранневесеннего режима стока

Источники: М. Куртубадзе, ГРИД-Арсенал, 2016, Reyer и др., 2015г.

«Площадь оледенения РТ может уменьшиться по сравнению с настоящим временем на 15-20%, а запасы воды в них на 80-100 км<sup>3</sup>. При этом деградация оледенения может сильнее всего

отразиться на режиме рек Зеравшан (рисунок 3.26), Кафирниган, Каратаг, Обихингоу» [64].

«Наравне с таянием ледников срединные прогнозные изменения в интенсивности ливневых осадков к 2100 г сдвигаются в сторону увеличения на 17%, а частота обильных осадков увеличится на 13%. При этом количество дождевых осадков увеличится, а количество снежных осадков уменьшится» [118].



Рисунок 3.26 – Деградация ледника Зерафшан [64]

Ниже, с учётом полученных данных изложенных в главе 1, рассмотрены опасные гидрологические явления в РТ, в условиях изменения климата.

### **3.2. Современное состояние опасных гидрологических явлений гидрометеорологического характера в Республике Таджикистан**

Республика Таджикистан (РТ) является одной из стран, наиболее подверженных опасным гидрологическим явлениям засухам (летний период) и оползням, селям, наводнениям (весенний период) вызванные проливными или долговременными дождями. Ведущая роль в развитии стихийных бедствий в Таджикистане (суммарно – до 73% ЧС) в условиях изменения климата отводится к метеоклиматическим факторам [49].

Установлено, что территория Таджикистана наиболее подвержена опасным гидрологическим явлениям [119].

«Стихийное бедствие - это различные природные явления, которые могут возникать внезапно и приводят к нарушению нормальной деятельности людей, разрушению и уничтожению материальных ценностей, гибели людей и животных. Предупреждение и предотвращение опасных природных явлений даёт возможность заранее готовиться к ним, предотвратить их разрушительные последствия и обходиться с экономической стороны более выгодно, чем ликвидация того, к чему приводят чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера» [120].

Значительный урон населению и территории горных стран, уязвимые к многочисленным рискам, связаны именно с георисками - опасными природными явлениями.

«Существенное влияние на основные климатические характеристики и интенсивность проявления опасных гидрометеорологических явлений оказывает изменение климата» [121].

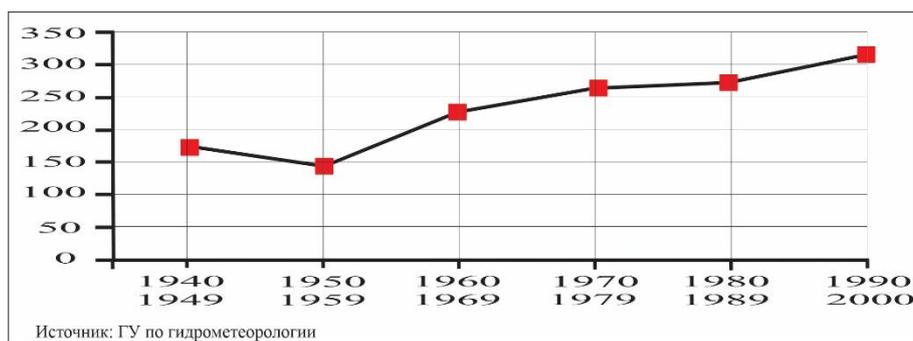
Основные типы опасных природных процессов в РТ приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Типы опасных природных процессов

Опасные природные явления	
Класс	Вид
Гидрологические и метеорологические	Наводнения, засуха, морозы и заморозки, снегопад, осадки, град, ветер, лавины, опустынивание, высокие грунтовые воды
Геологические	Сели, оползни, землетрясения, камнепады.

Ниже рассмотрены основные виды опасных природных процессов.

**«Экстремально высокие температуры.** С ростом максимальных температур увеличивается число дней с температурой, равной +40°C и более (рисунок 3.27). Самые высокие температуры за исследуемый период наблюдались в южном Таджикистане в 1944 и 1997 гг., когда дневная температура воздуха была +45-47°C» [70].



**Рисунок 3.27 – Общее количество дней с температурой выше 40° С. (Южный Таджикистан, Шаартуз).**

Средняя годовая максимальная температура в 2000-2004 гг. повысилась на 0.5-1°С. Минимальные, особенно в летне-осенний период, также повсеместно повысились, на 0.5-2.0°С. При этом, темпы повышения минимальных температур опережали темпы роста максимальных. Следует отметить, что увеличение среднегодовой температуры воздуха на 0.7-1.2°С отмечено в широких долинах Таджикистана, где проживает большая часть населения, тогда как в горных и высокогорных районах отмечено небольшое повышение температуры - 0.1-0.7°С. Особенно значительное повышение температуры наблюдалось в больших городах - до 1.2-1.9°С. Резкое повышение температуры и на фоне этого суровая засуха были зафиксирована в 2000-2001 гг. [122].

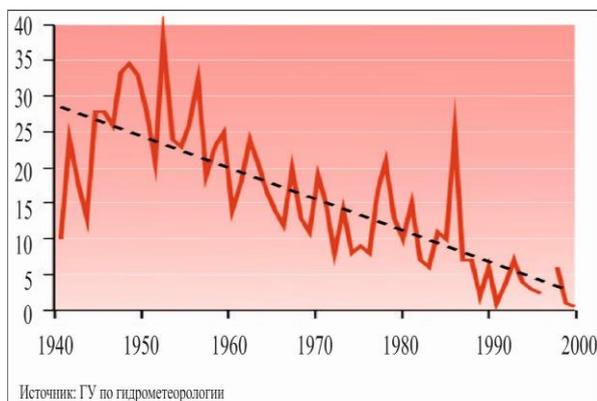
**Пыльные бури и мгла.** Одним из наиболее подверженного влияния этого бедствия регионом является Центральная Азия, поскольку пылевые бури здесь более распространены, чем в других засушливых регионах [123].

Пыльные бури на крайнем юге республики наблюдаются 24-29 дней в году, на востоке и юге Памира - 18-14 дней в году, на остальной территории в среднем за год отмечено 1-9 дней. Наиболее продолжительны пыльные бури отмечены также на юге, например, в Айвадже летом в 15-20 % всех случаев они длятся более 20 часов.

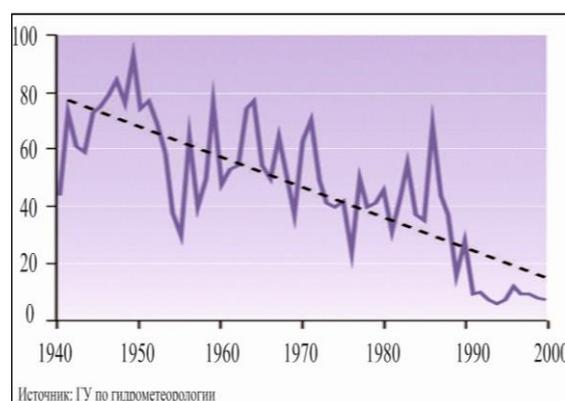
Мгла, поднятая пыльными бурями, держится в воздухе после прекращения бури и переносится сильными ветрами средней тропосферы на большие расстояния. Поднятые в воздух крупные частицы быстро выпадают, а мелкие долго витают в воздухе, создавая мглу. При этом дальность видимости снижается до 4-10,

иногда и до 2-4 км. Вертикальная мощность слоя мглы может достигать 3-4 км, при этом концентрация частиц пыли на высоте 1.5 м, по нашим измерениям, может составлять до 8.4/см<sup>3</sup>. Число дней с мглой увеличивается к югу. В Северном Таджикистане отмечается до 10 дней с мглой в год, в Гиссарской долине - до 20-27, на юге республики до 40-70. По долинам рек мгла проникает далеко к востоку (в Гарме до 26 дней с мглой). На Памире мгла бывает сравнительно редко - 3-6 дней в году [124].

«На территории РТ пыльные бури с наибольшей повторяемостью в летне-осенний период, распространены неравномерно и в основном наблюдаются в южных пустынях и полупустынях, особенно в Шаартузе» (рисунок 3.28). Количество дней с мглой в Шаартузе показано на рисунке 3.29 [64].



**Рисунок 3.28 - Количество дней с пыльной бурей. (Южный Таджикистан, Шаартуз)**



**Рисунок 3.29 - Количество дней с мглой. (Южный Таджикистан, Шаартуз)**

**Лавины.** «Высокогорные районы Таджикистана характеризуются распространением снежных лавин, наносящие колоссальный ущерб секторам экономики и ведущие к человеческим жертвам» [70].

Снежные лавины, в Таджикистане, сходят в зоне выше 1500 – 2000 м над уровнем моря, а основными факторами их формирования являются наличие склонов крутизной 30-50°, мощность снежного покрова более 30 см и соответствующая метеорологическая ситуация. Главной причиной формирования лавин в Таджикистане является свежавывающий снег (60-70%). Лавинная опасность наблюдается обычно наблюдается в период с

ноября по апрель, а иногда и в мае. 27 января 2006 года была объявлена чрезвычайная ситуация в Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО), где за предшествующие 6 дней в районах области было зарегистрировано более 200 сошедших лавин различной интенсивности. Наибольшую угрозу лавины представляют в марте. Самые лавиноопасные районы Таджикистана: Западный Памир, Дарваз, Каратегин, южный склон Гиссарского хребта [125].

Лавиноопасные районы составляют от 30000 до 40000 лавиноопасных участков и занимают около 75% территории страны. Несмотря на то, что причины формирования лавин хорошо известны, спрогнозировать их сход часто оказывается невозможным. Внезапность этого природного явления очень часто приводит к гибели людей и разрушению сооружений инфраструктуры. Известны случаи, когда снежные лавины полностью разрушали жилые постройки (населенные пункты Джиргиталь, Хоит, Гарм, Шугнан и др.), повреждали мосты и останавливали транспортные передвижения в течение длительного периода - дороги к южному входу туннеля «Истиклол», к перевалам Анзоб, Шахристон и Хабуробод. Из-за лавинной опасности каждую зиму происходит прекращение движения на важнейшей автотрассе Душанбе-Худжанд [126-127].

Ниже приведены случаи схода лавин за 2022-2023 гг. по данным КЧС и ГО ПРТ (источник: [kchs.tj](http://kchs.tj)):

- 3 января 2022 года на 61, 62, 63, 65, 66, 69 и 70 км автодороги Душанбе-Варзоб, пролегающие к территории Майхуры, Хушёри и Уштур Варзобского района и на 6, 7, 8 км местечка Ниводак, а также на 15 км местечка Гожак сельского джамоата Гарибшох Шахбозов Шугнанского района и 498 км местечка Санобод сельского джамоата М.Абдулвосиев Рушанского района ГБАО были зафиксированы сход лавин;

- 6 января 2022 года, на 92 км автодороги Рушан-Бартанг, пролегающая через село Савноб сельского джамоата Савноб Рушанского района ГБАО выпавший снегопад и затем оттепель, стали причиной случая схода лавины, перекрывшая автодорогу;

- 16 января 2022 года на 62, 64, 65, 66, 68, 69, 70, 72, 73 и 74 км автодороги Душанбе-Варзоб, пролегающих через территорию Майхуры, Хушёри и Уштур Варзобского района были зафиксированы сход снежных лавин;

- в начале февраля 2022 на территориях Рушанского, Шугнанского и Ишкашимского районах ГБАО зафиксированы 10 случаев схода снежных лавин;

- 23 февраля 2022 года на 42, 43 и 51 км дороги Хорог – Ишкашим, пролегающая через территорию местечка Бижур сельского джамоата Аскар Замиров Ишкашимского района, 29 км данной автодороги, проходящая через Барчадеф сельского джамоата Гарибшох Шахбозов Шугнанского района и 558 км автодороги Душанбе-Хорог, расположенной на территории Рушанского района ГБАО зарегистрированы сход 6 лавин;

- 24 февраля 2021 года на 67 км автодороги Душанбе – Варзоб и на автодороги Хорог-Мургаб были зафиксированы сход снежных лавин. На 550 км автодороги Душанбе-Хорог на территории Рушанского района ГБАО в 5:30 утра 25 февраля 2021 года зарегистрирован сход лавины;

- в конце февраля на территории села Лайрон сельского джамоата Сангвор Сангворского района сошла лавина, перекрыв русло реки Рангнов. Перекрытие русла реки не представляла опасности, но население села были предупреждены. Также, сход лавин были зафиксированы на территории Ишкашимского и Мургабского районах ГБАО;

- 8 марта 2022 года примерно в 16:10 местного времени на 550 км автодороги Душанбе- Хорог на территории села Пастхуф сельского джамоата Пастхуф Рушанского района ГБАО сошла лавина;

- 8 марта 2022 года на 63, 64, 66, 68, и 72 км автодороги Душанбе - Варзоб, пролегающих через территорию Майхуры, Хушёри и Уштур Варзобского района были зафиксированы сход трех снежных лавин;

- 9 марта 2022 года в 01:00 минут на 48 км данной автодороги Душанбе-Варзоб, вновь был зарегистрирован сход лавины;

- 11 марта 2022 года на 64, 65 и 66 км автодороги Душанбе - Варзоб, 154 и 165 км дороги Душанбе – Айни, а также на 8 км автодорог Хорог-Ишкашим и 622 км Хорог-Мургаб были зафиксированы сход снежных лавин, в результате чего, временно было закрыто движение автотранспорта на данных автотрассах.

- 5 января 2023 года на отрезке от 2 то 27 км автодороги Рашт - Сангвор, пролегающий через территорию местечка Лаби-Джар Сангворского района из-за обильных осадков был зарегистрирован сход лавины;

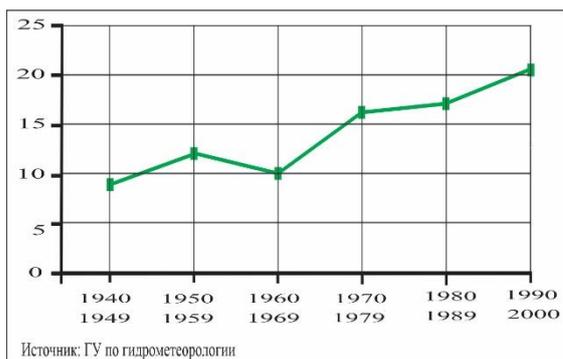
- 9 января 2023 года в 18:37 минут местного времени на 80 км автодороги Душанбе- Худжанд был зарегистрирован сход лавины, в результате чего дорога была блокирована;

- 10 января 2023 года на 67, 68, 69, 70 и 71 км автодороги Душанбе - Варзоб были зафиксированы сход пяти снежных лавин.

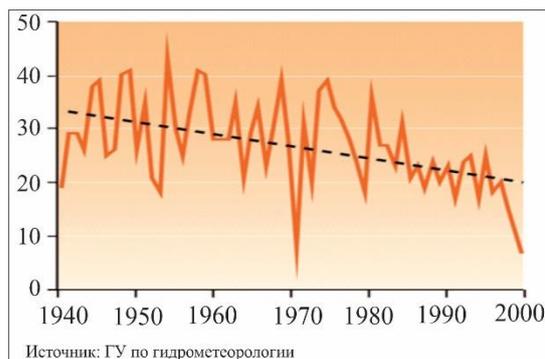
**Интенсивные осадки.** В большей части Таджикистана особенно в центральных высокогорных районах число дней с осадками интенсивностью 5 мм и более увеличилось, количество дней с сильными осадками (30 мм в день) в Гиссарской долине и других предгорных районах возросло. В тоже время, при увеличении числа дней с дождём (рисунок 3..30), наблюдается уменьшение количества дней со снегом [70].

**Гроза.** «Наибольшее количество дней с грозами наблюдалось в центральном (Душанбе, 1954г. - 43 дня) и южном (Курган-Тюбе, 1963г. - 24 дня) Таджикистане. Однако, за последние 15-25 лет их число значительно уменьшилось (рисунок 3.31)» [64].

Ожидается, что интенсивность выпадения сильных осадков повысится в связи с увеличением способности теплой атмосферы удерживать водяной пар. Под экстремальными осадками подразумевается суточное количество выпадающих осадков более 20 мм. Прогнозы демонстрируют тенденцию к увеличению количества экстремальных осадков. Согласно сценарию РТК 8,5, многомодельное среднее значение количества дней с интенсивными осадками указывает на увеличение примерно на 1 день, а к 2080 году - на 3,5 дня [128].

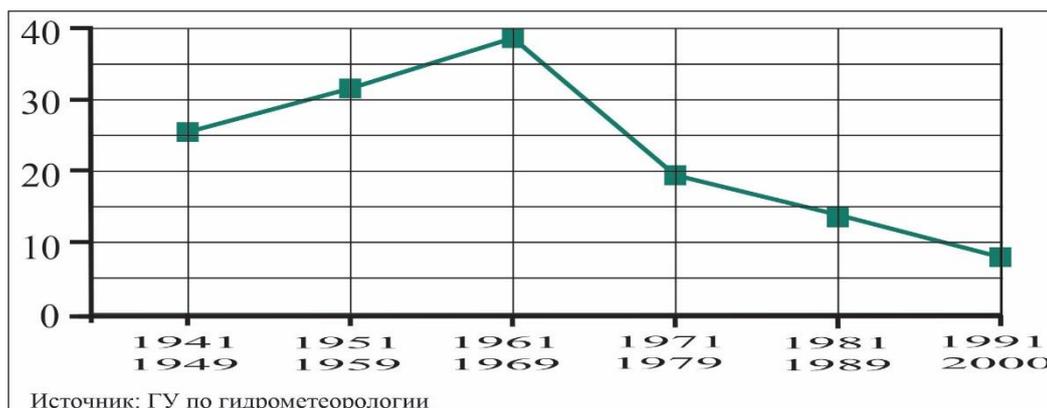


**Рисунок 3.30 - Сумма полусуток с сильным дождём**



**Рисунок 3.31 - Количество дней с грозой**

**Сильный ветер.** Сильные ветры часто наблюдаются в Северном Таджикистане, в Шаартузе, Нижнем Пяндже и Восточном Памире наблюдаются ветры со скоростью 20 м/с ежегодно наблюдаются. А в Центральном Таджикистане подобные ветры наблюдаются в Файзабаде. **Град.** «В период 1941-1970 гг. по всей территории Таджикистана отмечались довольно частные случаи выпадения града (рисунок 3.32)» [70].



**Рисунок 3.32 – Сумма дней с градом**

**Наводнения** - быстрое затопление при половодьях, паводках, прорывах дамб, плотин и т. д. значительной территории водой выше нормальных уровней.

Наводнения в зависимости от причин затопления территорий разделяют на два вида: наводнения вызванные естественными природными причинами и наводнения, вызванные хозяйственной деятельностью человека (антропогенные наводнения) [129]. Наводнения принадлежат к числу наиболее опасных для человека природных явлений. По величине ущерба и числу жертв в XXI в.

наводнения занимают первое место среди всех стихийных бедствий [130].

Изменение температуры являются основными факторами возникновения весенних наводнений, способствующие таянию ледников, с одновременным, значительным выпадением осадков (весна и осень).

Отрицательными факторами воздействия наводнений являются:

- быстрый подъем воды и резкое увеличение скорости течения;

- низкая температура воды, пребывание в которой людей приводит к заболеваниям и гибели;

- снижение прочности и срока службы жилых и производственных зданий;

- смыв плодородной почвы и заиливание посевов;

- разрушения гидротехнических сооружений, в том числе берегоукрепительных сооружений, водохозяйственной инфраструктуры и т.д.

Наводнения также приводят к ухудшению качества поверхностных вод в связи со смывом продуктов эрозии в бассейнах рек, с заилением водохранилищ, с ростом грязевой нагрузки на очистные сооружения и с увеличением объема плавающего мусора и другие [131].

Паводок - сравнительно кратковременное и непериодическое поднятие уровня воды в реке, возникающее в результате быстрого таяния снега при оттепели, таяния ледников, обильных дождей и т. д.

Причины паводков и наводнений на реках в основном связаны с интенсивностью и продолжительностью выпадающих осадков в речных бассейнах [132].

В районе Хамадони в 2005 году, паводок (рисунок 3.33) полностью разрушил 136 домов; более 2000 человек лишились своих домов и более 6.5 тыс. человек пришлось эвакуировать. А в Пенджикентском районе (рисунок 3.34), ущерб составил на сумму более 50 миллионов долларов» [133].



Фото ПУРПК ПРООН

**Рисунок 3.33 – Наводнение в районе Хамадони в 2005 г.**



www.jumhuriyat.tj

**Рисунок 3.34 - Пенджикентский район, 2016 г.**

**Сели и прорыв ледниковых озёр.** «Сель из арабского языка переводится как «бурный поток» или иначе «селевой поток» это стремительный русловой поток, состоящий из смеси воды и обломков горных пород, внезапно возникающий в бассейнах небольших горных рек. Главной особенностью таких потоков является высокая насыщенность обломочным материалом, которая составляет от 10 до 75% объёма движущейся массы» [134].

Как правило, возникновение селей связано с ливневыми осадками, бурным таянием снегов или прорывами горных озёр. Сель - явление кратковременное (обычно оно длится несколько часов, реже - дней), характерное для малых водотоков длиной до 25-30 км и с площадью водосбора до 50-100 км<sup>2</sup>[135].

«В понятие «прогнозирование селей» входят такие задачи как общая оценка селеопасности данной горной территории, установление границ селеопасных участков, зон транзитного движения селей и участков аккумуляции, определение степени

селеопасности данного бассейна или группы бассейнов с качественной и количественной оценкой условий, определяющих формирование селей и их потенциальные характеристики и др.» [136].

«Повышение, в горах, летних температур ведёт к увеличению риска возникновения селей гляциального происхождения и наводнений из-за ускоренного таяния снега» [64].

В соответствии с наблюдениями метеорологов за последние 20 лет частота и интенсивность стихийных гидрометеорологических явлений в Таджикистане возросла. К 2030 г. число ежегодных селей, паводков, прорывов озёр может увеличиться на 18% [137].

### **3.3. Основные факторы селеформирования в Таджикистане. Классификация, типология и анализ селевой безопасности**

«Сель - поток, состоящий из трёх компонентов: твёрдый, жидкий и газообразный. Количественные данные о его влиянии на реологические характеристики селевой массы (из-за сложности их экспериментального определения и малой практической значимости) практически отсутствуют. Основное внимание при изучении свойств селевой массы уделяется твёрдому и жидкому компонентам» [138].

Вопросы исследования селевых явлений изучались в работах С. Ашурова, В.П. Благовещенского, Ю.Б. Виноградова, В.А. Волосухина, М.С. Гагошидзе, С.А. Ерохина, В.В. Загинаева, Б.Д. Зайкова, Э.В. Запорожченко, Х.А. Исмагилова, А. Р. Медеу, В. Ф Перова, С.Г. Рустамова, Д.Л. Соколовского, Б.С. Степанова, Е.А. Таланова, А.Р. Фазылова, С.М. Флейшмана, Г.И. Херхеулидзе, С.С. Черноморца, А.А. Яблокова, М.Р. Якутилова, Р.К. Яфязовой и др.

Формирование селей происходит из-за: кратковременных, в тоже время интенсивных ливневых дождей; продолжительных дождей; снеготаяния, прорыва горных и ледниковых озёр; значительных уклонов русла и склонов бассейнов горных рек и скопления в них смываемого рыхло-обмолочного материала [139].

Значительное влияние оказывает также изменение климата. В частности, специалистами в соответствии со сценарием изменения климата прогнозируется, повышение температуры в республике до 2050 года ожидается в среднем от 1,8 до 2,9 °С [140].

Селевые потоки отличаются движением отдельных волн, с выносом сотни тонн вязкой массы, обладая при этом большой массой и высокой скоростью [141-147].

Различное геологическое строение, различный характер почвенного и растительного покрова, в сочетании с процессами физического и инсоляционного выветривания, различное увлажнение районов, непосредственно связанное с их орографией и экспозицией склонов, определяют различную повторяемость, интенсивность и тип селевых потоков. Одним из основных факторов, определяющих формирование селевых потоков, является предшествующее увлажнение селевого бассейна. В тесной зависимости от него находится и необходимое для селевого потока количество осадков. В различных бассейнах одного района суточное количество осадков необходимое для образования селей варьирует от 20 до 80 мм. Причиной этого следует считать различное геологическое строение и развитость почв [148].

Образование селевых потоков на той или иной территории Таджикистана зависит от многочисленных природных факторов: геологического строения бассейна, петрографической особенности горных пород, слагающих его склоны; тектонических явлений; высотного положения бассейна; характера почвенного (в основном, степени эродированности почв) и растительного покрова бассейна; климатической характеристики бассейна (количество выпадающих осадков, их интенсивность и распределение в течение года, температурный режим, влажность воздуха и прочие). Немаловажное, а в некоторых случаях решающее значение в проявлении селевой деятельности на той или иной территории имеет и хозяйственное использование земель бассейна. Следует отметить что, однако ни один из приведенных выше факторов взятый в отдельности, не свидетельствует еще о селеопасности того или иного бассейна. Только совокупное их

действие определяет способность бассейна к селеобразованию [149].

Карта распространения селей с указанием исследованных нами объектов селепроявлений показаны на рисунках 3.35 и 3.36.

Классификация селевых явлений: **Дождевые** - сели образующийся в результате размыва склонов и появления оползней, где первопричиной являются ливни и затяжные дожди; **Гляциальные (снеговой и ледниковый)** - сели образующийся в горных районах при интенсивном таянии снега и льда; **Сейсмогенные** - в районах высокой сейсмичности. Срыв грунтовых масс со склонов; **Антропогенные** - сели образующийся при нарушении почвенно-растительного покрова, некачественных плотин, техногенных пород и другие; **Смешанные** - питания селевых паводков дождевыми и талыми водами.

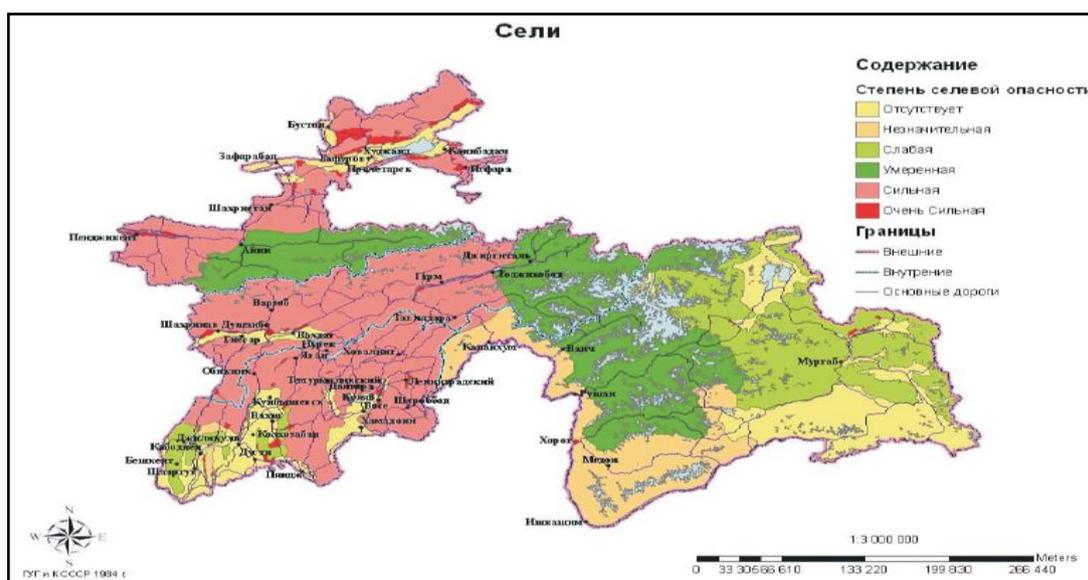
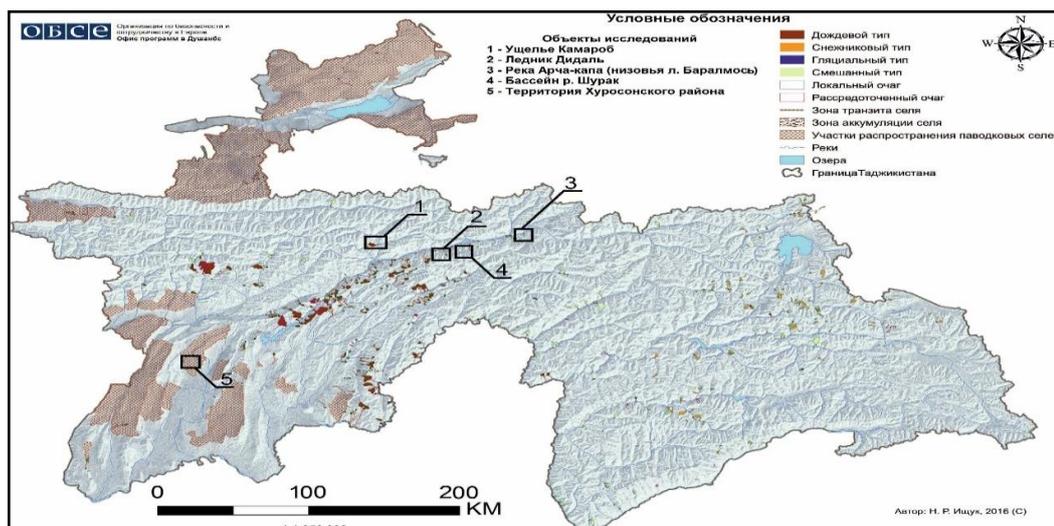


Рисунок 3.35 – Карта распространение селевых явлений 1984 года

Следует отметить, что с 1951-1988 гг. на территории Таджикистана причинами образования зафиксированных селей были сели дождевого генезиса – 78%, смешанного генезиса- 19%, и гляциального и прорывного происхождения - 3% [150].

В связи с глобальным потеплением климата ведущего к увеличению частоты и мощности стихийных явлений, мониторинг, оповещение и защита от них должны являться составной частью программ развития экономики и безопасности населения [151].



**Рисунок 3.36 – Объекты исследования селепроявлений.** 1 - Ущелья Камароб, 2 - ледник Дидаль 3 - р. Арчакапа (Сай Арчакаппа) являющимся притоком р. Сурхоб питающийся ледником Баралмось, 4 - бассейн р. Шурак, 5 - территория схода селевого потока в Хуросонском районе (Использована карта Н. Р. Ищук 2016г.)

Таяние снега не вызывает значительных селей. Но в районах большого скопления многолетнего снега, возможно образование небольших снежниковых селей. В Таджикистане сели, как правило, происходят весной в предгорьях и долинах. В горах и высокогорьях селевые потоки обычно возникают летом, когда начинается снеготаяние [134].

Установлено, что в засушливых районах осадки свыше 15-20 мм в день могут спровоцировать сход селей [127].

Для образования селей необходимо также наличие интенсивного ливня или продолжительного обложного дождя. В первом случае рыхлый грунт сбрасывается, поверхностным стоком, со склонов в русло саев или основной реки. Во втором случае рыхлый материал переувлажняется, приобретает свойство текучести и в виде отдельных грязевых оплывин, оползней-потоков попадает в русла. Перекрывая русла рек, они образуют завалы, которые разжижаясь, превращаются в селевые потоки часто достигающихся катастрофических размеров. Наибольшее количество селей приходится месяцы с наибольшим количеством

жидких осадков - май и июнь. Подобным селям характерны максимальные расходы - от 7 до 1160 м<sup>3</sup>/сек [148].

Классификация территории РТ по рискам селепроявлений, осуществляется с учетом расположения рассматриваемой зоны по высотным показателям.

Не высокие холмы (адыры) с покато - энглифической, иногда с плоской вершиной, выстланные лёссом или слабовыраженными слоями щебня, с однолетними и пустынными растениями, расположены в основном в предгорной зоне. Специфической особенностью рассматриваемой зоны это ежегодные или несколько раз в течение года селепроявления (март-июнь, сентябрь, октябрь), основным фактором формирования которых являются проливные (ливневые) дожди. *Сели в предгорной зоне в большинстве своем проходят по высохшим руслам и глубоким, крутосклонным незадернованным ложбинам (овраги).*

В отличие от предгорных зон в *среднегорной зоне* крупность наносов и их насыщенность, транспортируемых селевым потоком, увеличивается, а повторяемость составляет один раз за период от 3 до 5 лет (апрель-июнь). Но причиной формирования селя, также, как и в предгорной зоне являются ливневые дожди и селевой поток проходит по постоянному водотоку (суходольные русла).

*Высокогорная зона*, сильно расчленённый горный массив, значительные площади отличаются наличием морен, осыпей, скал характерна наличием большого количества зон формирования селевых потоков.

«Селевые потоки в предгорной и среднегорной зонах, чаще всего затухают до выхода из гор, но наиболее мощные транспортируются в долинную часть, нанося ущерб народному хозяйству. Условия возникновения и характер проявления селей различны для высокогорий, находящихся в западной части республики, примерно до меридиана 71° (Гиссаро - Дарваз), высокогорий восточнее этого меридиана (Западный Памир)» [95].

Согласно С.М. Флейшмана [136] селевые районы Таджикистана дислоцируются в бассейнах рек Зерафшана, Сурхоб, Обихин-гоу, на южном склоне Гиссарского хребта, Южно-Таджикском нагорье (реки Варзоб, Вахш, Пяндж и др.).

Значительное развитие, селевые процессы получили на Памире и в Дарвазе (бассейны рек Пяндж, Ванч и Гунт).

Относительно внутригодового (по месяцам) распределения селепроявлений, то установлено, что в Таджикистане, она выглядит следующим образом: в апреле - 35%, мае - 28%, в июне - 14% а на остальные месяцы приходятся 18% селей [152].

При этом выявлено, что 573 селевых очага, из которых 338 вызваны дождем, 148 снегом, 8 ледниками и 79 смешанного типа (перечисленные выше элементы). Из них 194 являются опасными, в результате, которого может быть причинен значительный ущерб инфраструктуре [127].

В соответствие с классификацией Государственной службы наблюдений Управления "Таджикглавгеология", долины рек, считающиеся наиболее подверженными паводкам и селям приведены в таблице 3.7).

Таблица 3.7 – Долины рек отнесены к наиболее опасным подверженным паводкам и селям

Область, район	Река
Хатлонская область	Пяндж, Кафирниган, Яхсу, Тоирсу, Кызылсу
ГБАО	Ванч, Язгулем, Бартанг, Гунт, Шохдара
Айнинский	Зерафшан, Фондарья, Ягноб
Аштский	Понгаз, Ошоба,
Пенджикентский	Зерафшан, Могиендара, Шинг, Фороб, Кштут

Из общего количество гидрогеологических процессов за период 1969-2004 гг. 59% - опасные и особо опасные, а остальные потенциально или предположительно опасные. В районах республиканского подчинения зафиксированы 56% угрожающих процессов. В ГБАО количество зарегистрированных угрожающих процессов -13%, а в Хатлонской и Согдийской областях примерно одинаково (15-16%).

Вместе с тем, за период с 1940 по 2017 гг. годовое количество осадков увеличилось на 5% -10%, а также установлено увеличение дождливых дней в том время как количество снежных дней сократилось. Выявлено, что наиболее дождливыми, с более частыми селевыми сходами были 1969, 1998, 1999, 2011 и 2016 годы. На основе анализа по регионам, воздействиям и частоте

стихийных бедствий, стоимость национального ущерба в год в результате изменения климата, ежегодно увеличится с 50,4 млн долл. США в 2014 году до 132,3 млн долл. США в 2030 году [153].

Таким образом, по данным КЧС и ГО РТ в Таджикистане зарегистрировано 1471 (ГБАО - 308 опасных участков, в Согдийской области- 293, в Хатлонской области - 401, в Раштском районе - 223, в Гиссарском - 236 и в городе Душанбе – 10) потенциально опасных участков, где проживают свыше 500 тысяч человек [154, 155].

Следует отметить, что (по данным КЧС), 515 зон из общего количества являются особо опасными, с высоким риском возникновения чрезвычайных ситуаций, где расположены 24 тыс. домохозяйств, проживают 158270 человек. В период 2021-2023 годов из этих опасных зон планируется переселить 664 домохозяйства [156].

Основным фактором, возникновения селей, является сумма осадков. Тогда как, их интенсивность (даже морозящие дожди) не столь важны. При этом в зависимости от геологических условий в бассейне р. Варзоб при 70 - 80 мм, возникают условия для формирования селевого потока, а в бассейнах рек Сурхоб и Обихингоу достаточно суточного количества осадков равного 35-40 мм, где в основном преобладают осадочные породы (глинистые сланцы), перемежающиеся с сильно разрушенными и легко размываемыми красными песчанками.

В бассейне р. Сурхоб и её верховьях как во многих районах Центрального Кавказа (Приэльбрусье) зонами зарождения большинства катастрофических процессов и районами повышенной динамичности ландшафтов являются высокогорные территории [157].

Благоприятными условиями для формирования селей на данной территории являются крутосклонный сильно расчлененный рельеф, значительные уклоны (7-22°) русел постоянных и временных водотоков, наличие значительных объемов рыхлообломочного материала в прирусловых и русловых частях склонов долин [158].

Предпосылки к возникновению обвалов, оползней, подвижек льда, обрушению ледовых стен, айсбергов существуют также и на всех ледниковых озерах, однако более опасными для населения и хозяйства нижележащих долин являются водоемы с большими объемами воды [159].

В большинстве случаев население, проживающее у подножия таких долин, подвергается рискам селевых потоков или опасных паводков, которые образуются в результате прорыва гляциальных высокогорных озер. Очаги образования этих опасных явлений находятся очень далеко от жилых зон, но, к сожалению, люди, проживающие в зоне риска, не осведомлены об этих угрозах и не осознают серьёзность риска [160].

В литературе существуют различные классификации озер. Классификация, разработанная Поповым в 1986 г., включала 4 типа и 10 подтипов озер, в том числе надледниковые, проледниковые контактные, ледниково-моренные и моренные озера, причем два последних расположены на новообразованных, малых ледниковых периодах или более старых моренах соответственно. Классификация Медеу А.Р. со соавторами в 1993 г. включала прогляциальные контактные, термокарстовые, моренно-подпрудные и каровые озера (последние формируются в незамерзающих ледниковых цирках). Позднее эта классификация была изменена Медеу со соавторами в 2013, чтобы провести различие между озерами, образовавшимися на моренах 20–21 веков, и на моренах малых ледниковых периодах или более старых, и включить озера, подпруженные скалами [161].

За последнее столетие возникли многочисленные моренно-подпрудные ледниковые озера, которые стали исследовательскими центрами во многих горных регионах мира [162]

Гляциальные сели – это результат воздействия двух основных групп факторов: постоянно действующих и медленно изменяющихся, а также временно действующих и быстро изменяющихся. К первым отнесены климат и состояние условий подстилающей поверхности, ко вторым – текущие гидрометеорологические условия и случайные процессы: подвижки и обвалы ледников, оползни грунта, обрушения и закупорки

внутриморенных каналов стока, землетрясения, антропогенные воздействия и др. При этом постоянно действующие факторы определяют возможность возникновения и развития гляциальных селевых очагов до критических состояний или же, напротив, их деградацию на различных временных этапах их существования. Временно действующие факторы вызывают непосредственные коллапсы селевых очагов [163].

Формирование гляциальных селей в ряде случаев сопровождалось жидкими осадками. Однако они никогда не играли существенной роли, хотя могли служить дополнительным источником увлажнения морен [164].

Деградация ледников, происходящая в настоящее время в большинстве горных районов мира, приводит к появлению большого количества новых озер. Прорывы ледниковых озер это одно из наиболее разрушительных стихийных бедствий в высокогорье. Их следствием являются селевые потоки и прорывные паводки, распространяющиеся на десятки километров вниз по долинам, уничтожающие инфраструктуру и уносящие человеческие жизни. Размеры озер и объем воды в озерах постоянно изменяются, поэтому использование исторических данных для оценки опасных зон при их прорыве может привести к трагическим ошибкам [165].

Следует отметить, что на северных склонах хребта Петра Первого в последние десятилетия участились сходы селевых потоков разного типа и объёмов. Большинство из них связаны с выпадением аномального количества атмосферных осадков в виде ливневых дождей и града, а также с таянием ледников [166].

В тоже время, для бассейнов рек Южно-Таджикского низкогорья в целом достаточно 40-50 мм суммы осадков для образования селевых потоков.

Климатические изменения на Памире приводят к росту числа опасных геоморфологических явлений [167]. Согласно наблюдений, сели дождевого происхождения на Памире практически не наблюдались, но часто образуются гляциальные сели. 9 июля 1965 г. по руслу Джарф прошёл сель, который за 3 часа отложил 560 тыс. м<sup>3</sup> грязекаменного материала [168].

Отличительными особенностями другого селевого процесса на Памире на р. Барсемдара 16–24 июля 2015 г. являются: сухая жаркая погода, предшествовавшая событию; значительная продолжительность (селевые потоки сходили в течение 9 дней); образование на моренном массиве в интервале высот 3800–4150 м мощного вреза протяженностью около 800 м и максимальной шириной около 140 м, перекрытие р. Гунт селевыми отложениями на высоте около 2 400 м (площадь зоны аккумуляции около 400 тыс. м<sup>2</sup>) и образование подпрудного озера площадью 378 тыс. м<sup>2</sup> и объемом 2,93 млн м<sup>3</sup> [169-170].

Огромный вред селевые потоки наносят жилым домам, автомобильным трассам, пересекающим селевые бассейны, где нередко повреждают асфальтовые покрытия, частично или в некоторых случаях приводящие полностью к закрытию дороги на несколько часов. Сели также приносят большой вред мостам, линиям электропередач, сельско-хозяйственным землям, меняют русла рек и, к сожалению, иногда приводят к человеческим жертвам [171].

### **3.3.1. Селепроявления - стихийные бедствия в Таджикистане**

По данным КЧС и ГО РТ на территории Таджикистана за 2019 г. было зафиксировано 680 ЧС природного характера, 46 из которых нанесли материальный ущерб населению и экономике республики. Из указанных 46 стихийных бедствий - 51,2% (24 случая) составили сели, 17,4% (8 случаев) - сход лавин, 10,9% (5 случаев) - камнепады, 4,3% (2 случая) сильный ветер, 4,3% (2 случая) - оползни, 2,2% (1 случай) - молнии, 4,3% (2 случая) - сильный ветер, 2,2% (1 случай) - повышения уровня воды в реках.

В 2020 г. зарегистрированы 213 чрезвычайных случаев природного характера, в том числе 95 случаев схода лавин, 36 случаев селей, 30 случаев землетрясений, 21 случаев сильных ветров, 9 случаев проливных дождей, 9 случаев камнепадов, 6 случаев оползней, 4 случая подъема уровня воды в водохранилищах и 2 случая грозы. Анализ ЧС в 2021 году, показал, что на территории республики зарегистрировано 359 стихийных бедствий, в том числе: 153 схода лавин, 53 наводнения,

42 камнепада, 40 сильных ветров, 33 землетрясения, 19 подъемов уровня воды в водохранилищах, 8 проливных дождей, 7 оползней. 1 эрозия почвы с обрушением, 1 сильный холод и 1 гроза с молнией. В таблице 3.8 приведены результаты анализа опасных природных явлений за период с 2016-2022 гг.

Таблица 3.8 - ОПЯ за период с 2016 по 2022 гг.

Виды стихийных бедствий	Области			Регионы		Город	Всего по годам						
	ГБАО	Хатлон	Сугд	Рашт	Гиссар	Душанбе	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Землетрясения	1	-	-	-	-	-	1	33	19	25	30	33	21
Лавины	-	-	-	-	1	-	1	720	-	445	95	153	448
<b>Сели</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>34</b>	<b>41</b>	<b>11</b>	<b>80</b>	<b>36</b>	<b>53</b>	<b>109</b>
Камнепады	-	-	3	-	-	-	3	21	6	37	9	42	48
Шкв. ветры	-	-	7	-	-	1	8	13	1	18	21	40	11
Оползни	-	-	2	2	-	-	4	23	1	13	6	7	14

Источник: КЧС РТ (<https://khf.tj/ru/node/285>) <https://khf.tj/ru/sites/default/files/pdf/obzor-ch-p-rt.pdf>, <https://khf.tj/sites/default/files/pdf/ochet-khf-2018.pdf> <https://khf.tj/node/1907>, <https://www.osce.org>

В Таджикистане за 1997-2018 годы произошло 3460 стихийных бедствий. При этом, наиболее распространённым (в среднем 70 ЧС в год) и наиболее смертоносным типом стихийных бедствий в РТ являются сели. Президент Республики Таджикистан, Председатель государственной комиссии по чрезвычайным ситуациям уважаемый Эмомали Рахмон, в своем выступлении в городе Хорог (10.02.2017 г.) отметил, что «С 2002 по 2016 гг., в республике зафиксировано 603 чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного характера. В результате схода селей погибли 38 чел., а ущерб от всех ЧС составил 600 млн. USD, в том числе от селей - более 378 млн. USD (63%)» (Источник: <http://www.president.tj/ru/node/14536>).

Необходимо отметить, что согласно статистическим данным на период 1997-2018 годы общее количество стихийных бедствий имеет тенденцию к сокращению, хотя количество селей несколько увеличилось [172].

Выявлен рост произошедших чрезвычайных ситуаций, но благодаря проведённым предупредительно - профилактическим мероприятиям среди населения, берегоукрепительным и другим защитным работам ущерб от стихийных бедствий сократился на 8,5%. Но к сожалению, в 2019 году, в результате стихийных бедствий погибли 22 граждан, в том числе: в результате схода лавин 9 человек, селевых потоков -7, камнепадов - 3, сильного ветра - 2, удара молнии -1 человек. В этом же году, в результате стихийных бедствий в республике разрушены 136 жилых дома, из них 22 полностью и 114 домов частично. Сумма ущерба составила 31 млн. 357 тыс. 300 сомони.

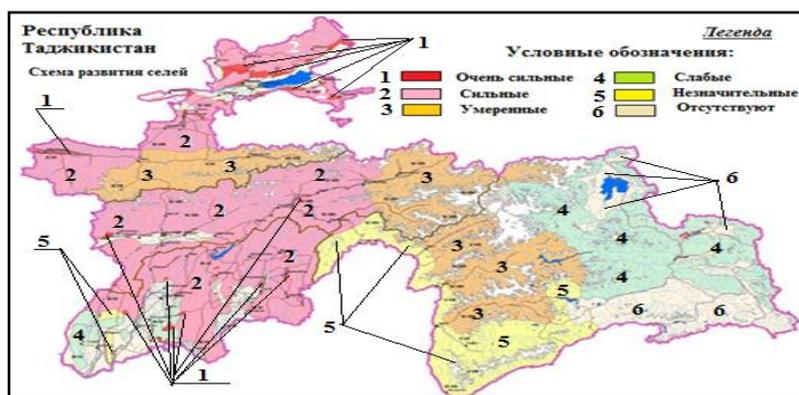
Относительно 2020 года, следует отметить, что в результате стихийных бедствий погибли 8 человек из которых 4 в результате схода селевого потока. Сумма ущерба по стихийным бедствиям и катастрофам за 2020 г. составила 58 911 400 сомони из которых 20 289 300 сомони от последствий схода селей [6, 90].

В результате стихийных бедствий в 2020 году были повреждены 141 жилое строение, 41 из которых был разрушен полностью и 100 разрушены частично. В числе разрушений: 22 школы и дошкольные учреждения, 89 км местных дорог, 14 мостов, 15 км линии электропередач, 18 тыс. 817 гектаров сельхозугодий.

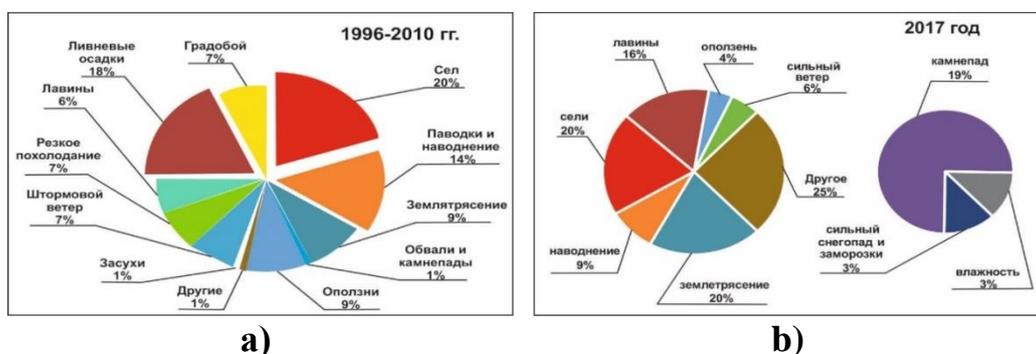
А в 2021 году в результате стихийных бедствий погибли 42 человека. Сумма ущерба по стихийным бедствиям за 2021 г. составила около 142 млн. сомони из которых 104 млн. сомони от последствий схода селевых потоков (около 73%) [173-176].

Установлено, что около 85% территории Таджикистана подвержены риску возникновения селей, а 32% территории находятся в зоне высокого риска возникновения селей [177]. На рисунке 3.37 приведена карта-схема развития селя в Таджикистане.

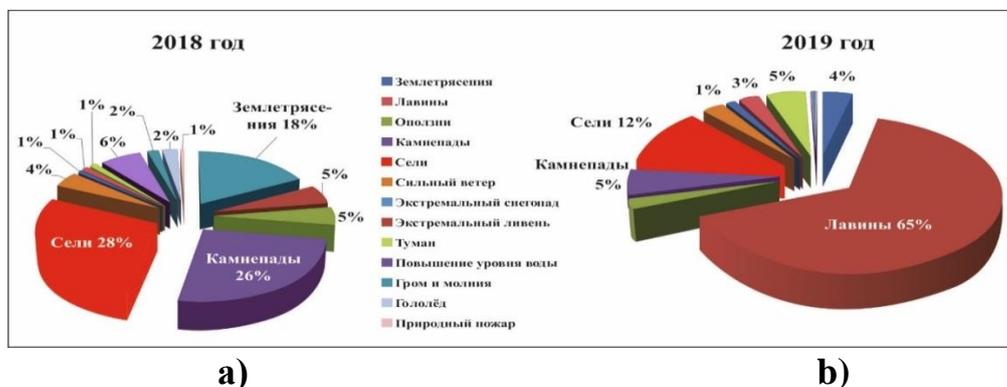
Следует отметить, что селевые процессы в течение с 1996-2010 гг. составили 20% от всех ЧС, с 2012 по 2016гг. - 34%, в 2017 г 20% от всех (883) (рисунок 3.38), а в 2018 г. и 2019 эти показатели составили 28% и 12% соответственно (рисунок 3.39).



**Рисунок 3.37 - Картографическая (схематическая) характеристика поражённости территории РТ селевыми процессами [137].**



**Рисунок 3.38 - Распределение ЧС с 1996 по 2010 гг. (а) и за 2017 г. (б).**



**Рисунок 3.39 – Распределение ЧС за 2018 г. (а) и 2019 г. (б).**

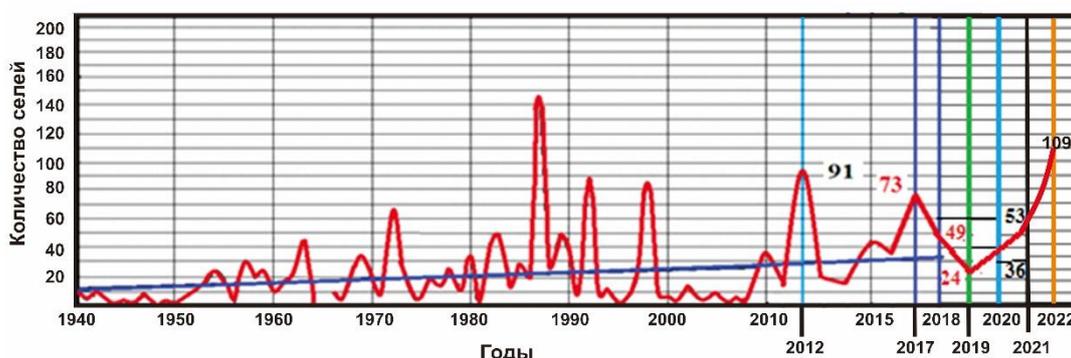
Таким образом, в Таджикистане в 2019, 2020 и 2021 гг. стихийные бедствия нанесли серьёзный материальный ущерб экономике страны: пострадали жилые дома, учреждения, вышли из оборота посевные площади, разрушены мосты, автомобильные дороги, линии электропередач и другие инфраструктуры.

На рисунке 3.40 приведены результаты анализа количества стихийных бедствий, сопровождавшиеся человеческими жертвами.



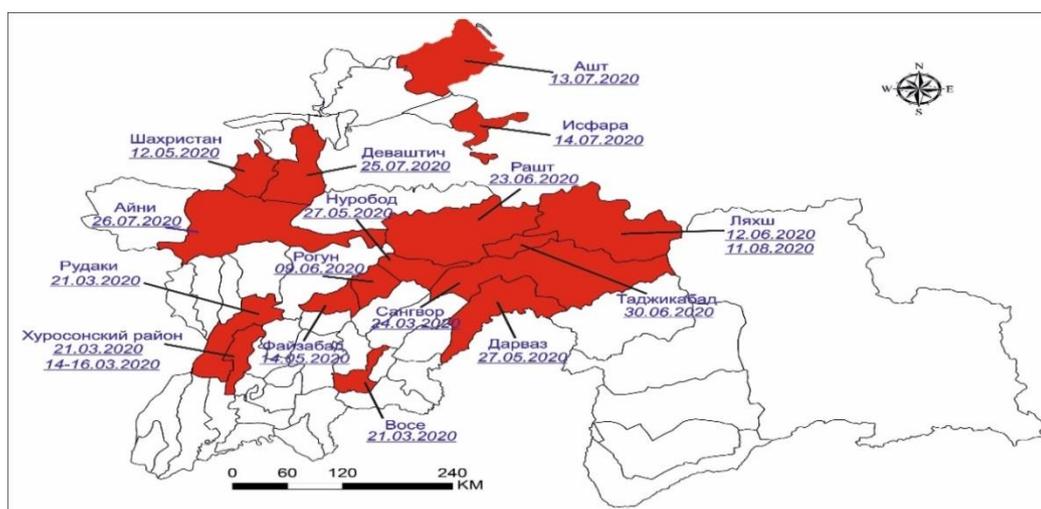
**Рисунок 3.40 – Количество стихийных бедствий в РТ**

На рисунке 3.41 приведены результаты анализа количества селепроявлений за период с 1940 г. по 2022 годы.



**Рисунок 3.41 – Селепроявления в Таджикистане с 1940 по 2022 гг.**

Ниже рассмотрены случаи опасных гидрологических явлений, связанные с селями, в отдельных регионах и районах Таджикистана. Карта селепроявлений в Таджикистане за 2020 г. показано рисунке 3.42.



**Рисунок 3.42 – Карта селепроявлений в Таджикистане за 2020г. по данным КЧС и ГО РТ.**

В частности, 21 марта 2020 г. в результате прошедших проливных дождей в двух районах Хатлонской области и в районе Рудаки зафиксированы селепроявления. А в селе Халкаджар сельского джамоата имени С. Айни Хуросонского района грязевая масса затопила приусадебные участки и подвалы жилых домов. К сожалению, в результате селевого потока погиб местный житель [178].

По данным Комиссии по чрезвычайным ситуациям Хуросонского района в результате стихийного бедствия частично пострадали 2 жилых дома, 6,3 км дороги, 7,3 км дренажной линии и водостоков и другие. Общая сумма ущерба в Хуросонском районе составила свыше 1,3 млн. сомони [179].

Вследствие проливных дождей и повышения уровня воды в реке Кафарниган (14 мая 2020 г.), на территории города Вахдат было смыто до 500 метров левобережья реки, приведший к разрушению 150-200 метров местных дорог, 3 жилых домов. При этом сохранялась угроза разрушения других ближайших домохозяйств, что вынудило эвакуировать людей для защиты от возможного воздействия стихийного бедствия. Проливные дожди также спровоцировали селевые потоки и повышение уровня воды в реке Элок на территории Файзабадского района, что привело к затоплению села Кабгурез расположенного на левом берегу реки. В результате стихии был повреждён мост, соединяющий данное село и село Навбахор с сельским джамоатом имени Д. Алиева. В селе Сурхдара грязекаменный поток заполнил три приусадебные участки местных жителей [180].

В результате проливных дождей 14-16 мая 2020 года в селах Неъматулло Асадулло, XVIII Партсъезда сельского джамоата имени С. Айни, а также в селе Пахтаобод сельского джамоата Хилоли Хуросонского района Хатлонской области проливные дожди стали причиной образования селевых потоков, подтопившие жилые дома и приусадебные участки, а также спровоцировали схода оползней. В общей сложности от селей и оползней пострадали 338 жилых домов, из которых 14 домов были разрушены полностью, 1 дом частично [181].

На территории сельского джамоата Сичарог города Рогун, из-за обильных дождей и града 9 июня 2020 года, был зафиксирован сход селей, что привело к разрушению межпоселковых дорог сел Лугури Боло, Шохи Аслон, Санги Сурх и Кали Бед. Из-за стихии были разрушены 3 моста и линии электропередачи [182].

23 июня 2020 г. сильный дождь и град стали причиной схода селей на территории села Хоит сельского джамоата Хоит Раштского района. Селевые паводки нанесли ущерб проселочной дороге и частично домохозяйствам [183].

Ниже представлена информация по результатам изучения опасных гидрологических явлений на отдельных территориях Северного Таджикистана. В частности, 13 июля 2020 года из-за обильных осадков и возникновения селепроявлений в селе Мулломир городского джамоата Шайдон Аштского района грязевая масса нанесла ущерб 25 приусадебным участкам и разрушила проселочную дорогу. Днем позже, т.е. 14 июля 2020 года, также из-за образования селевого потока пострадали территории сельских джамоатов Чоркух, Ворух и махаллаи Чуйи Дам Исфаринского района, в том числе нанесен значительный ущерб домохозяйствам [184].

В июле 2021 года, 12 человек погибли в результате схода селей в Согдийской области Таджикистана. В частности, под селевой поток на летнем пастбище села Киштудак, расположенного выше сельского джамоата Дашти Кози (г. Пенджикент) на расстоянии 30 км, попали 10 человек, пасущих скот. Спасателям удалось извлечь из-под грязевых масс тела 8 жителей данного села. Частично пострадали 15 жилых домов, приусадебные участки, 3 км межпоселковой дороги, пали 35 голов крупнорогатого и мелкого скота. Ущерб от селевого был нанесен селам Вешист и Рузиобнок г. Пенджикент и других районов Согдийской области.

По данным КЧС и ГО ПРТ в 2021 году количество селей увеличилось на 47,2% по сравнению с 2020 годом. Селевые явления зафиксированы во всех регионах нашей страны. Наибольшее количество селей зафиксировано в Хатлонской области и подчиненных районах республики [185]:

- в результате проливных дождей и селевого потока в городе Куляб 11 мая 2021 года, разрушено 145 жилых домов, из них 43 полностью разрушены, 102 дома повреждены частично, а также 606 вспомогательных объектов, четыре школы и дошкольные учреждения. Повреждено 6 км автодороги, 10 мостов, 24,5 км линий электропередач, 65 железобетонных фундаментов, 7 трансформаторов, 35 км линий связи, почти 14 км береговых укреплений. При этом повреждено 128,4 га сельскохозяйственных культур, в том числе 31,75 га хлопчатника, 37,6 га зерновых, 36,1 га овощей и 23 га картофеля. К сожалению, в результате этого стихийного бедствия в городе Куляб погибли 3 гражданина. В результате стихийного бедствия погибло 128 голов скота, в том числе 79 мелких и 49 крупных рогатых, а также 6500 птиц, 20 семей пчел и 17200 рыб;

- проливные дожди и селевые явления в Вахшском районе (11 мая 2021 года), полностью разрушили 41 дома и частично повредили 33 дома; повреждено 137 вспомогательных сооружений, 10 км транспортных дорог, 8 мостов, 20 км линий электропередач, 4 трансформатора, 12 км оросительных линий и каналов, 8 км дренажных линий и дренажей, 1 насосная станция и гидротехнические сооружения;

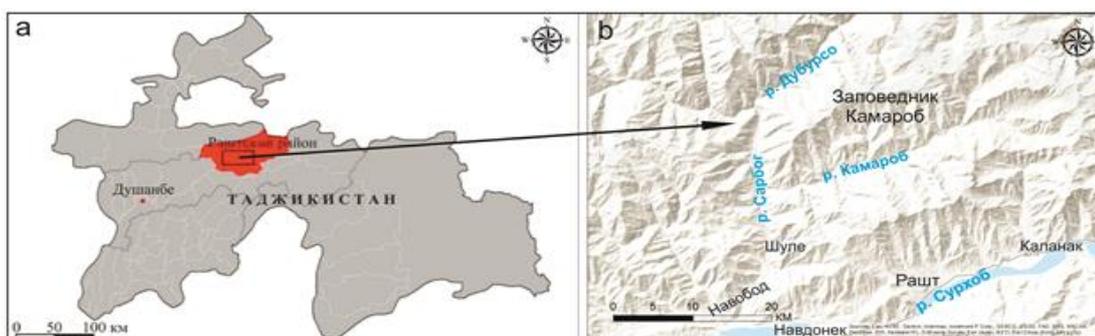
- 28 июля 2021 года (13:30) резкое повышение температурного фона в горах Сугат, Лахшского района стало причиной отрыва части ледника, и образовавшаяся снежно-ледовая масса перекрыла русло речки Тугат. В процессе повышения уровня воды в её русле и разлива был подтоплен участок длиной 1.0 км. (249- 250 км трассы) автодороги международного значения Вахдат - Лахш - Кыргызстан и образовался затор, перекрывший русло р. Сурхоб. Селевой поток на данном участке также был зафиксирован в сентябре 2021 года.

Представленный анализ всецело подтверждает характеристику пораженности территории Республики Таджикистан селевыми процессами приведенная выше (рисунок 3.37).

Ниже приведены результаты проведённых мониторинговых работ на горных территориях с опасными гидрологическими процессами.

### 3.4. Организация и проведение полевых исследований (проведение мониторинговых работ) в условиях горных территорий

Ущелье **Камароб** протяженностью 54 км расположено между Каратегинским и Кабудкрымскими хребтами в Раштском районе Таджикистана (рисунок 3.43). В этом ущелье протекает р. Камароб - левый приток р. Сарбог (бассейн р. Вахш). Основным ее притоком является р. Сободай, а длина от истока до устья составляет 36 км, площадь ее водосбора - 347 км<sup>2</sup>, количество притоков протяженностью менее 10 км - 78 (их общая протяженностью - 122 км) [186].



**Рисунок 3.43 - Местоположение территории исследования в Раштском районе на политической (а) и топографических (б) картах Таджикистана**

Район ущелья Камароб характерен опасными экзогенными геологическими процессами (сели, лавины, оползни и камнепады) (рисунок 3.44). Активизация последних зачастую становится причиной блокировки течения рек и ручьев, что в свою очередь приводит к закрытию дорог и другим неблагоприятным последствиям [187].

Сильные дожди, возникшие 20 июля 2015 г., спровоцировали образование селевого потока и схода оползней в с. Пингун Раштского района, приведшие к перекрытию русла р. Камароб и полному разрушению 60 жилых домов с пристройками, двух пешеходных мостов, 10 км автодороги, две мельницы, пять трансформаторов. В селах Бедак и Халкарф было полностью уничтожено более 50 и

частично пострадало около 100 домохозяйств. Кроме этого, в других частях Рапшского района оказалось нарушено 7 км линий электропередач. К сожалению, данное стихийное бедствие стало причиной гибели одного жителя с. Бедак [188].



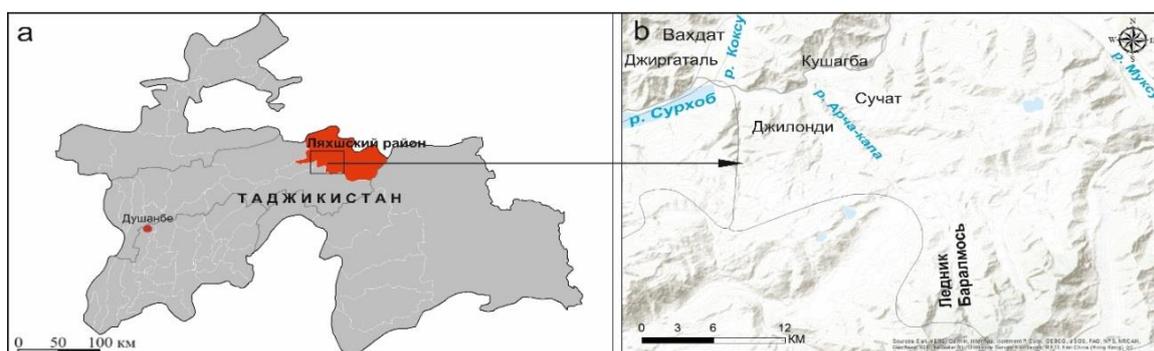
а)

б)

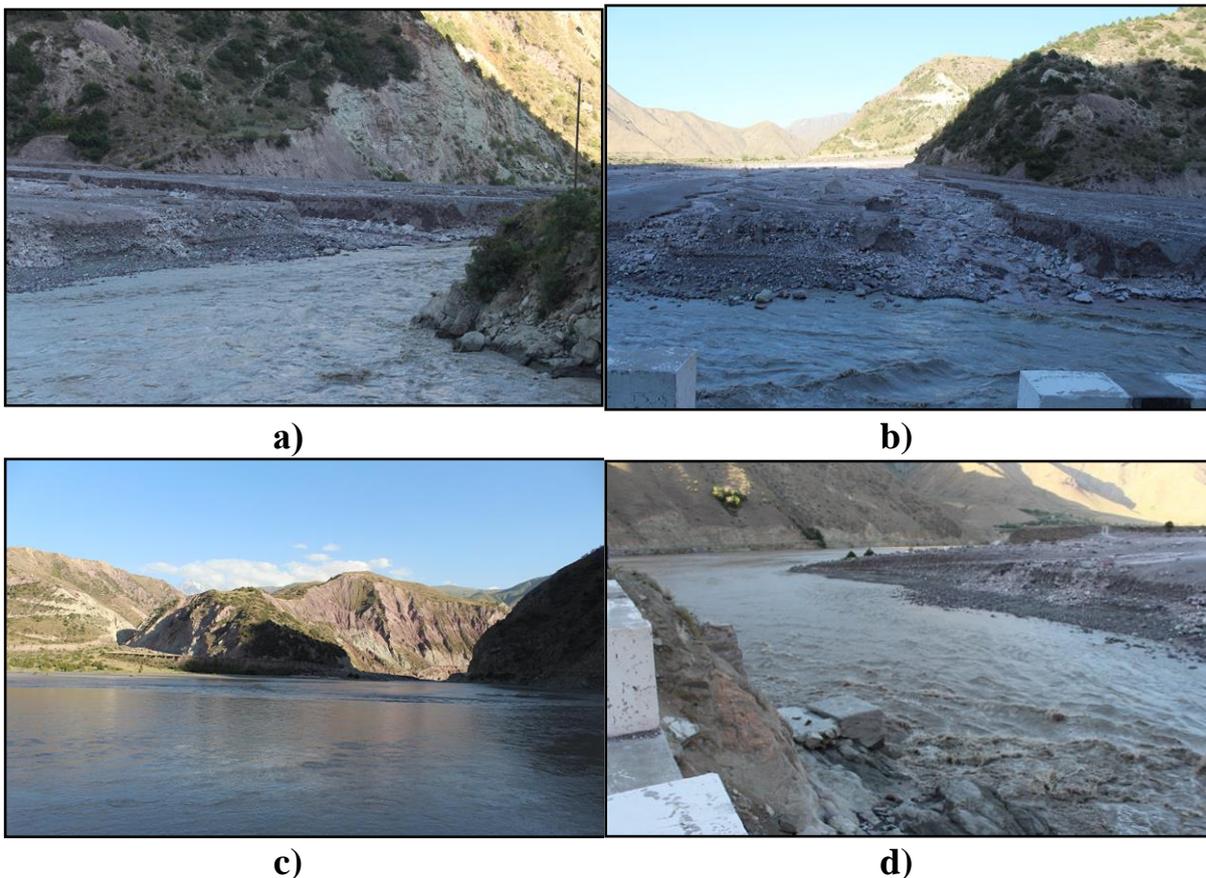
**Рисунок 3.44 – Селевые отложение в с. Пингун (а) и обрывы формирующиеся в результате деятельности селей и оползней (б)**

**В низовьях ледника Баралмось, бассейна реки Арчакапа (рисунки 3.45 и 3.46) впадающий в р. Сурхоб периодически наблюдается возникновения селевого потока.**

Таяние данного ледника периодически провоцирует селевые потоки в бассейне р. Арчакапа с последующими разрушениями международной автомобильной трассы и перекрытия русла р. Сурхоб и др.



**Рисунок 3.45 – Объект мониторинговых исследований в Ляхшском районе на картах: политическая (а) и топографическая (б).**



**Рисунок 3.46 – Селевые отложения в русле р. Арчакапа.  
Фото М.С. Сафарова**

В частности, 7-8 июля 2015 года произошел сход селевого потока, разрушивший автотрассу Вахдат - Лахш, 300 метров дороги районного назначения и 1 мост проходной мост [189].

28 мая 2017 года, в результате схода селевого потока на двести пятидесятом километре автотрассы Вахдат-Лахш-Саритош (джамоат Сурхоб Лахшского района) была затоплена и частично перекрыта дорога к р. Сурхоб. При этом, были разрушены 2 опоры линии электропередачи и а 200 метров полотна автомобильной дороги было засыпано камнями и гравием, движение по данной трассе было временно приостановлена [190].

Подобная чрезвычайная ситуация возникла, 12 июня 2020 года в (17:50ч.), где в результате схода селя русло реки была частично перекрыта, а дорога к реке Сурхоб была перекрыта [191].

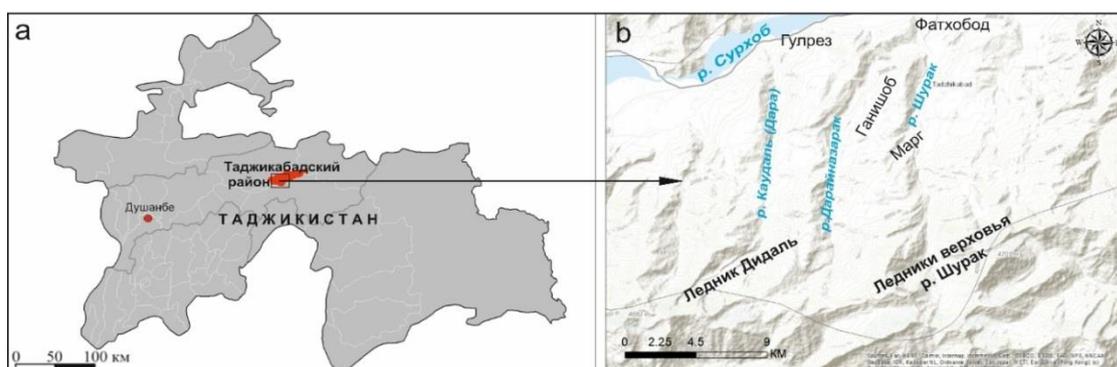
По данным Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороны при Правительстве Республики Таджикистан 28 июля 2021 года (13:30ч.) резкое повышение

температурного фона, в горах Сугат, Лахшского района стало причиной отрыва части ледника и образовавшаяся снежно-ледовая масса перекрыла русло речки Тугат. В процессе повышения уровня воды в её русле и разлива был подтоплен участок длиной 1.0 км. (249-250 км трассы) автодороги международного значения Вахдат - Лахш - Кыргызстан и образовался затор, перекрывший русло реки Сурхоб [192].

Основным фактором, повлиявшим на резкое повышение уровня воды в реке Арчакапа, (09.09.2021г.) было повышение температуры воздуха и как следствие таяние близлежащих ледников. При этом, образовавшийся селевой - грязекаменный поток перекрыл русло реки Сурхоб, что привело к разрушению 50-60 метров дорожного полотна автотрассы Вахдат-Лахш.

Проведенный анализ и оценка, а также результаты полевых исследований, проведенных нами в августе в 2020 г., позволили подтвердить факт наличия на данной территории, особенно в последние годы, в условиях изменения климата, постоянного проявления селевых явлений.

**Ледник Дидаль** - сложно-долинный ледник, берущий начало на крутых склонах пика Каудаль высотой 4778 м над уровнем моря, расположен на северном склоне хребте Петра Первого, в бассейне реки Сурхоб (рисунок 3.47) являющийся опасным движущимся ледником, спровоцировавший несколько селевых потоков [193].



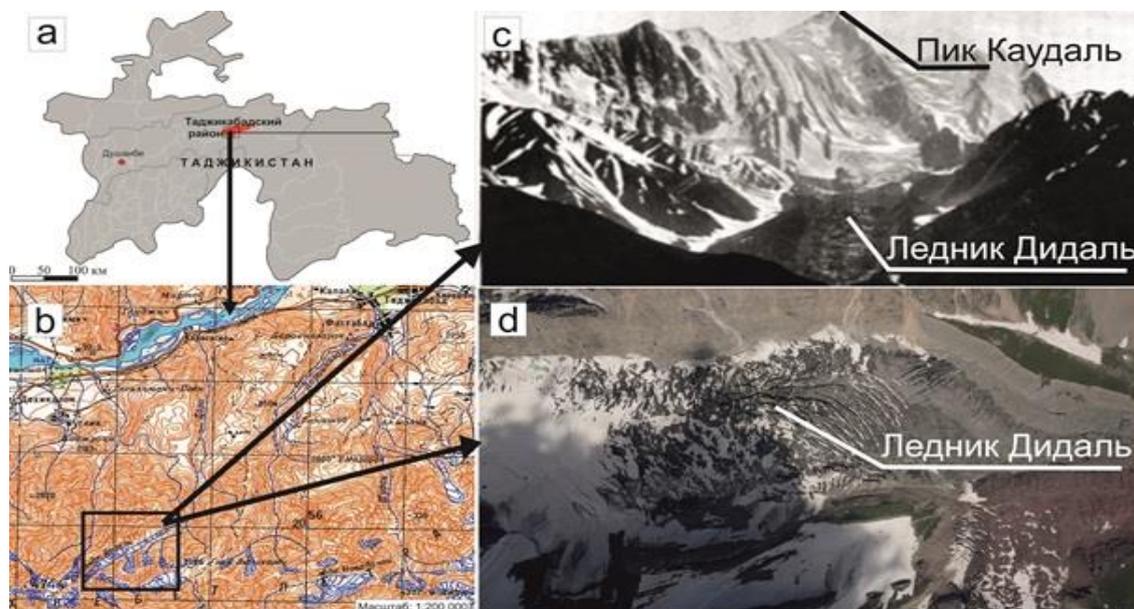
**Рисунок 3.47 –Объект мониторинговых исследований в Таджикибадском районе на картах: политическая (а) и топографическая (b)**

Площадь ледника - 1,6 км<sup>2</sup>, длина - 4,8 км, тип ледника – сложно - долинный, экспозиция - Северо-восточная, высота языковой части - 3220 м, максимальная высота - 3500 м, Приток реки - бассейн реки Сурхоб, координаты - 38°59'24.13N 70°43'5.89"E [194-195].

Резкое увеличение скорости передвижения ледника произошедший в 1974 году привело к увеличению длины ледника на 600 метров и формирование сильных селей, устремившихся вниз по руслу Каудаль.

От ледника Дидаль оторвалась передняя его часть длиной 600 метров, объёмом примерно 1.5 млн. м<sup>3</sup> льда и гигантский поток с высокими волнами с дроблённым грязно-голубым льдом устремился, сдирая дерн вниз, по склону. Вследствие этого на поверхность ледника опустился 20-50 метров, а в верховьях Дидалья образовались отвесные ледяные ступени и обрывы высотой до 60 метров, с уменьшением ширины ледника. В течение последних 2 лет ледяной завал на реке Каудаль постепенно таял [193].

Ниже (рисунок 3.48с.) для сравнения приведены фото 1897г. и фото автора сделанное в 2019 году (рисунок 3.48d).



**Рисунок 3.48 – Пик Каудаль хребта Петра 1 с ледником (1897 год) (снимок В. И. Липского) (с) и аэрофотоснимок ледника Дидаль (2019) (д) (снимок М.С. Сафарова)**

Первая фотография ледника приведена в книге «Горная Бухара» В. И. Липского [196]. Снимок ледника был сделан вовремя экспедиции учёного в 1897 году. По словам учёного и описание местных властей в 1890 в горах под Каудалем был снежный обвал, погребший 4 пастухов, столько же собак и около 100 овец.

На рисунке 3.49 показана река Каудаль (Дара) вытекающий из ледника (снимок Сафарова М.С.).



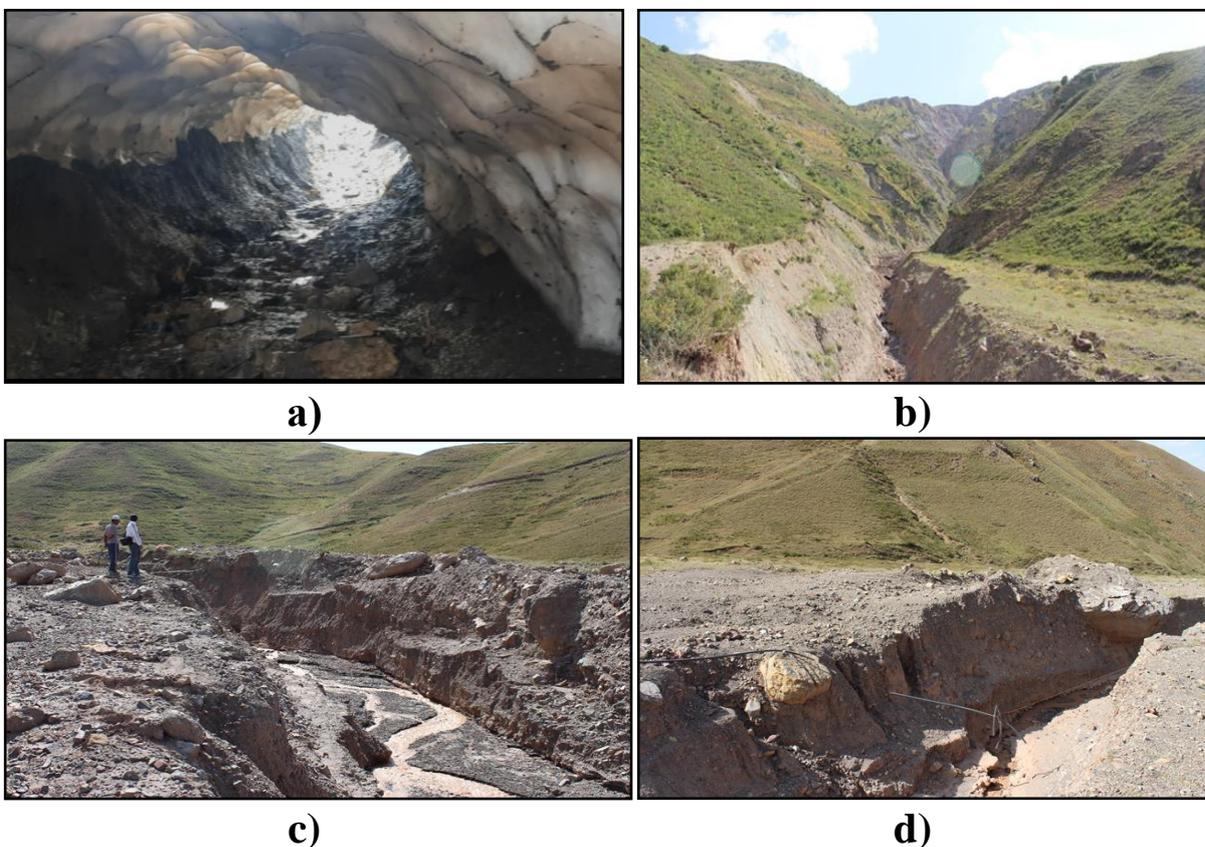
**Рисунок 3.49 – Река Каудаль вытекающая из ледника (2020г.),  
(Фото М.С. Сафарова)**

**Бассейн реки Шурак.** Другой зоной, где были проведены исследования был бассейн реки Шурак расположенный в Таджикабадском районе (смотреть выше рисунок 3.47). Данная река согласно Каталогу ледников, питается ледниками 503, 504, 505, 506, 507 [194].

Исследованная территория также характерна возникновением селевых потоков, приводящих к значительным ущербам. В частности, 28 августа 2016 года отколовшаяся часть ледника, растаяв и спровоцировав сход оползня, нанесла значительный урон селу Себистон - разрушены дома, коммуникационные системы. В тот же день со склона горы села

Себистон джамоата Калъаи Лаби об Таджикабадского района откололась часть ледника, которая, также стала причиной возникновения мощного оползня, перекрывшая русло реки Шурак. В результате сошедшего оползня, уровень воды в реке повысился, были разрушены мост между селами Фатхобод и Шуроб, а грязевая масса разрушила 10 жилых домов, нанесен также ущерб фермерским хозяйствам и коммуникационным системам сел Фатхобод и Капали Таджикабадского района [197].

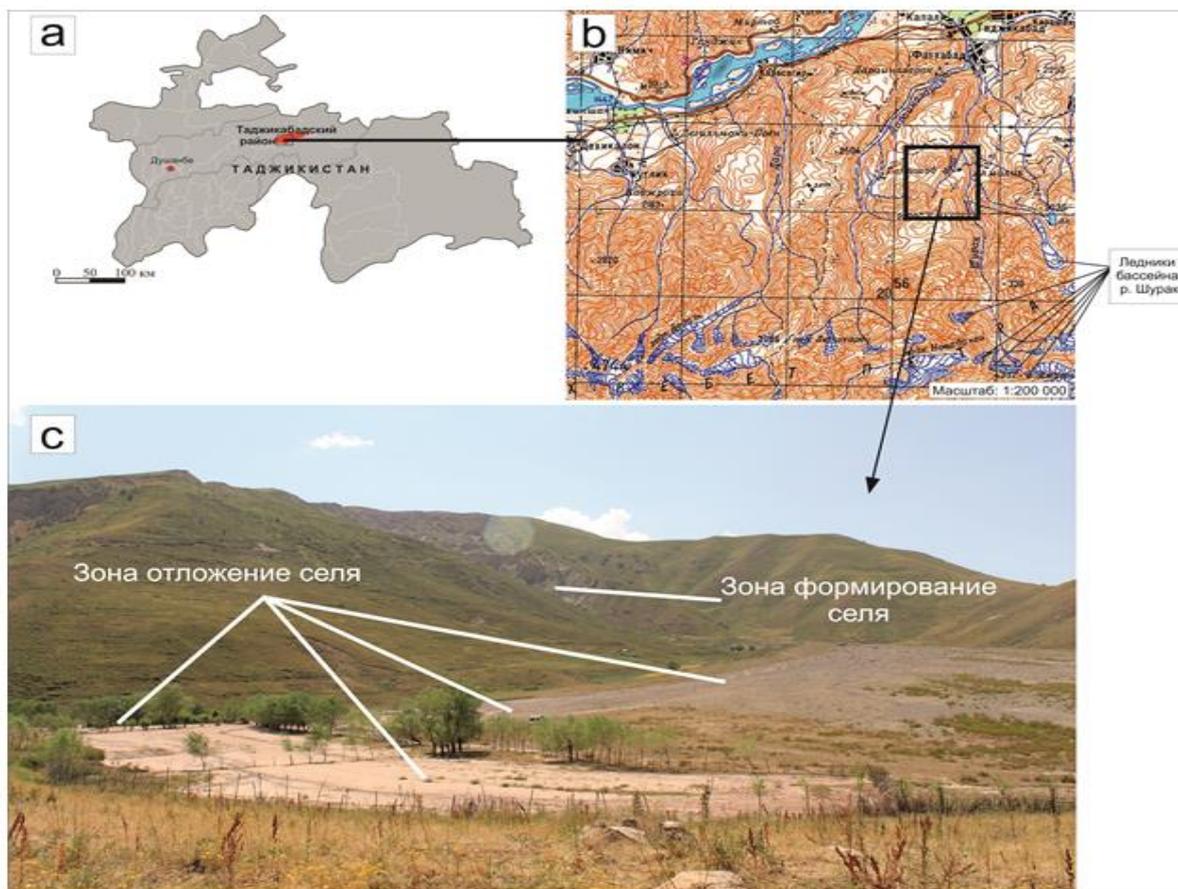
С левой стороны реку Шурак питает небольшая речка, формирующаяся за счёт источника воды и таяния продуктов лавин (рисунок 3.50). Интенсивные дожди часто становятся причиной возникновения селя.



**Рисунок 3.50 – Лавина в верховьях речки, в зоне возникновения селевого потока, впадающий в р. Шурак (а), зона формирования селя (b), изменения направления движения потока в русле речки после прохождения селя (с, d).**

Обычно данная речка не представляет угрозы, но 25 июля 2020 г. в селе Марг (Марғ) в результате возникшего, после града,

селевого потока были разрушены 30 гектаров сельскохозяйственной земли и несколько временных построек. Высота селевого потока в зоне формирования (начальная точка) достигала более 7-10 метров, а в зоне отложений (конечная точка) она составляла около 2-3 метров. Фотографии в ходе исследования, сделанные нами также это, подтверждают (рисунки 3.50 - 3.52).



**Рисунок 3.51 – Выявленные зоны схода селя с разрушенными строениями. 1- ледники бассейна р. Шурак**

Следует отметить, что в данной местности селевые потоки возникают периодически и речка также питает реку Шурак, но это не связано с ледниками приводящие к возникновению селевого потока в посёлках Фатхобод и Капали.



a).



b).



c).



d).



e).

**Рисунок 3.52 - Результаты схода селевого потока. Зона грязекаменных и глинистых отложений (а, b), зона глинистых и водных отложений разрушенных сельского хозяйства (с, d, e). Фото Сафарова М.С.**

## **Глава 4. МОНИТОРИНГ СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ТАДЖИКИСТАНА**

Интенсивное освоение горных территорий приводит к необходимости учета рисков, свойственных этим регионам. К ним относятся такие природные явления, как сели, лавины, оползни и т.д.

Мониторинг селевой опасности горных районов Таджикистана является чрезвычайно актуальной задачей. Количество, частота и масштабы катастрофических последствий, вызванных селями, наносят колоссальный материальный, финансовый ущерб экономике страны и не редко сопровождаются, к сожалению, человеческими жертвами.

Освоение инновационных технологий мониторинга и оповещения, будут способствовать дальнейшему развитию системы исследований, разработки методов прогноза и средств защиты от селевых поражений.

Одним из основных компонентов реализации концепции управления рисками стихийных бедствий связанные с селепроявлениями является использование современных технических средств (ДЗЗ, космоснимки, применение БПЛА и т.д.) технологий мониторинга, контроля и предупреждения селевых проявлений.

### **4.1. Технология организации аэрофотосъёмки объекта исследования для горных условий Таджикистана**

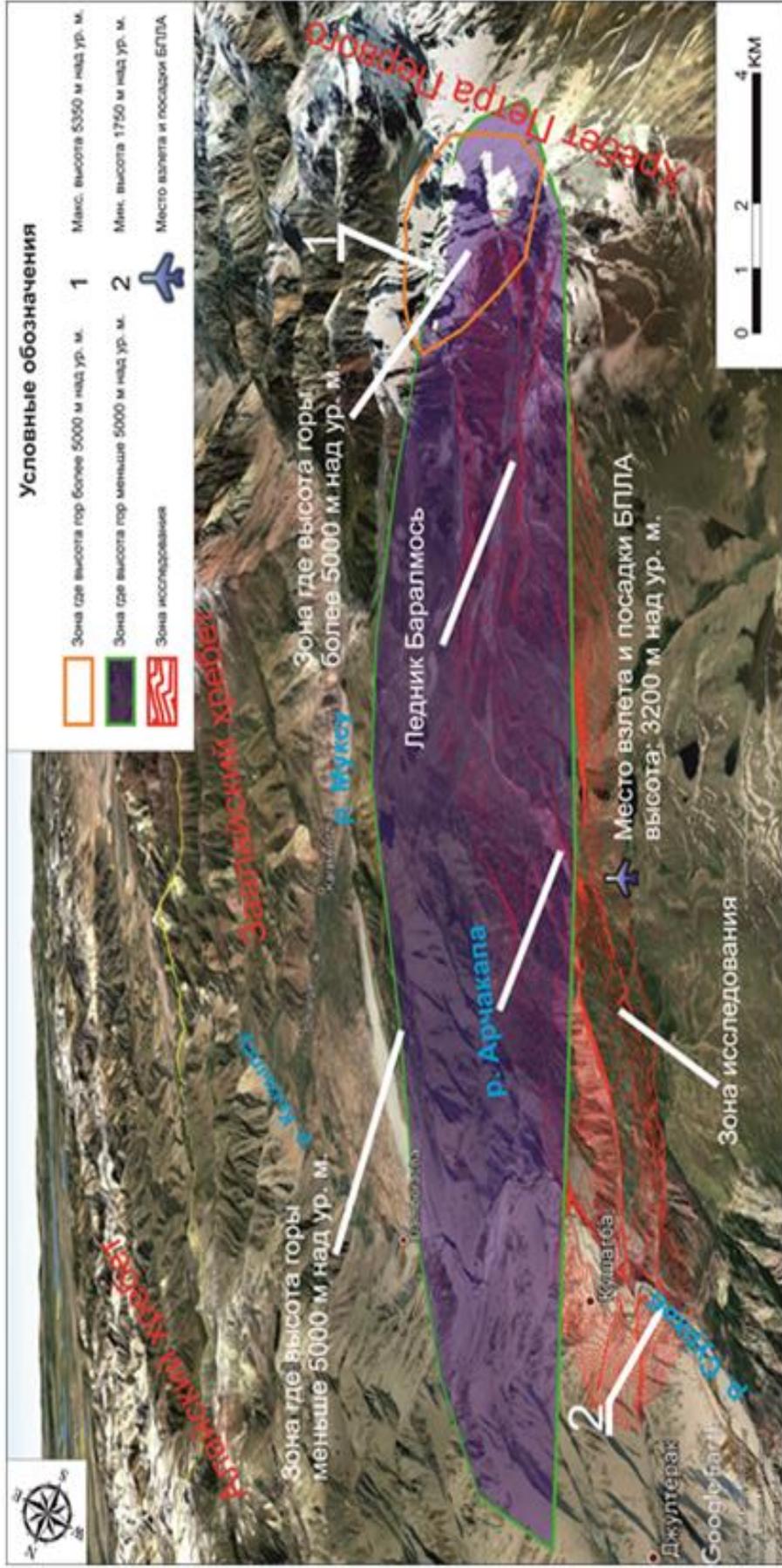
В третьей главе были представлены сведения о результатах осуществлённого анализа и оценки методов, технологий, области применения, инструментариев и пути активного развития дистанционного зондирования земли. Следует отметить, что использование современных технологий мониторинга для условий горного рельефа и труднодоступных районов Таджикистана имеет реальные возможности и перспективу. Одним из главных преимуществ БПЛА являются: отсутствие потребности в специальных взлётно-посадочных площадках; финансовая

доступность; исключение необходимости организации специалистами наблюдений непосредственно в труднодоступных горных районах, с минимизацией, человеческих рисков при проведении мониторинговых исследований.

Организация полевых работ для исследования селеопасных районов, требует учёта разнообразия орографии (хребты, плато, равнины, долины, впадины, котловины, крутые склоны и т.п.) различных зон Таджикистана с помощью БПЛА и связано с решением ряда технических задач и сопутствующих факторов. В частности: высота полёта влияющая, на качество снимков; плотность воздуха; вероятность резкого изменения погоды, связанное с возрастанием скорости ветра, внезапным появлением дождевых облаков, выпадения осадков и др. При этом необходимым и обязательным фактором, который следует учитывать является радиус полёта БПЛА с возможностью получение данных о его состоянии: местоположение БПЛА; скорость полёта; высота; уровень заряда аккумуляторов и др., а также, что немаловажно скорость ветра в районе наземной станции управления.

Следует отметить, что в процессе аэрофотосъёмки в горных условиях, перепад высот также влияет на качество разрешения снимков. При этом достижение наилучшего качества съёмки не редко сопровождается с опасностью столкновения с горами, хребтами. Исключение возможного возникновения такой ситуации, можно достичь путём определения предполётной высоты с использованием топографических карт или сервиса Google Earth, с учетом погрешности применяемого сервиса или карты.

В частности, нам при выполнении съёмки зон зарождения селей приходилось учитывать вышеизложенные факторы, а также риски формирования селевых потоков (горные прорывные озера, ледниковые озера, движущиеся ледники и др.). Таким образом, при проведении аэрофотосъёмки с целью получения полной и качественной съёмки путём дешифровки снимков селеопасных территорий были реализованы следующие технические требования и функции (рисунок 4.1):



**Рисунок 4.1 – Определение района исследований на примере бассейна р. Арчакапа впадающий в р. Сурхоб и питающийся ледником Баралмось**

- определен район исследований и занесен в координаты в виде полигона в программу с учётом орографии района, установлены метеорологические данные, а также законодательные акты регулирующие полёты БПЛА в Таджикистане;

- изучены законодательные акты регулирующие полёты БПЛА в Таджикистане:

- определен район исследований и занесен в координаты в виде полигона в программу с учётом орографии района;

- установлены метеорологические данные;

- произведен расчёт маршрута (площадь, высота) по исходным данным.

- в зависимости от цели и детальности, а также природных условий местности назначен масштаб.

Следует отметить, что чем больше масштаб, тем более детализированно может осуществлена съёмка, позволяющая получить, больше информации об отдельных элементах селевого бассейна и селевых процессов. Оптимальным является предельно мелкий для задачи масштаб, позволяющий осуществить высококачественное дешифрирование того или иного объекта, который определяется по формуле:

$$M \geq \frac{1}{AR_c} \quad (4.1)$$

где:

$R_c$  - разрешающая способность аэрофотоснимков;

$A$  - минимальный размер деталей, различаемых на фотоснимках и позволяющих опознать объект.

Так как основные индикаторы селевых явлений наиболее полно дешифрируются при проведении аэрофотосъёмки весной или в начале лета (после схода снежного покрова), то необходимо учитывать, что сезон года и время имеют большое значение, для получения высококачественные, хорошо дешифрируемые снимки. В течение суток оптимальным является полуденное время, когда тени имеют минимальные размеры [136].

В отдельных районах для охвата больших территорий и недостаточности заряда аккумулятора, выполняются несколько полётов. Перед каждым взлётом осуществляемый с руки в ручном или автоматическом режиме против ветра, необходимо проверить

заряд аккумулятора и при необходимости заменить его. Ввиду горного рельефа, а также неравномерной поверхности посадка для БПЛА самолётного типа производится в ручном режиме. Скорость полёта обычно составляет около 60 км/час.

После аэрофотосъёмки и фильтрации, полученные данные обрабатываются в основном в автоматическом режиме, упрощающий процесс работы при создании карт и др. цифровых моделей. Дешифрирование аэрофотоснимков позволяет определить площадь бассейна, зафиксировать его гидрографическую сеть, выявить его густоту и разветвлённость, служащая показателем условий стока атмосферных вод, особенностей режима рек бассейна, а также эрозионной деятельности в нём.

Основным геологическим компонентами, влияющими на формирование селей, являются литологический состав пород и поверхностных отложений, их строение, залегание, тектонические условия и характер неотектонических процессов. Основным индикатором, подчёркивающим характер геологического строения территории и вещественный состав пород, являются мезо- и микроформ рельефа.

Растительность на склонах селевых бассейнов также является основным индикатором геолого-геоморфологических процессов, а также самых селевых процессов и отдельных компонентов селевого явления. Прямыми дешифровочными признаками растительного покрова являются общий тон и структура изображения [136].

#### **4.2. Мониторинг подверженных риску стихийных бедствий горных территорий с использованием беспилотных летательных аппаратов и спутников**

Исследования подверженных риску стихийных бедствий горных территорий с использованием беспилотных летательных аппаратов и спутниковых снимков, включали в частности, отдельные селеопасные участки бассейна реки Сурхоб, характеризующиеся различными факторами способствующие формированию селевых

потоков: проливные дожди и ливни, повышение температуры, таяние ледников, образование лавин и т.д.

В план мониторинговых исследований с применением БПЛА бассейна реки Сурхоб, были включены: ущелье Камароб (Раштский район), ледник Баралмось (Ляхшский район), ледник Дидаль, а также отдельные зоны бассейна реки Шурак (рисунок 4.2).



**Рисунок 4.2 – Бассейн р. Сурхоб. Участки исследований; 1 – ущелье Камароб, 2 – концевой участок ледника Баралмось, 3 – бассейн р. Шурак, 4 – ледник Дидаль**

Река Сурхоб, правая составляющая реки Вахш протекающая с востока на запад и являясь значительной, составной частью системы бассейна реки Амударье - одной из крупнейших рек Центральной Азии, своё название получила после слияния (на высоте 1834 метров над уровнем моря, около селения Домбрачи), на севере Таджикистана, в начале Заалайского хребта, реки Кызылсу - алайская и р. Муксу, ледником Федченко.

При слиянии р. Сурхоб с р. Обихингоу (площадь бассейна 6660 км<sup>2</sup>, перепад высот 2020 м, длина - 196 км) (западная граница Раштского района), на высоте 1151м., получает название река Вахш.

По морфологическому строению исследуемый район резко разделяется на две неравные части, расположенные в разных структурных-тектонических зонах - правобережье и левобережье

долины р. Сурхоб. Вершины главного водораздельного гребня Алайского и Зерафшанского хребтов возвышаются в среднем на 4500 м, достигая наибольших высот в восточной части района (в бассейне р. Коксу они составляют 4700 м, в бассейне р. Ярхыча - 4650 м и в бассейне р. Сорбог - 4250 м). К северо - западу от ледника Янгидаван, находится наивысшая точка района пик Тамдыкуль (высота 5539 м). Северной р. Сурхоб также в широтном направлении тянется Каратегинский хребет, который занимает центральную часть правобережья, а в восточной части района приближается к р. Сурхоб. Восточную часть правобережья р. Сурхоб занимает бассейн р. Коксу которая берет своё начало из ледника Янгидаван. В центральной части правобережья р. Сурхоб расположен бассейн второго крупного его притока - р. Ярхыч. Кроме того, небольшая южная часть территории занята бассейном р. Ясман, впадающий в Сурхоб близ устья Ярхыча (в верховьях которой имеются всего два ледника размерами 0,1 км<sup>2</sup>). Западный участок правобережья р. Сурхоб относится к бассейну р. Сорбог. Сравнительно небольшую площадь на юге этого района занимает бассейн р. Сангикамар, впадающей в Сурхоб немного западнее устья Сорбога. Наиболее крупными левыми притоками р. Сурхоба являются реки Шурак, Обишурак, Шурак восточный, Дара и Шурак западный [194].

В таблице 4.1 приведены гидрологические параметры реки бассейна р. Сурхоб: длина  $L$  (км), расход воды  $Q$  (м<sup>3</sup>/с), относительная высота  $H$  (м), относительный уклон  $i$  (км/км), площадь бассейна  $F$  (км<sup>2</sup>). Данные в таблице содержат геометрическую информацию (высота, длина, наклон по горизонтали) и физическую информацию (стоимость единицы). Эта информация имеет ключевое значение и позволяет на практике использовать физические и геометрические свойства водных ресурсов.

Реки бассейна р. Сурхоб в основном берут своё начало от ледников Каратегинского хребта, юго-восточной части Гиссара Зеравшана, юго-западной части Алая и хребта Пётра Первого. Гидрологический режим р. Сурхоб и её притоки зависят от расположения и динамики ледников [198].

Таблица 4.1 – Количественное описание некоторых рек бассейна  
р. Сурхоб [198-199]

Приток	длина L (км)	расход воды Q (м <sup>3</sup> /с)	относительная высота Н (м)	относительный уклон i (км/км)	площадь бассейна F (км <sup>2</sup> )
Арча Капа	11	2,6	1508	0,132	57
Шохоби (приток) 282	12	1,6	1579	0,137	35
Коксу	46	30,9	1801	0,039	1190
Шурак	10	0,8	1859	0,186	34
Канишбек	15	2,5	2208	0,151	508
Шикерга	16	2,8	1311	0,082	128
Ярхыч (Оби Кабуд)	47	41,1	1228	0,026	1160
Ягман	32	4,3	2268	0,071	204
Сурхдара	16	1,1	1534	0,094	56
Шурик	16	2,5	1347	0,090	115
Дидал	14	1,1	2325	0,161	51
Шохоби (приток) 308	13	1,1	2241	0,176	49
Оби Мазор	13	1,0	2002	0,154	48
Шурак	19	2,0	2215	0,118	91
Шохоби (приток) 311	15	1,9	1647	0,113	87
Шохоби (приток) 312	15	1,2	1969	0,131	55
Рукоб	21	2,1	1922	0,094	96
Сорбог	66	70,0	2463	0,037	1760
Шохоби (приток) 326	39	16,4	2163	0,056	455
Шохоби (приток) 329	12	0,7	868	0,075	38
Шохоби (приток) 330	11	0,2	1720	0,161	25

Расположение ледников, в зависимости от рельефа (орография) и распределения осадков, по высоте также разнообразны. Например, в бассейне реки Сурхоб ледники опускались до высоты 2300-2400 м, тогда как в районе Каракуля и выше по течению реки Мургаб они находятся не ниже 4400 м. При этом средний нижний уровень ледников имеет восходящую тенденцию с запада на восток. В тоже время если на западе страны (бассейн реки Кофарнихон) нижняя часть ледников находится на высоте 3650 м, то на востоке (Каракуль) находится на высоте 4860 м. Направление склонов меняется в зависимости от того, солнечный или не солнечный склон. Обычно ледники располагаются на северных склонах плато, на 200-300 м ниже

южных ледников. Высота ледников зависит от высоты хребтов и окружающих их вершин, и хребтов.

Известно, что изменение климата происходит каждые 12-15 лет, каждые 30 лет, каждые 70 лет, столетия. От этой закономерности зависит смена льда. Некоторые из ледников, которые подвержены этому изменению, называются движущимися ледниками (пульсирующие, неустойчивые), и следует отметить, что все ледники поднимаются в крутом направлении, их суточные скорости движения составляют 15-20 см и 25-40 см. Период нестабильности ледников зависит не только от изменения климата, но и от расположения ледников, формы ледников, увеличения массы и других факторов. Некоторое количество снега и фирн накапливается на ледниках в течение года, если таяние снега, фирн и льда больше, чем осадки, то ледники деградируют, а если количество снега и фирн над ледником больше, чем количество таяния, то размер ледника увеличивается. В этом случае большая часть ледника движется под действием силы тяжести и быстро движется вниз по склону долины. Тогда скорость движения ледника за сутки равна десяткам метров. Подвижные ледники быстро тают под воздействием высоких атмосферных температур, вызывая селевые потоки и наводнения в нижнем течении долины [198].

В 1988 в бассейне реки Шурак - Восточный передняя часть небольшого пульсирующего ледника №504 обрушился, и масса льда промчалась под уклон более 5 километров [200].

Ледник Баралмось, часть вод которого стекает в бассейн р. Сурхоб, а другая в бассейн р. Обихингоу, также представляет определенную опасность и может способствовать возникновению ЧС. Следует отметить, что таяние данного ледника периодически провоцирует селевые потоки в бассейне р. Арча Капа с последующими разрушениями международной автомобильной трассы и перекрытия русла р. Сурхоб. В виду того, то вышеупомянутые ледники бассейна р. Сурхоб не охвачены метеорологическими наблюдениями, то данных о климатических условиях гляциальной зоны не имеется.

Согласно каталогу ледников, внутригодовой ход температуры воздуха показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Внутригодовой ход температуры воздуха по данным метеостанции Гарм, Джиргаталь и Ляхш [194]

Месяц	Тепература воздуха					
	средняя			абсолютный максимум		абсолютный минимум
	Гарм	Джиргаталь	Ляхш	Гарм	Джиргаталь	Гарм
I	-4,2	-7,4	-9,4	11	8	-32
II	-2,7	-5,6	-7,2	15	4	-29
III	3,2	-0,2	-0,3	22	20	-20
IV	11,2	7,7	7,0	31	28	-4
V	16,2	13,2	11,9	36	32	1
VI	19,8	17,2	16,3	38	34	4
VII	23,7	21,5	19,5	39	35	7
VIII	24,0	21,8	19,7	40	36	7
IX	19,5	16,8	15,2	37	33	2
X	12,4	9,0	7,9	33	30	-5
XI	5,9	2,2	3,1	27	23	-16
XII	-0,1	-3,2	-6,6	17	14	-24
Год	10,7	7,6	6,3	40	36	-32

Самым холодным месяцем в бассейне р. Сурхоб является январь, самым тёплым август. С февраля начинается постепенное повышение температуры воздуха. Переход средних суточных температур через 0° на западе долины наблюдается в начале марта, а на востоке в середине марта. Осенью переход температур через 0° на востоке долины происходит в конце ноября, а на западе в середины декабря [194].

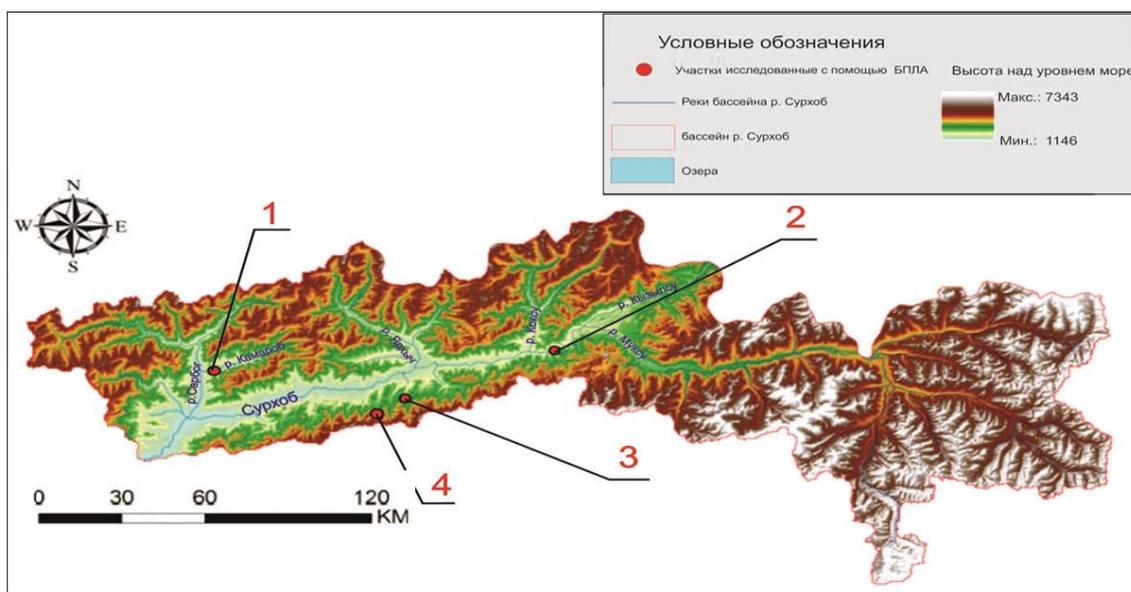
Основная масса осадков в этой зоне выпадает в земные и весенние время, а самые сухие месяцы - это июль, август и сентябрь (смотреть главу 3, рисунок 3.7).

С увеличением высоты местности растут годовая сумма осадков, их вертикальный градиент и количество твёрдых осадков. Выше 2000 м более половины годовой суммы осадков на Памире и Памиро Алае выпадает в виде снега, на 3000 м – около 70%, а выше 4200 м практически все осадки являются твёрдыми [194].

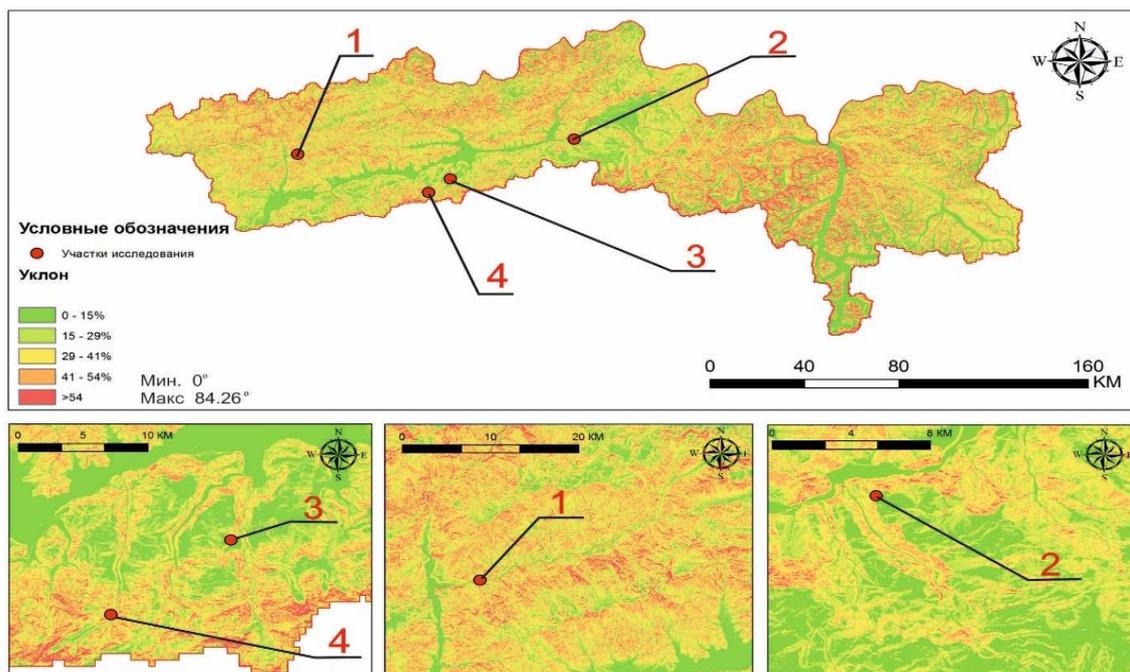
Селевые процессы составляют главную угрозу населению, поскольку в пределах описываемой площади они широко распространены. Сели отмечены по притокам бассейна крупных

рек Сурхоб, Муксу, Кызылсу. Благоприятными условиями для формирования селей являются крутосклонный сильно расчленённый рельеф, значительные уклоны (7-22°) русел постоянных и временных водотоков, наличие значительных объёмов рыхлообломочного материала в прирусловых и русловых частях склонов долин. Очень важным фактором является наличие водосборного бассейна, в пределах которого скапливается большое количество осадков. Нередко возникновение селей вызывает бурное таяние снежного покрова и ледников в весенне-летний период. Оползни также широко распространены в районе в виде как мелких, так и средних размеров. Они угрожают движению автомобильного транспорта, жилым домам, другим постройкам. При оползнях интенсивно также идёт процесс выбывания земель из сельскохозяйственного оборота [158].

На основе проведённых исследовательских, поисковых работ и с учетом сложной и разнообразной орографии (большие вариации углов наклона 0° - 84,26 °), в бассейне реки Сурхоб, для изучения с применением БПЛА были выбраны участки: ущелье Камароб, низовья ледника Баралмось, бассейн р. Шурак, ледник Дидаль (рисунки 4.3 и 4.4).



**Рисунок 4.3 –ЦМР бассейна р. Сурхоб. Мониторинг, с помощью БПЛА: 1 - ущелье Камароб; 2 - низовья ледника Баралмось; 3 - бассейн р. Шурак; 4 - ледник Дидаль**



**Рисунок 4.4 - Карта склонов бассейна р. Сурхоб. 1 - ущелье Камароб; 2 - низовья ледника Баралмоь; 3 - бассейн р. Шурак; 4 - ледник Дидадь**

Как видно, крутые углы склонов препятствуют развитию почвенного слоя и становятся причиной постоянного риска формирования селевого потока. Таким образом, вышеизложенное (труднодоступность, большая крутизна склонов и т.д.) позволяет утверждать, что наиболее приемлемым методом мониторинга, в существующих условиях является дистанционное зондирование земли (ДЗЗ).

Следует отметить, что исследования с применением ДЗЗ необходимо осуществлять с учётом двух общих категорий переменных, позволяющие определить зоны опасного формирования риска селевых явлений:

1 - внутренние или статические переменные, которые влияют на восприимчивость к селям (геология, уклон, вид уклона, долгосрочные схемы дренажа, высота и сцепление материалов).

2 - динамические или внешние переменные (землетрясения, сильный ливень и др.), которые имеют тенденцию вызывать сели [201- 206].

*Применение данного подхода изложено ниже.*

#### **4.2.1. Сравнительные исследования метеорологических данных (осадки, температура) с применением современных операционных систем дистанционного зондирования земли**

Мониторинг и прогнозирование опасных гидрологических процессов с использованием современных методов и средств ДЗЗ основывается на анализе и оценке осадков, которые являются одним из основных причин формирования селепроявлений.

Без использования современных технологий, в том числе и дистанционное зондирование невозможно проводит комплексные экологические, географические и другие исследования. Геостационарные спутники являющийся одним из инструментов ДЗЗ, могут обеспечивать мониторинг локальных участков земли.

В частности, операционная система, по оценке осадков основанная на информации ДЗЗ с использованием искусственных нейронных сетей (PERSIANN) была использована нами для проведения мониторинговых исследований [207].

Данная система характерна применением процедуры классификации/ аппроксимации функции нейронной сети для расчета оценки интенсивности дождя в каждом пикселе  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  инфракрасного изображения яркостной температуры, предоставленного геостационарными спутниками. Функция адаптивного обучения облегчает обновление параметров сети всякий раз, когда доступны независимые оценки осадков. Система PERSIANN была основана на геостационарных инфракрасных изображениях, а затем была расширена за счёт использования как инфракрасных, так и дневных изображений видимого диапазона. Используемый алгоритм PERSIANN основан на геостационарных длинноволновых инфракрасных изображениях для генерации глобальных осадков. Продукт осадков охватывает от  $50^\circ$  южной широты до  $50^\circ$  северной широты во всем мире [208].

Следует отметить, что в применяемой системе используются сеточные инфракрасные изображения глобальных геосинхронных спутников (Metsat-6, Metsat-7, GOES-8, GOES-10 и GMS-5), предоставленные CPC, NOAA для получения 30-минутных

значений интенсивности дождя, агрегированных в 6-часовые накопленные осадки. При этом, параметры модели регулярно обновляются с использованием оценок осадков с низкоорбитальных спутников NOAA-15, -16, -17, TRMM, DMSP F13, F14, F15 [209].

Необходимо учитывать, что спектральные интервалы представляют собой длинноволновый инфракрасный канал (10,2-11,2 мкм), при применении спутников GOES-8, GOES-10, GMS-5, Meteosat-6 и Meteosat-7. При этом, мгновенные оценки количества осадков со спутников TRMM, NOAA и DMSP осуществляются при пространственном масштабе  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  шкала широты / долготы и временной шкале от 30 минут до 6 часов накопленных осадков.

С момента своего создания (1997 г.), PERSIANN является постоянно развивающейся системой. Текущая операционная версия PERSIANN (ссылка на соответствующую страницу поддержки принятия решений) генерирует описанный выше продукт глобальных карт осадков с двухдневной задержкой, связанная с международными соглашениями о доступе к данным, позволяющие получать доступ к глобальным ИК-композитам через два дня после приобретения.

Ниже рассмотрены этапы обработки полученных данных и специфика применения системы PERSIANN.

К основным этапам обработки отнесены [208]:

- Ежедневная, в течение 15 минут, загрузка с полным разрешением, глобальных ИК-композитов с сервера NCEP. При этом, данные осадков TRMM level 2A (TRMM-2A25) загружаются дважды в день также с двухдневной задержкой;

- Загрузка, дважды в день с двухдневной задержкой, данные по осадкам TRMM level 2A (TRMM-2A25);

- Запрос, через каждые 30 минут, спутниковой системы активного архива NOAA для получения получить последнюю оценку осадков на основе микроволнового излучения от 6 дополнительных микроволновых приборов на борту NOAA K, L и M (15, 16 и 17 соответственно) и DMSP 7,8 и 9;

- Архивация данных в режиме реального времени, для использования в любое время, при условии доступности соответствующих глобальных ИК-композигов;
- Использование, ежедневно, данных глобального ИК-диапазона от CHRS для получения промежуточных 30-минутных произведений осадков на 4 км;
- Облучение модели нейронной сети с использованием всех микроволновых оценок осадков, доступных для конкретного, анализируемого дня;
- Агрегация промежуточного продукта для получения шестичасовых карт атмосферных осадков 0,25;
- Высвобождение продукта в качестве предварительных оценок осадков PERSIANN.

В другой версии PERSIANN используются методы компьютерной обработки изображений и распознавания образов для разработки системы классификации облаков и оценки количества осадков на участках на основе спутниковых инфракрасных изображений.

Система PERSIANN- Cloud Classification System (система классификации облаков) позволяет категоризировать особенности облачных пятен на основе высоты облака, площади и изменчивости текстуры, оценённых по спутниковым изображениям [173].

Продукт имеет пространственно-временное разрешение при почасовом,  $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ . Алгоритмы PERSIANN-CCS оценивают осадки по инфракрасным изображениям геостационарной околоземной орбиты (GEO-IR) с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) и методов системы классификации облаков [210-211].

Операционная система PERSIANN - *система оценки осадков на основе информации дистанционного зондирования с использованием искусственных нейронных сетей* - использует процедуры классификации / аппроксимации функции нейронной сети для вычисления оценки интенсивности дождя в каждом пикселе  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  инфракрасного изображения яркостной температуры, предоставленного геостационарными спутниками.

Операционная система PERSIANN-CDR - *оценка осадков на основе информации дистанционного зондирования с использованием искусственных нейронных сетей* - запись климатических данных, обеспечивает ежедневные оценки количества осадков с пространственным разрешением 0,25 градуса в полосе 60° южной и 60° северной широты с 1983 года до настоящего времени. Оценка осадков производится с использованием алгоритма PERSIANN на данных инфракрасного спутника GridSat-B1, а обучение искусственной нейронной сети выполняется с использованием ежечасных данных об осадках на этапе IV Национальных центров прогнозирования окружающей среды (NCEP). PERSIANN-CDR корректируется с использованием ежемесячного продукта Global Precipitation Climatology Project (Глобальный проект климатологии осадков - GPCP) версии 2.2 (GPCPv2.2), так что ежемесячные средние PERSIANN-CDR ухудшаются до разрешения 2,5 градусов, что соответствует GPCPv2.2. PERSIANN CDR - это запись климатических данных, которую Национальный исследовательский совет (NRC) определяет как временные ряды измерений достаточной длины, последовательности и непрерывности для определения изменчивости и изменения климата [210, 212].

Операционная система PDIR - *оценка осадков по данным дистанционного зондирования с использованием искусственных нейронных сетей* - динамическая инфракрасная интенсивность дождя, близкая к реальному времени (PDIR), является разработанным спутниковым продуктом с высоким разрешением (0,04° x 0,04° или = 4 км на 4 км). PDIR-Now реализован в глобальной спутниковой системе мониторинга осадков в реальном времени UCI CHRS – iRain. [206].

Метод CMORPH (Climate Prediction Center morphing method) - *метод морфинга Центра прогнозирования климата* используются векторы движения, полученные из получасовых геостационарных спутниковых ИК-изображений, для распространения относительно высококачественных оценок осадков, полученных на основе пассивных микроволновых данных. Кроме того, форма и интенсивность характеристик осадков изменяются

(трансформируются) в течение времени между сканированиями микроволнового датчика путем выполнения взвешенной по времени линейной интерполяции. Этот процесс даёт пространственно и временно полный анализ осадков, полученных с помощью микроволнового излучения, независимо от инфракрасного температурного поля [213].

Спутниковые оценки осадков, полученные с помощью метода морфинга (CMORPH), обрабатываются и корректируются смещением по сетке 8 км на 8 км по всему земному шару (60° ю.ш. – 60° с.ш.) и с 30-минутным временным разрешением с января 1998 г. по настоящее время для формирования записи климатических данных (CDR) глобального анализа осадков с высоким разрешением [214]. NOAA Hydro-Estimator (HE) - *гидрооценщик* - использует данные в инфракрасном (IR) диапазоне от геостационарных спутников NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований) - оценки состояния окружающей среды (GOES) для оценки интенсивности дождя. Оценки осадков со спутников могут предоставить критическую информацию об осадках в регионах, где данные датчиков или радаров недоступны, или ненадёжны, например, над океанами или в малонаселённых регионах.

Спутниковые оценки осадков используются в оперативном режиме с конца 1970-х годов, начиная с ручного интерактивного анализатора ливневых паводков [215], а затем переходя к полностью автоматизированному автооценке [216]. Hydro-Estimator [217-218] - это оперативный алгоритм текущего поколения в NESDIS, который используется с 2002 года. Оценки производятся каждые 15 минут для континентальной части США, а также для остального мира с использованием доступных геостационарных данных по Европе, Африке и Западной Азии (METEOSAT) и Восточной Азии (MTSAT).

Нами, при использовании разработок алгоритмов PERSIANN-CCS и методов их применения были анализированы научные исследования [211, 219-223] посвящённые данной проблематике.

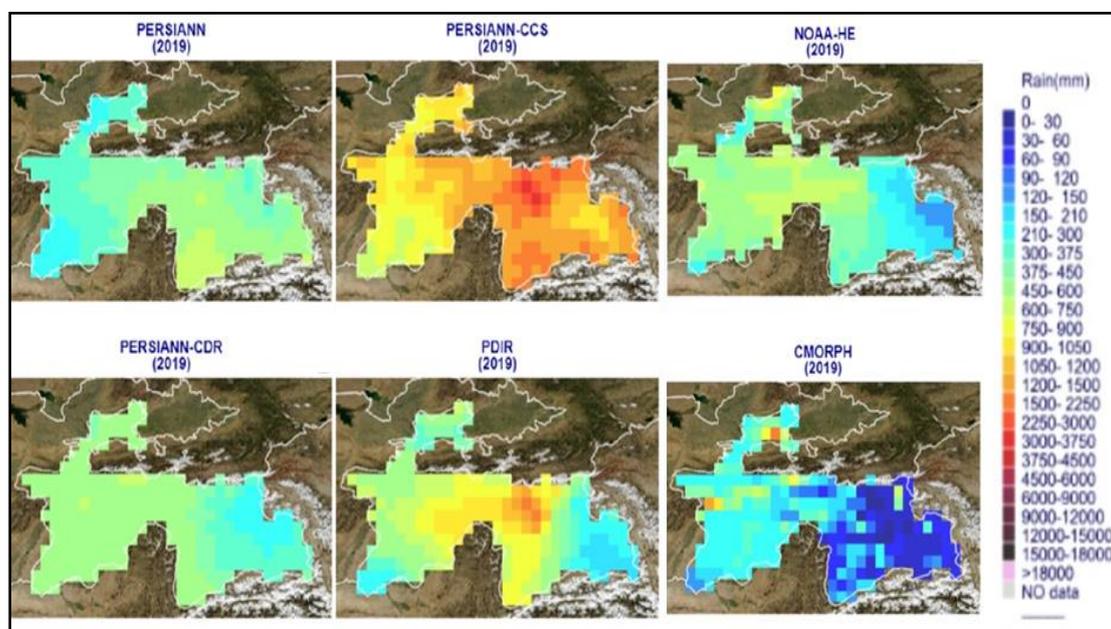
Полученные результаты годового количества осадков за 2019 г. в Таджикистане по данным ДЗЗ показаны в таблице 4.3,

рисунках 4.5 и 4.6. При средней интенсивности дождя вышеописанные системы наиболее приближенные данные, в то время как при максимум интенсивности дождя видны большие различия в PERSIANN-CCS и CMORPH по сравнению с другими системами.

Данные по осадкам показывают, что на восточном Памире и юго-западной части Таджикистана количество осадков меньше чем в центральном Памире. В бассейне р. Сурхоб и Обихингоу и некоторых в районах Гиссарского хребта и также наблюдаются некоторое увеличение осадков.

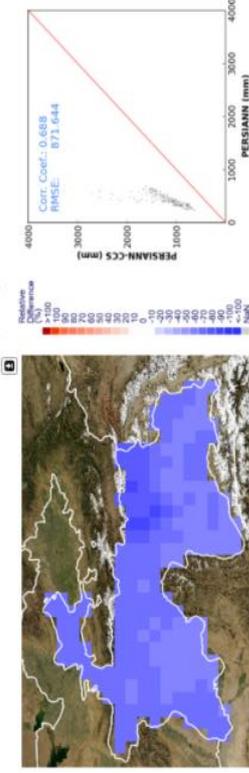
Таблица 4.3 – Результаты годового количества осадков за 2019 г. по данным ДЗЗ в Таджикистане

	PERSIANN N	PERSIANN- CCS	PERSIANN- CDR	PDIR	CMORPH H	NOAA- HE
Кол. точек	660	660	660	660	660	660
Средняя интенсивность дождя (мм)	429,303	1222,483	458,996	613,89	220,028	438,18
Максимум. интенсивность дождя (мм)	686,37	3454,0	633,414	1703	2133,36	841,96

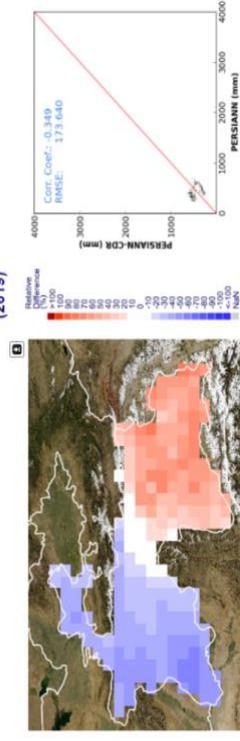


**Рисунок 4.5 – Карта осадков, полученная по данным CHRS с использованием данных ДЗЗ. Результат годового количества осадков за 2019 г. в Таджикистане**

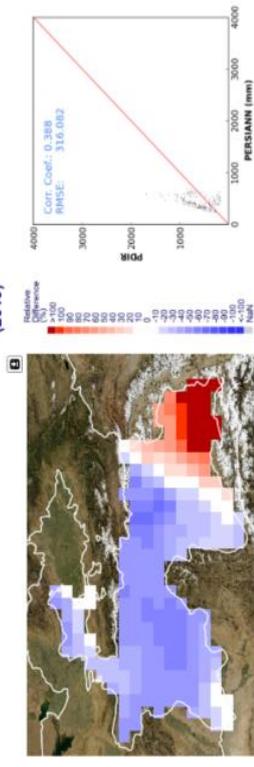
PERSIANN vs. PERSIANN-CCS (2019)



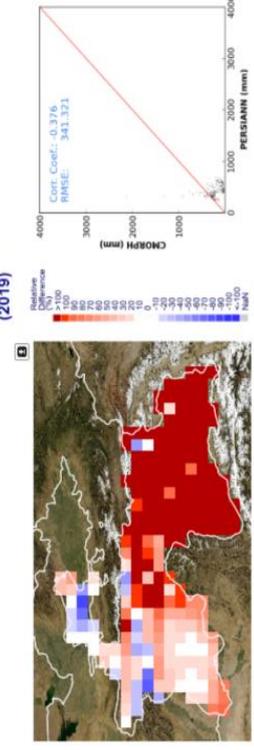
PERSIANN vs. PERSIANN-CDR (2019)



PERSIANN vs. PDIR (2019)



PERSIANN vs. CMORPH (2019)



PERSIANN vs. NOAA-HE (2019)

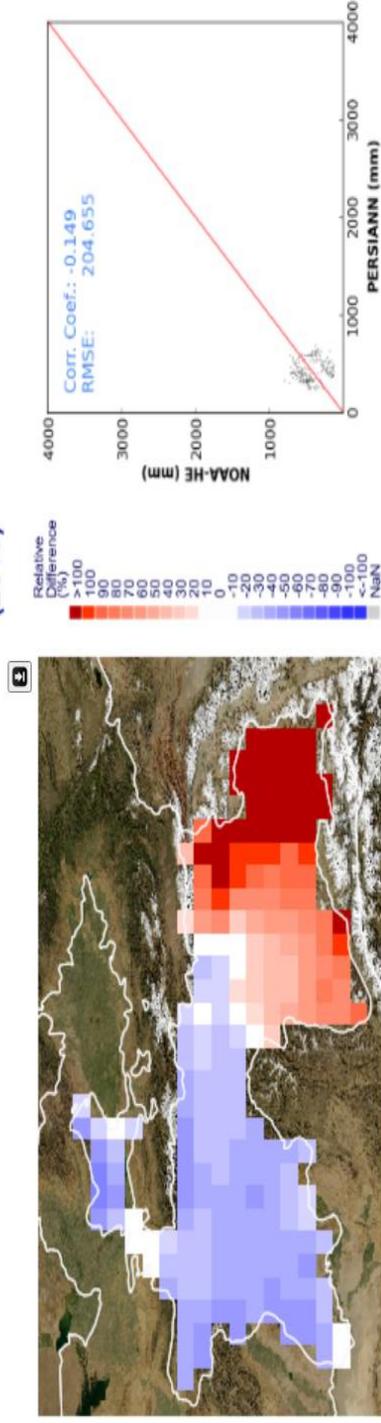


Рисунок 4.6 – Результат годового количества осадков за 2019 г. в Таджикистане по данным ДЗЗ

Исходя из данных таблицы 4.4 по показателям корреляции, степень взаимосвязи между PERSIANN и PERSIANN-CCS максимальна, а в случае CMORPH взаимосвязь наименьшая. Другим набором метеорологических данных является CRU TS (временные ряды с координатной привязкой в единицах климатических исследований) отдела климатических исследований (CRU).

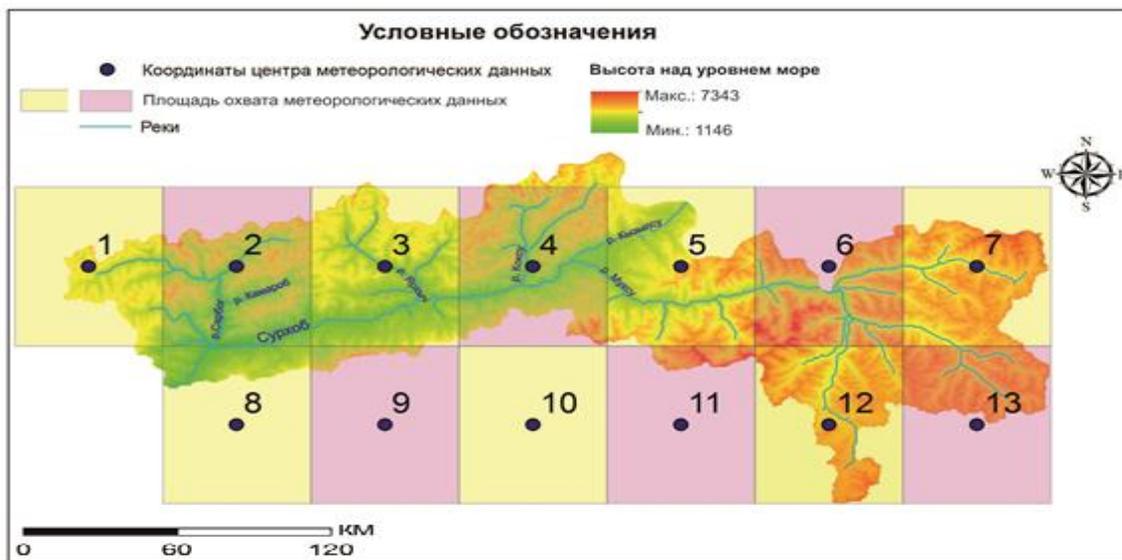
Данная организация признана одной из ведущих мировых институтов, занимающихся изучением естественных и антропогенных изменений климата. Набор данных CRU TS обеспечивает ежемесячную сетку наземных (за исключением Антарктиды) наблюдений с высоким разрешением, начиная с 1901 года. Эти наблюдения включают температуру (TMP), осадки (PRE), дневной диапазон температур (DTR) и давление пара (VAP) [224].

Таблица 4.4 – Сравнение PERSIANN с остальными инструментами данных

PERSIANN	PERSIANN-CCS	PERSIANN-CDR	PDIR	CMORPH	NOAA-HE
Корреляция	0.688	-0.349	0.388	-0.376	-0.149
Разница осадков (мм)	793.179	162,831	259.846	268,407	186.752
Вероятность обнаружения	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Коэффициент ложной тревоги	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Коэффициент смещения (дождь: без дождя)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Данная организация признана одной из ведущих мировых институтов, занимающихся изучением естественных и антропогенных изменений климата. Набор данных CRU TS обеспечивает ежемесячную сетку наземных (за исключением Антарктиды) наблюдений с высоким разрешением, начиная с 1901 года. Эти наблюдения включают температуру (TMP), осадки (PRE), дневной диапазон температур (DTR) и давление пара (VAP) [224].

Территория бассейна р. Сурхоб и зона охвата метеорологических данных показано на рисунке 4.7. При этом включённые данные температуры и осадков получены непосредственно из набора данных CRU TS 4.04 и связанных файлов наблюдений.



**Рисунок 4.7 – Площадь охвата метеорологических данных STU TS**

Среднемесячная температура по данным CRU TS с 1901 по 2019 г. по исследуемому объекту (бассейн реки Сурхоб) представлены в таблице 4.5 и на рисунке 4.8.

В таблице 4.6. приведены данные по среднемесячным осадкам, а на рисунке 4.9. представлены результаты исследований (с 1901 по 2019 г.г.) по среднемесячным осадкам бассейна реки Сурхоб.

Как видно из представленных материалов, самая высокая ежемесячная температура наблюдается в июле (+18,9°C) и августе (+18,4°C), а низкая температура (- 20.5°C) в январе.

Как видно из таблицы 4.6 и рисунка 4.9, больше всего осадков выпадает в марте и апреле, а меньше всего осадков выпадает в августе и сентябре. На рисунке 4.7 квадрат 1, 2, 5 и 8 являются территориями, где выпадают больше осадков, а квадраты 7 и 13 где выпадают меньше осадков. В отличие предыдущих систем ДЗЗ, CRU TS объединяют данные получение посредством спутников, стационарных с последующей координатной привязкой.

Таким образом, данные осадков полученные по данным геостационарных спутников позволяют обеспечивать мониторинг участков в особенности горных территорий ввиду отсутствия стационарных станций. Благодаря их широкому охвату от 50° - 60° южной широты до 50° - 60° северной широты, применение данных методов также целесообразны для территории Таджикистана.

Таблица 4.5 – Среднемесячная температура в бассейне р. Сурхоб полученным по данным CRU TS (1901-2019), °C

№	Координаты данных	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
1	39.25-69.75	-12.8	-11.6	-6.7	-0.5	3.9	8.8	12.4	12.0	7.2	0.9	-5.4	-10.1
2	39.25-70.25	-9.9	-8.3	-3.0	3.8	8.2	12.8	16.3	15.7	10.9	4.5	-2.0	-7.0
3	39.25-70.75	-10.7	-8.8	-3.4	3.7	8.1	12.6	16.0	15.7	10.9	4.4	-2.4	-7.5
4	39.25 - 71.25	-13.4	-11.8	-6.2	0.7	5.0	9.5	13.2	13.0	8.3	1.8	-5.0	-10.2
5	39.25-71.75	-18.2	-16.9	-11.6	-5.0	-0.9	3.7	7.6	7.7	3.1	-3.4	-10.1	-15.0
6	39.25-72.25	-18.1	-16.6	-11.1	-4.3	-0.2	4.3	8.2	8.2	3.7	-2.9	-9.7	-14.9
7	39.25-72.75	-20.5	-19.1	-13.6	-7.0	-3.1	1.5	5.5	5.7	1.1	-5.4	-12.2	-17.3
8	38.75-70.25	-7.6	-5.6	-0.3	6.6	11.1	15.7	18.9	18.4	13.7	7.4	0.8	-4.5
9	38.75-70.75	-10.8	-9.0	-3.6	3.4	7.7	12.2	15.8	15.5	10.9	4.5	-2.3	-7.6
10	38.75-71.25	-14.0	-12.4	-7.0	-0.3	4.0	8.5	12.3	12.2	7.7	1.3	-5.5	-10.7
11	38.75-71.75	-16.4	-15.0	-9.6	-3.0	1.1	5.6	9.6	9.6	5.1	-1.4	-8.1	-13.2
12	38.75-71.25	-19.8	-18.6	-13.3	-7.0	-3.1	1.5	5.6	5.8	1.4	-5.1	-11.6	-16.5
13	38.75-72.75	-18.4	-17.0	-11.4	-4.8	-0.9	3.5	7.6	7.6	3.2	-3.2	-10.0	-15.2

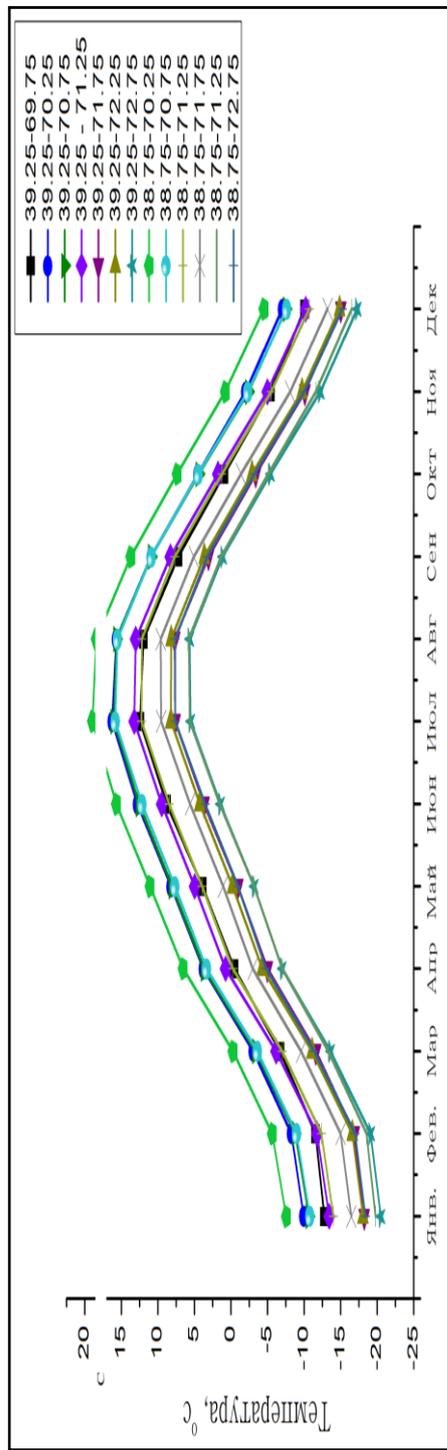


Рисунок 4.8 – Среднемесячная температура в бассейне р. Сурхоб (1901-2019)

Таблица 4.6 – Среднемесячные осадки в бассейне р. Сурхоб полученным по данным CRU TS (1901-2019)

№	Координаты данных	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен	Окт.	Ноя	Дек
1	39.25-69.75	72.1	77.5	106.7	97.7	86.4	27.4	0.0	0.0	0.0	37.8	64.5	71.4
2	39.25-70.25	67.6	73.5	102.6	93.0	83.9	28.1	2.0	0.0	0.9	35.5	60.8	67.1
3	39.25-70.75	62.9	68.7	95.5	86.6	79.3	29.7	5.2	0.0	1.8	36.6	57.6	65.6
4	39.25 - 71.25	61.8	66.7	91.2	81.3	78.6	34.9	8.6	0.0	1.9	37.6	62.3	68.6
5	39.25-71.75	71.4	73.6	101.3	86.9	87.6	43.5	9.9	0.0	3.8	47.8	77.4	83.5
6	39.25-72.25	67.5	67.8	92.7	79.3	85.0	43.4	12.1	1.9	6.0	48.1	74.4	80.3
7	39.25-72.75	48.1	47.5	70.0	63.5	69.5	39.0	11.3	2.0	4.8	37.1	54.6	58.2
8	38.75-70.25	67.1	76.5	103.9	94.0	82.6	25.1	3.8	0.0	0.9	34.2	54.6	63.5
9	38.75-70.75	63.3	69.8	97.6	87.8	78.4	28.4	5.8	0.0	1.9	33.9	54.8	65.2
10	38.75-71.25	65.0	69.6	95.2	82.8	76.7	33.0	8.1	0.0	3.9	36.7	62.3	68.9
11	38.75-71.75	70.0	72.9	97.7	84.5	83.0	39.7	13.2	2.9	7.1	44.3	71.9	77.2
12	38.75-71.25	69.9	69.8	94.5	81.6	81.5	38.1	8.1	0.0	4.2	45.1	71.8	77.9
13	38.75-72.75	61.8	59.0	79.8	68.2	72.2	36.8	10.2	2.8	6.5	39.3	63.2	67.3

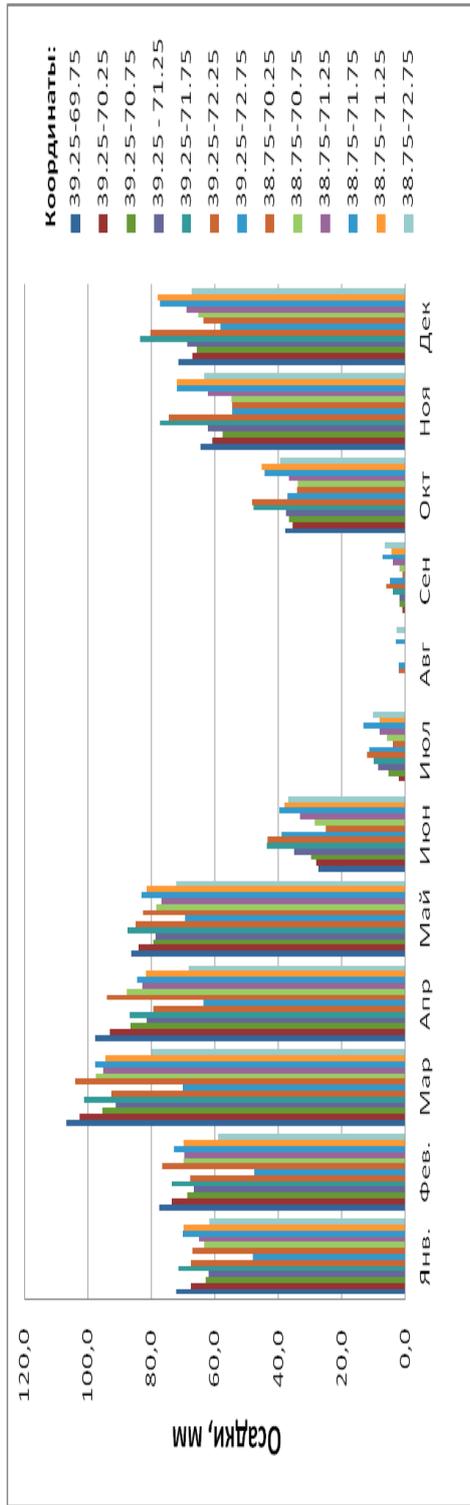


Рисунок 4.9 – Среднемесячные осадки в бассейне р. Сурхоб (1901 – 2019)

#### 4.2.2. Особенности мониторинга селеопасных территорий с применением ДЗЗ при отсутствии стационарных метеоданных

В условиях Таджикистана при отсутствии или недоступности данных по стационарным метеостанциям, актуальным становятся использование данных геостационарных спутников и онлайн данных.

При анализе и оценке полученных данных в качестве примера осуществлено сравнение с данными по метеостанции Ганджина (рисунок 4.10).

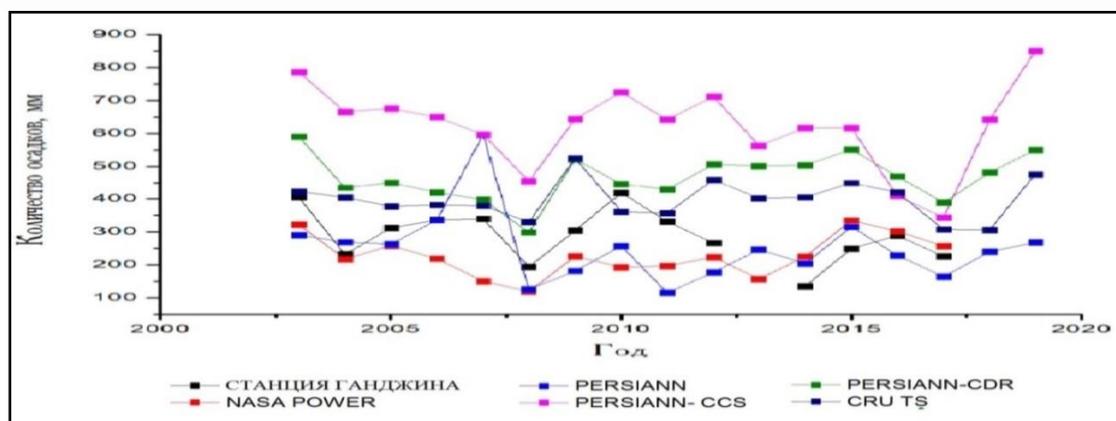


Рисунок 4.10 - Сравнительные графики годовых сумм количества осадков по данным метеостанции Ганджина с данными ДЗЗ

На основе полученных данных установлено, что разность между данными полученными на основе дистанционного зондирования осадков (CPU TS, PERSIANN, NASA POWER, PERSIANN CDR) и данными метеостанции Ганджина незначительны. Не большое отклонение данных ДЗЗ от значений, полученных на стационарной метеостанции Ганджина, связана с тем, что глобальные данные получаемые с помощью спутников ориентированы на большие территории, с разрешением от 4 км на 4 км.

Вопросам создания и рациональной эксплуатации водохранилищ, в том числе при каскадном их расположении, обеспечения безопасности гидротехнических сооружений посвящены исследования А.Б. Авакяна, Ф.А. Ахророва, А.Ё. Ёрова, М.С. Кожевниковой, У.И. Муртазаева, С.Т. Наврузова, А.М. Никитина, В.П. Салтанкина, А.С. Саттарова, А.Р. Фазылова, В.А.

Шарапова, В.М. Широкова, Ш.М. Эшниезова и др. Ниже приведены результаты анализа и оценки состояния заиления чащи Нурекского водохранилища и его речной части, с применением современных методов и технологий ДЗЗ, с учетом перекрытия русла реки Вахш в створе строительства Рогунской ГЭС.

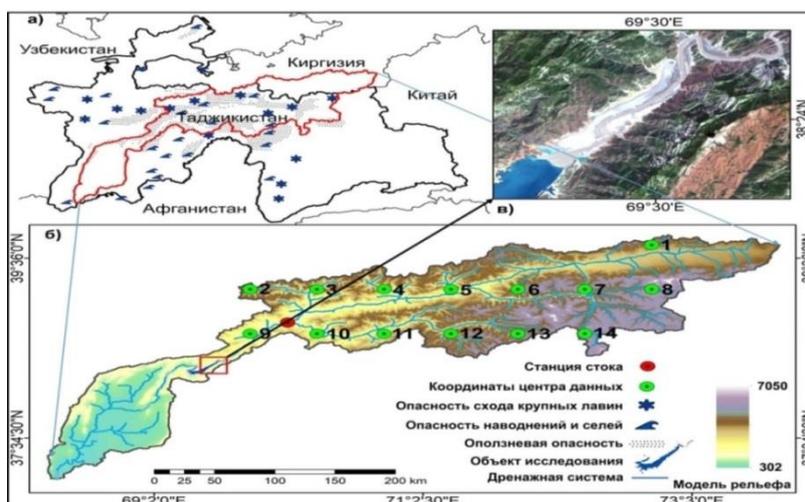
«Нурекское водохранилище приурочено к межгорной впадине двух крупных орографических элементов - хребтов Сурхку и Вахшского и обладает очень малой удельной площадью затопления на 1 квт установленной мощности - 0.05 км<sup>2</sup>» [225].

Среднегодовой твёрдый сток реки Вахш в Нурекское водохранилище по проекту строительства Нурекской ГЭС, был принят равным 88.7 миллионам м<sup>3</sup>/год. К концу 2000 г. полный объём водохранилища уменьшился до 8,447 км<sup>3</sup> при проектном объёме 10,5 км<sup>3</sup>. Объём тела заиления складывался из стока взвешенных наносов 1,7 км<sup>3</sup> (82,8%), из предполагаемого стока влекомых (донных) наносов 0,328 км<sup>3</sup> (около 16%) и из грунтов, поступивших вследствие переработки берегов водохранилища и из прилегающих склонов стоками внутри бассейнов малых рек и временных водотоков 0,025 км<sup>3</sup> (1,2%).

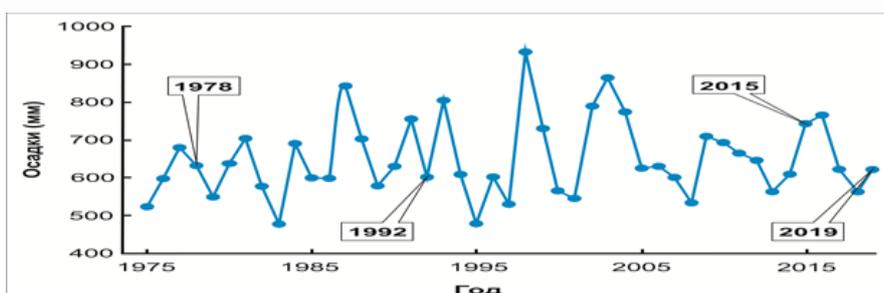
«Установлено, что суммарный (расчетный) объём тела заиления водохранилища в конце 2000 года составлял 2,053 км<sup>3</sup>. При этом основная часть влекомых и часть взвешенных наносов сосредоточилась в речной части, а значительная часть взвешенных наносов приходится на долю емкости уровня мертвого объема озёрной части водохранилища» [226]

Следует отметить, что набор метеорологических данных с использованием методов дистанционного зондирования CRU TS был использован в частности для мониторинга заиления водохранилищ (рисунок 4.11) [227].

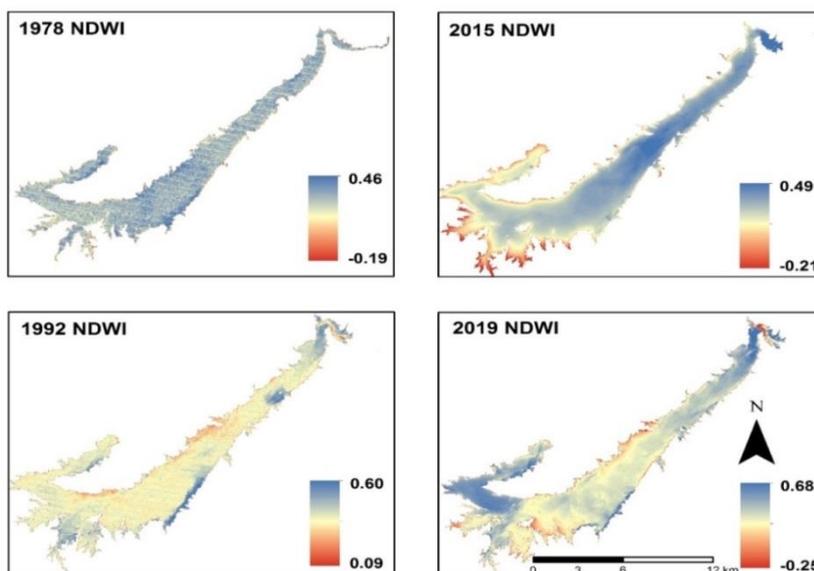
Среднегодовые осадки с 1975 по 2019 в бассейне р. Вахш и выбранные временные периоды для нашего исследования, полученные с помощью метеорологических данных CRU TS показаны на рисунке 4.12. Используя данные нормализованного разностного водного индекса (NDWI) с 1978 по 2019 год (рисунок 4.13), подтверждена эффективность применения данного метода для мониторинга заиления в водохранилище Нурекской ГЭС.



**Рисунок 4.11 – Карта исследуемого бассейна реки Вахш. а - зоны возможного проявления опасных гидрологических процессов; б - карта модели рельефа и дренажной системы; в - изображение натуральной цветовой композиции исследуемого объекта**



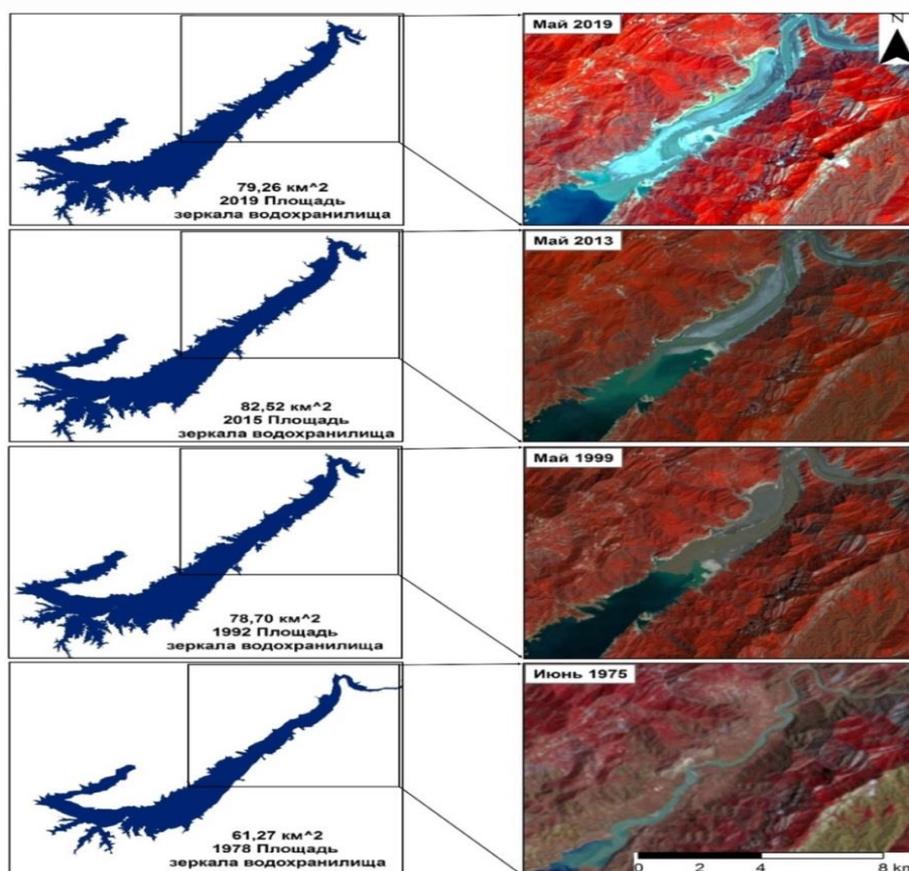
**Рисунок 4.12 – Среднегодовые значения осадков по данным CRU TS в бассейне реки Вахш с 1975 по 2019 гг.**



**Рисунок 4.13 – Нормализованный разностной водный индекс (NDWI)**

К одним из видов опасных гидрологических явлений, вызывающие чрезвычайные ситуации техногенного характера, относится транспорт твердого стока (наносов) и критическое отложение в чаше русловых водохранилищ горно-предгорных зон РТ.

Исследования по визуализации и мониторинга заилений наносами чаши водохранилища Нурекской ГЭС, выполнялись с использованием изображения Landsat, отснятые 25 июня 1975, 08 мая 1999, 30 мая 2013 и 31 мая 2019 гг. (рисунок. 4.14). Стоит также отметить, что последние снимки были отсняты на пару месяцев раньше снимков, использованных для расчёта NDWI. Авторами использованы набор данных Landsat с качеством уровня 1Т (исправленная местность), который получили из сервиса EarthExplorer Геологической службы США (USGS) [227].



**Рисунок 4.14 - Карта изменения площади зеркала водохранилища и состояние заиления.**

Анализ значений водного индекса позволил, установить, что понижение среднего значение данного индекса начинает происходить с 1992 с года, с отметки 0.31, достигая своего минимума в 2015 году

при отметке 0.25. В то время как максимальные значения индекса за исследуемый период снижаются от 0.60 в 1992 году до 0.49 в 2015 году. Исследованиями установлено, что за период с 1978 по 2015 г за счёт увеличения уровня заиления площадь, зеркала водохранилища Нурекской ГЭС увеличивается на 34. 68%. Временной анализ значений индекса воды со спутниковых данных довольно сильно зависит от количества жидких осадков. Следовательно, для определения временных периодов с похожим среднегодовым уровнем осадков, в том числе и жидких осадков, был проанализирован набор метеорологических данных CRU TS.

Вышеизложенное подтверждает тезис, о возможности и перспективах использования современных геоинформационных технологий, в том числе с использованием БПЛА, для выполнения задач связанных с мониторингом, оценкой, картированием, возможным прогнозированием и предотвращением, риска возникновения стихийных бедствий и управления ими.

Использование БПЛА позволяет осуществлять мониторинг опасных, труднодоступных горных, предгорных районов с высоким риском возникновения опасных природных явлений. При этом платформы БПЛА с камерами могут обеспечивать картографирование и мониторинг землетрясения, оползней, эрозий, селей, наводнений, а также обнаружении пожаров и других стихийных бедствий, что позволило существенно расширить возможности воздушного мониторинга, и повысить уровень доступности подобных технологий в Таджикистане.

Следует отметить, что в РТ накоплен определенный опыт применения БПЛА. В частности, были реализованы исследования по мониторингу современного состояния Сарезского озера, Ромитского ущелья [228], ледника Дидадь, Дангаринского и Варзобского районов, в которых принимал непосредственное участие лично автор.

#### **4.2.3. Мониторинг селеопасных горных территорий Таджикистана**

В настоящее время дистанционные методы исследования природных явлений в том числе и опасных, имеют существенное

значение. В частности, для изучения территорий селепроявлений нашли широкое применение аэровизуальные наблюдения, дешифрование аэрофотоснимков и космических снимков.

Существуют следующие виды аэровизуальных наблюдения:

**1. Рекогносцировочные наблюдения** - эффективны при крупномасштабном картировании селевых водосборов и осуществляются перед началом или ходе полевых работ с целью ознакомления с природными условиями территории и оценить геолого-геоморфологического и гидрографического строение каждого картируемого водосбора и его селеобразующие возможности: выявить области питания селей твёрдым материалом, установить наиболее опасные селевые очаги, оценить возможность и степень участия в селеобразующих процессах ледников и снежников, оползней, оплывин, осыпей, и иных накоплений.

**2. Контрольные наблюдения** - проводят с целью уточнения, проверки или детализации данных камерального дешифрирования.

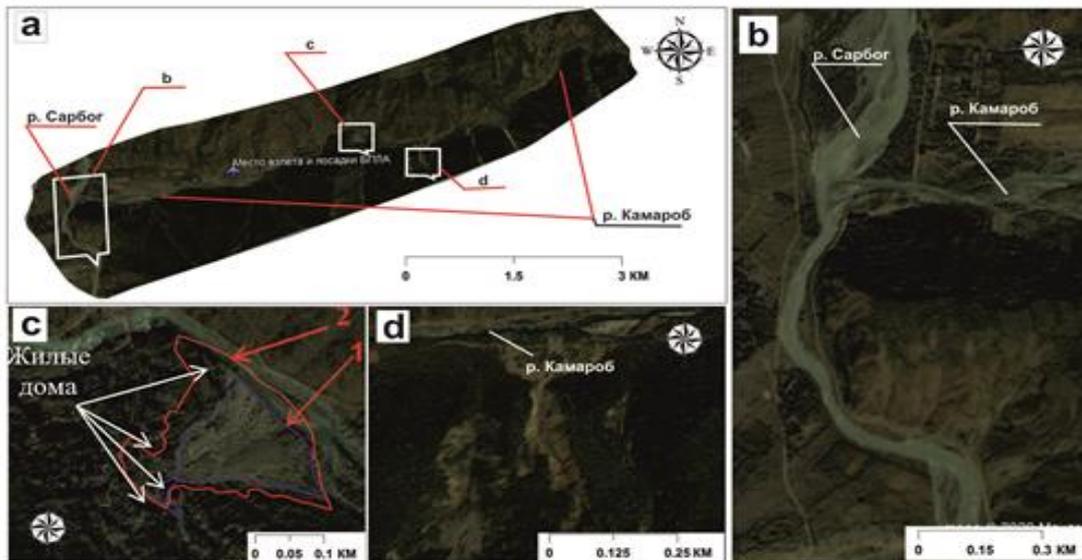
**3. Дежурные обследования** - проводят периодически в наиболее опасных водосборах для сравнительного аэронаблюдения за развитием и интенсивностью тех или иных процессов и явлений на определённых очагах и участках, которые могут привести к формированию селей [136].

Современные виды аэрофотоснимков высокого разрешения позволяют незамедлительно провести исследование местности с воздуха без риска для людей, особенно в горных условиях, оценить, за несколько часов, ущерб от стихийных бедствий при селевом потоке, координировать работу группы по спасению, а также в кратчайшее время подготовит карту местности.

В частности, обработка снимков БПЛА полученные автором в процессе аэрофотосъёмки в исследуемых участках и близлежащих территории были проведены в программе Pix4D и сервисе Drone Deploy и построены ортофотомозаики, цифровые модели высоты, топографические карты и 3D-модели местности.

На основе анализа полученных данных, по исследуемому объекту – Ущелье Камароб космоснимков из ресурса Google

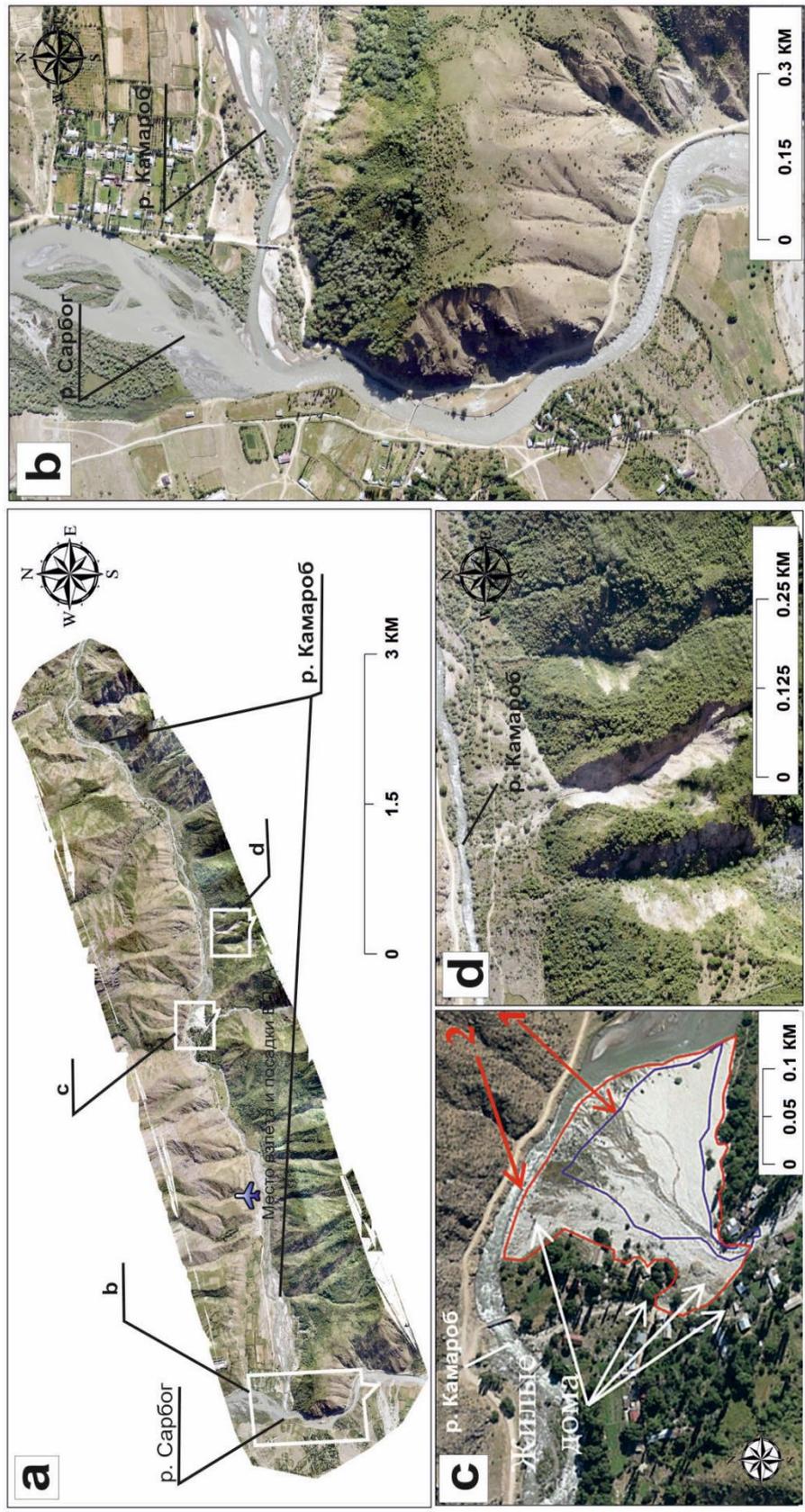
Earth с 22 июня 2007 г. (рисунок 4.15), выполненных в 2019 г., и результатов съёмок с использованием БПЛА выполненных 19 июля 2019 (рисунок 4.16), были выявлены четкое очертание зон отложений (аккумуляции) продуктов селевого потока, что позволили констатировать факт, подтверждающий о ранее образовавшихся селевых потоках, на исследуемой территории.



**Рисунок 4.15 – Исследуемая местность – ущелье Камароб по данным 2007 г. с сервиса Google Earth (a, b, c, d) . 1 – контуры селевых отложений в 2007 г., 2 – контуры селевых отложений в 2019 г.**

На основе полученных данных установлено, что (рисунок 4.16с), в одном и боковых притоков р. Камароб изменились ширина и положение русла, а также просматривается увеличение площади зоны прохождения селевого потока и его отложений. Установлено, что селевые потоки по данному руслу проходили в период между 2007 и 2019 гг. и свидетельствуют о его деятельности. На рисунке 4.16d также установлены, селея повлёкший к образованию оползня [33].

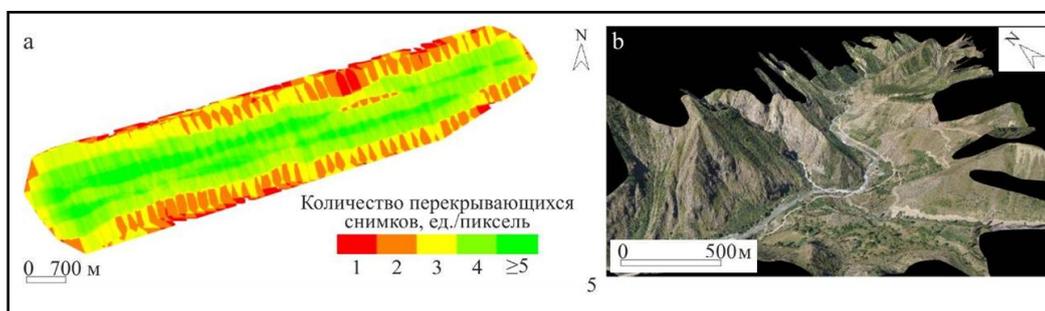
Одним из основных параметров для создания ортофотомозаики (скорректированный аэро - или космический снимок), и 3D – моделей, цифровых моделей высоты является количество перекрывающихся изображений, с рекомендуемым перекрытием это 75% на 60% и рассчитанных для каждой создаваемой ортофотомозаики. Увеличение количества перекрытий способствует получения более качественной модели.



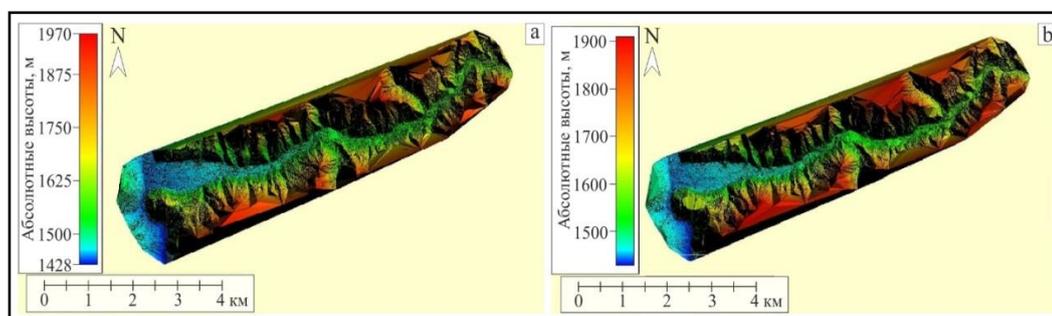
**Рисунок 4.16 – Исследуемая зона - ущелье Камароб по данным БПЛА 2019 г. (а, в, с, d).  
1 – контуры селевых отложений в 2007 г., 2 – контуры селевых отложений в 2019 г.**

В частности, такой подход использован нами при составлении модели исследуемого участка бассейна р. Камароб (рисунок 4.17а). При обработке схем перекрытий полученных данных установлено, что зона с зелёной окраской это высокое перекрытие ( $\geq 4$  ед./пиксель), а зона красной и жёлтой окраски – низкое перекрытие ( $\leq 3$  ед./пиксель). Результаты обработки данных аэрофотосъёмки, осуществлённые нами с использованием БПЛА QC-2 Micro, приведены ниже.

На рисунке 4.17б представлено 3D-модель исследуемого участка бассейна р. Камароб, а на рисунке 4.18 а, б - цифровые модели местности и рельефа [33].



**Рисунок 4.17 – Схема перекрытия снимков (а) и 3D-модель исследуемого участка бассейна р. Камароб (б)**

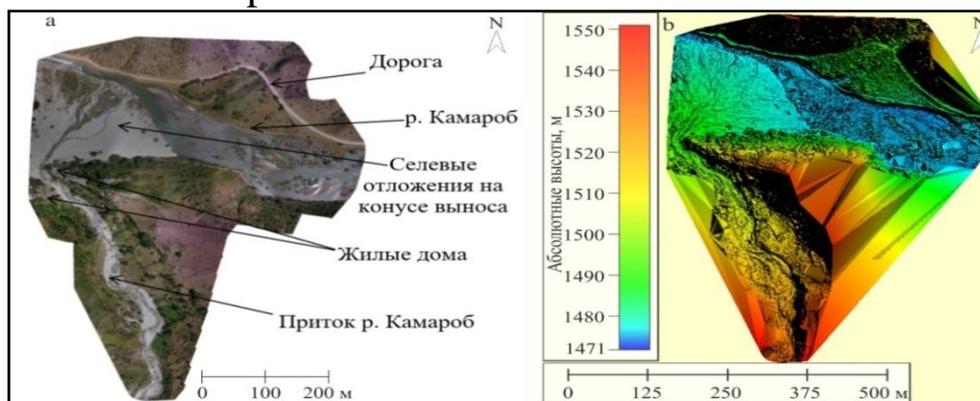


**Рисунок 4.18 – Цифровая модель поверхности (DSM) (а) и цифровая модель местности (DTM) (б) бассейна р. Камароб полученные по данным БПЛА**

Таким образом, при мониторинге ущелья Камароб были обнаружены несколько зон, где были зафиксированы селевые отложение и зоны где есть риск возникновение стихийных бедствий.

Подготовленные ЦММ (рисунки 4.19 и 4.20), получены на основе проведения видео- и аэрофотосъёмка мест схода селей из боковых притоков и участков аккумуляции селевых отложений в

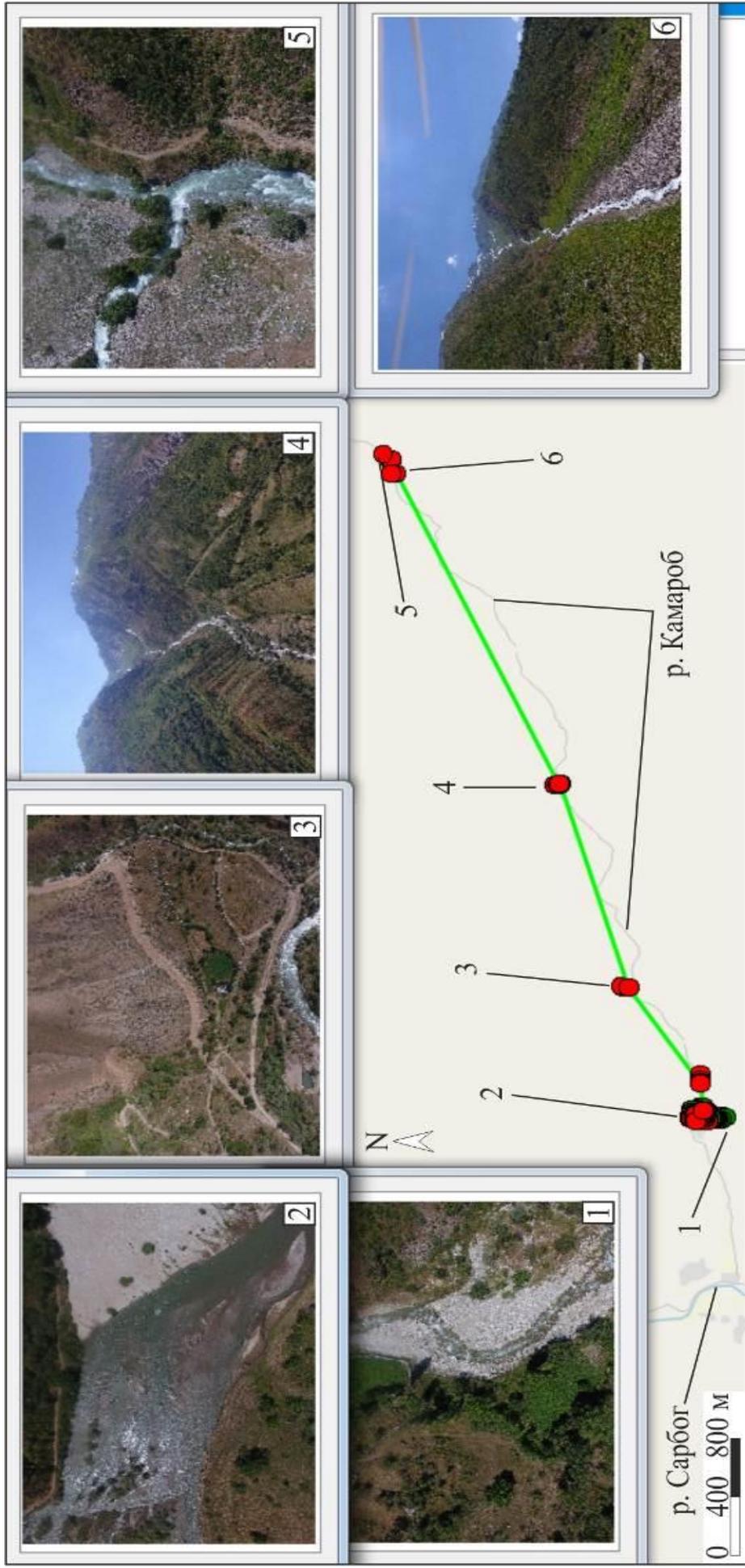
главной долине с использованием, автором, квадрокоптеров DJI Phantom 4 и DJI Inspire 1 Pro.



**Рисунок 4.19 – Ортофотомозаика (а) и ЦММ (b), полученные по результатам съемки с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4. Площадь съемки - 0,207 км<sup>2</sup>, пространственное разрешение – 5 см/пиксель. Съёмка М.С. Сафарова**

Таким образом применение БПЛА в условиях горных территорий при отсутствии собственных спутников для оперативного мониторинга из космоса позволило получить актуальные данные ДЗЗ (данные аэрофотосъемки) для нижней части бассейна р. Камароб на площади 19 км<sup>2</sup> с пространственным разрешением 15 см/пиксель, а на территории пос. Пингон, где были зафиксированы отложения после прохождения селевого потока, на площади 0,207 км<sup>2</sup> с разрешением 5 см/пиксель.

Впервые для ущелья Камароб были получены аэрофотоснимки с использованием БПЛА, а также набор актуальных данных (ЦМР, ортофотомозаики, карты растительности и т.д.) для последующей оценки селевой опасности территории; создана база данных; предложена технология постоянного мониторинга; определены наиболее целесообразные типы БПЛА для использования в горных условиях; разработаны, с учётом существующих технологий, рекомендации по применению БПЛА для горно-предгорных зон Таджикистана. Периодический мониторинг с БПЛА и полученные данные позволяют более детально обнаружить изменения, а также при возникновении селевых потоков подсчитать объем массы этих отложений.



**Рисунок 4.20 – Фрагменты аэрофотоснимков, места схода селей из боковых притоков р. Камароб и участков аккумуляции селевых отложений в главной долине, проведённые с квадрокоптеров DJI Phantom 4 и DJI Inspire 1 Pro. Съёмка М.С. Сафарова**

Метод исследований с применением БПЛА, был использован нами также при проведении мониторинга других объектов. В частности, мониторинг и оценка состояния селеопасных рек бассейна реки Сурхоб в Лахшском и Таджикабадском районах Раштской зоны, были реализованы совместно Научно-исследовательским центром экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе) и Государственным научным учреждением «Центр изучения ледников Национальной Академии наук Таджикистана» (рисунки 4.21, 4.22).

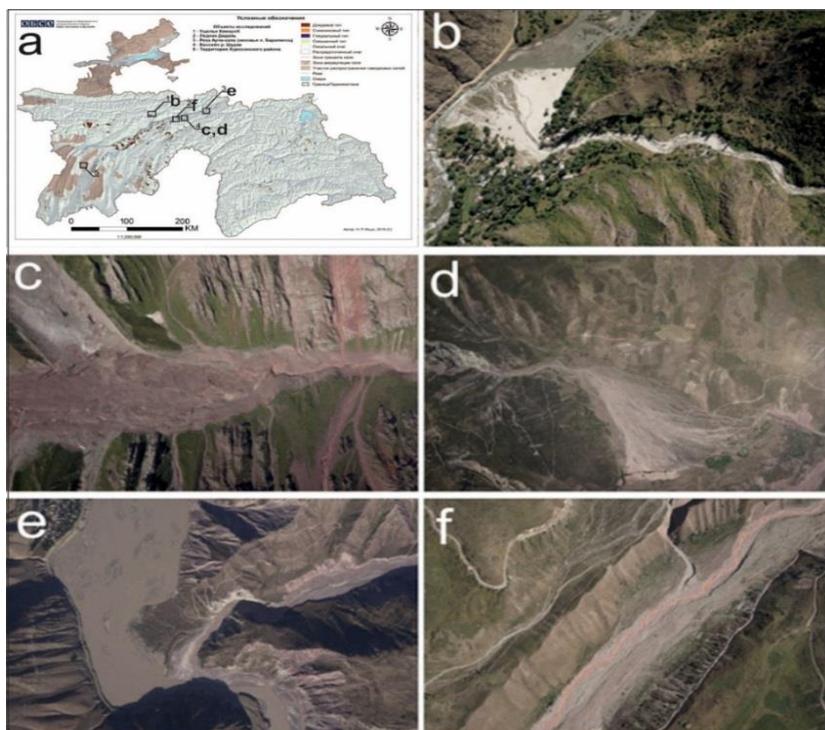


**Рисунок 4.21 – Полёт БПЛА самолётного типа QC-2 над районом исследований**

В процессе полевых исследований были осуществлена аэрофотосъёмка, с использованием места схода селей и аккумуляции селевых отложений в исследуемых участках бассейна реки Сурхоб с использованием БПЛА самолётного типа QC-2. В частности бассейна р. Арчакапа - приток р. Сурхоб (рисунок 4.22е) и ледника Баралмось (рисунок 4.22а). Общая площадь территории подвергнутые съёмкам, с качеством снимков 43 см, составила около 150 км<sup>2</sup>. На основе разработанной цифровой модели местности и анализа результатов осуществлённых съёмок (рисунок 4.22е и 4.20), установлены следы ранее проходивших селевых потоков, подтверждённые данными КЧС и ГО РТ, а также других архивными фото и видеоматериалами.

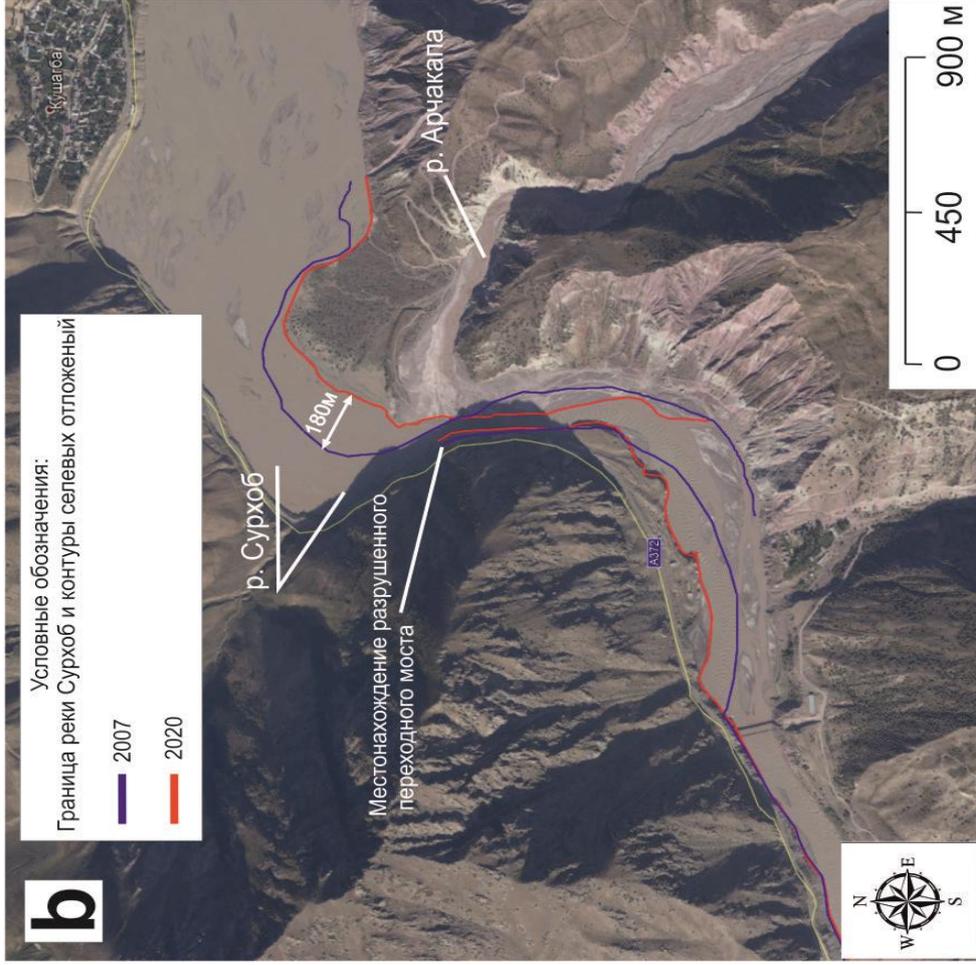
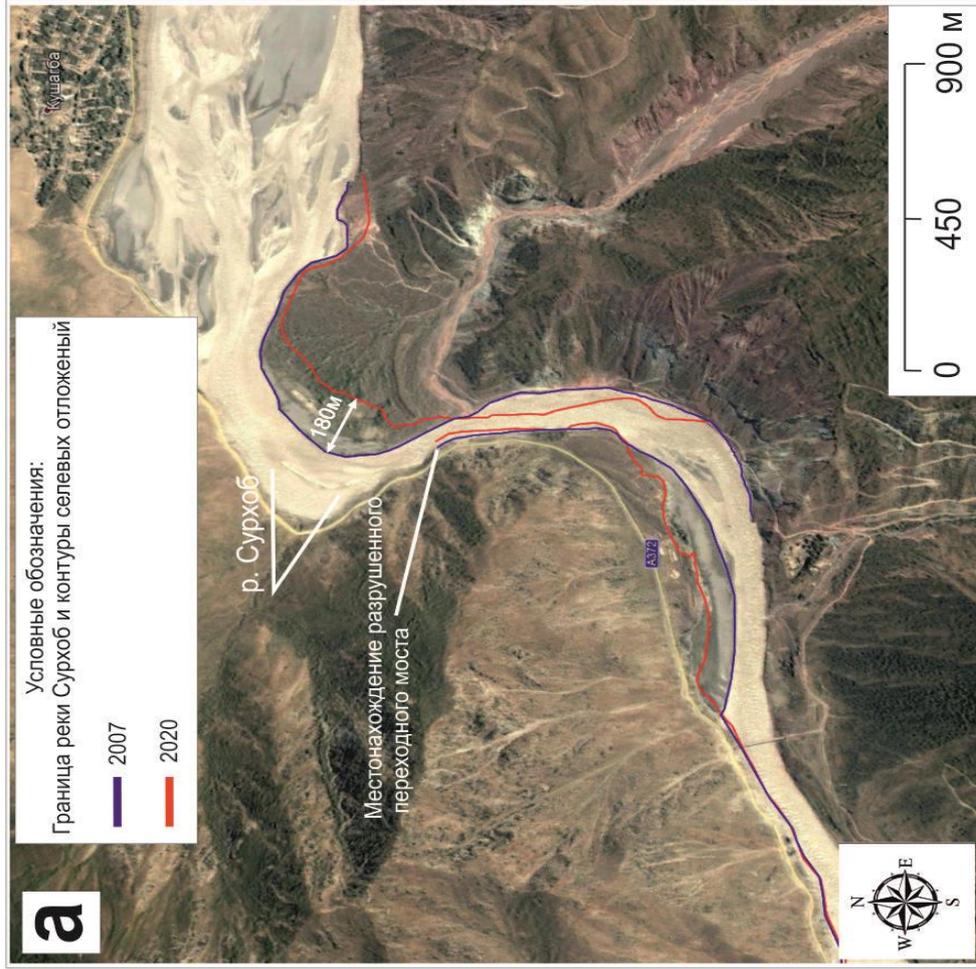
Обследования верховьев реки Шурак были проведены также с использованием БПЛА (QC-2 Micro), с общей площадью аэрофотосъёмки 50 км<sup>2</sup>, с качеством съёмок 30 см. На основе полученных данных нами была разработана цифровая модель местности (рисунок 4.22 - с, d) и результатов исследований установлено, что на исследуемой территории ранее были выявлены

прохождение селевых потоков [197, 229]. Вероятнее всего основными факторами селепроявлений были: таяние ледников, интенсивные дожди и выпадение града.



**Рисунок 4.22 – Результат аэрофотосъёмки места схода селей и аккумуляции селевых отложений в исследуемых участках бассейна реки Сурхоб с использованием БПЛА самолётного типа QC-2 до сшивки снимков: а - Бассейн реки Сурхоб на топографической карте мира (b, c, d, e, f - участки исследования), b - селевой конус выноса бокового притока р. Камароб, с - ледник в устье реки Шурак, d - селевой конус выноса разрушивший сельскохозяйственные земли в посёлке Марг (Марғ), e - селевой конус бокового притока р. Сурхоб (Сай Арча каппа) питающийся ледником Баралмось, f - р. Дара (Каудаль) питающийся ледником Дидаль где были ранее зафиксированы селевые потоки. Съёмка Сафарова М. С.**

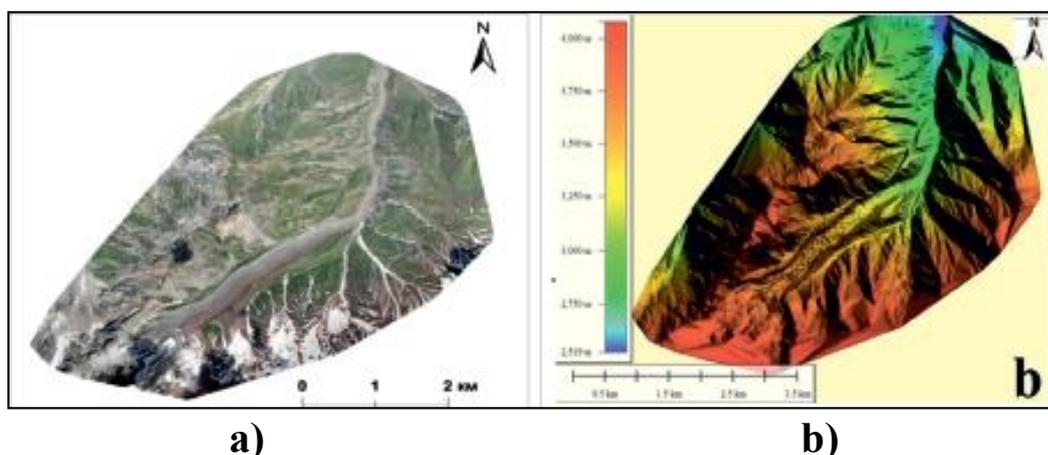
Сравнительный анализ существующих фондовых и архивных снимков местности (2007г.) и новых снимков, реализованных с применением БПЛА (2020г.), позволили выявить селеопасные зоны и русла ранее проходивших селевых потоков, что также подтверждается увеличением площади селевого конуса выноса бокового притока р. Сурхоб, изменением ширины и меандрированием основного русла (изменение положение русла реки в плане) (рисунок. 4.23).



**Рисунок 4.23 – Селевой конус выноса левого притока р. Сурхоб и её боковые границы на космоснимке с сервиса Google Earth 2007 г. (а) и на аэрофотоснимке полученного с использованием БПЛА 2020 г (б)**

С учётом того, что во время интенсивной абляции следует наблюдать за изменениями положения и границ языков ледников и снежников, положением фронтальных морен и развитием эрозионных врезов, а также необходимостью оценки воздействия выпавших осадков на усиление оползаний и оплываний земляных масс, изменений русел и притоков, связанный с прорывами, размывами и подмывами отдельных участков, была осуществлена аэрофотосъёмка ледника Дидаль и разработана цифровая модель местности. Как было отмечено выше (глава 2, раздел 2.3), Дидаль входит в число опасных пульсирующих ледников который ранее спровоцировала селевые потоки. Съёмки ледника с помощью БПЛА проводились нами в июле 2019 году.

В период с 2019 по 2022 гг. Научно-исследовательским центром экологии и кружающей среды Центральной Азии (Душанбе) и Государственным научным учреждением «Центр изучения ледников Национальной Академии наук Таджикистана» с целью мониторинга современного состояние ледника Дидаль были проведена аэрофотосъёмка ледника с помощью БПЛА (рисунок 4.24).



**Рисунок 4.24 - Карта (ортофотомозаика) ледника Дидаль (а) и цифровая модель местности (b) полученные после обработки аэрофотоснимков БПЛА (2019 г.)**

Данные полученные с помощью БПЛА позволяют не только оценить современное состояние поверхности ледника, но и благодаря полученным высококачественным цифровым картам выявить изменение на леднике и в близлежащих территориях. Так, например,

при сравнении аэрофотоснимков сделанном в 2019 и 2020 гг. на леднике Дидадь был зафиксирован обвал горной породы над аккумуляционной зоной ледника между 2019 и 2020 гг.[195].

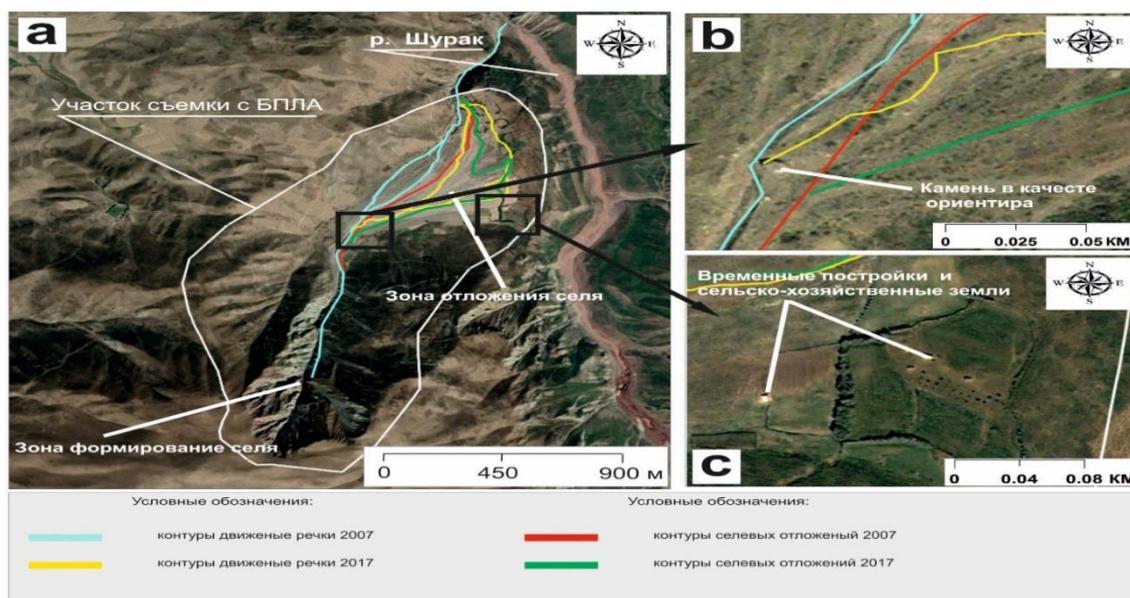
Впервые для данной территории были проведены аэрофотосъёмка с качеством снимков 28 см с высоты 5060 м над уровнем моря. Были получены снимки и данные местности на основе которых были созданы ортофотоплан и цифровые модели. В то же время следует отметить, что использование беспилотных летательных аппаратов позволяет расширить инновационные методы в научных исследованиях. В дальнейшем предполагается использовать полученные материалы для изучения состоянии ледников с использованием детальных ортофотопланов при морфологическом анализе территории, а трёхмерные модели могут быть использованы для получения информации о поперечных размерах отдельных форм рельефа и их комплексов.

Кроме того, были проведены мониторинговые исследования с использованием БПЛА участка Марг, бассейна р. Шурак (информация о данной территории более подробно приведены в главе 2, раздел 2.3).

Характерной особенностью данного исследуемого участка является, периодические селепроявления, с нанесением значительного ущерба народному хозяйству. Сравнительный анализ данных космосъёмок 2007 и 2017г (рисунок 4.25) (наиболее «свежие» доступные данные высокого разрешения на данный участок) и аэрофотосъёмки данного участка, выполненной с БПЛА в 2020 г., (рисунок 4.26) позволило выявить изменения территорий подверженные селевым потокам, исследовать ранние образовавшиеся селеопасные зоны и трассы селевых потоков.

Результаты анализа позволили установить, что: площадь селевого конуса выноса увеличилась, речка поменяла направление своего русла, были разрушены сельскохозяйственные земли и временные постройки фермеров.

Установленный факт подтвержден на основе опроса со старожилами данной местности. Карта селевого потока в участке Марг показано на рисунке 4.27.



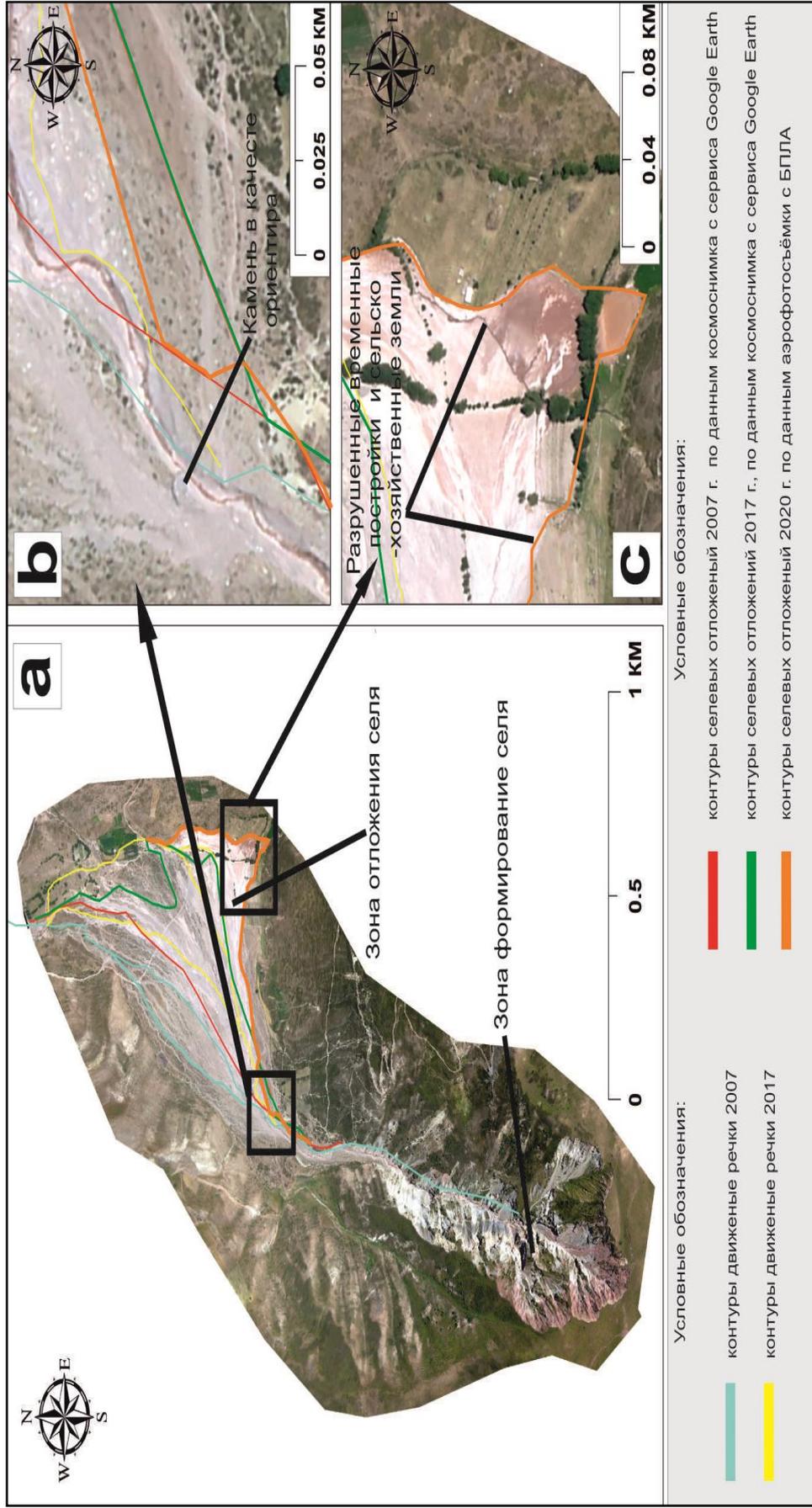
**Рисунок 4.25 – Участок исследований р. Марг на космоснимке с сервиса Google Earth, 2007 г.**

Другим важным параметром при исследовании селевых потоков является информация о состоянии вегетации. Данные ДЗЗ позволяют давать оценку также состоянию растительного покрова (осуществлять мониторинг изменений характера растительности, степени её деградации и т.д.) посредством расчёта вегетационных индексов, например, NDVI.

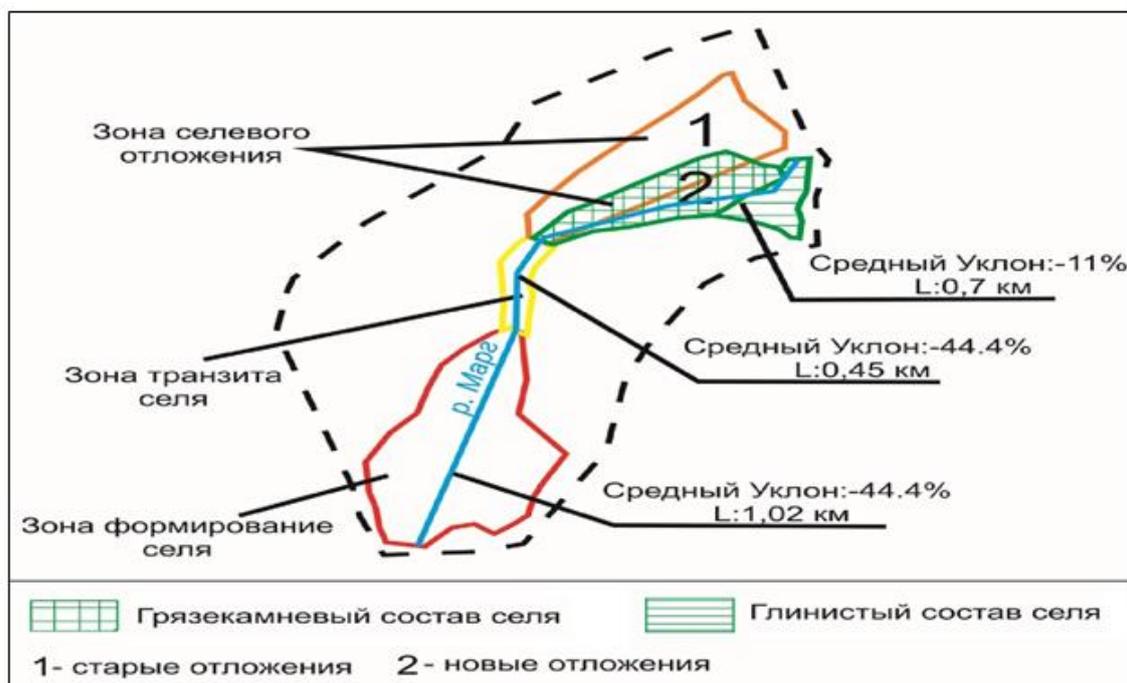
На ряду с вышеизложенным следует отметить, что одним из важных факторов при исследовании территорий подверженных отрицательному воздействию селевых потоков является информация о состоянии вегетации.

«NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) - нормализованный относительный индекс растительности - простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом), для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова» [230].

Наиболее распространенный и популярный метод оценки состояния растительного покрова, применяемый к данным полученными помощью со спутников и при помощи аэрофотосъёмки - это расчет так называемого индекса NDVI или индекса растений.



**Рисунок 4.26 – Участок исследований р. Марг. Съёмки (август 2020г), осуществлены с использованием БПЛА QC-2 Мисго после очередного селевого потока**



**Рисунок 4.27 – Пример карты селевого потока бассейна р. Марг (в верховья р. Шурак, Таджикабадский район)**

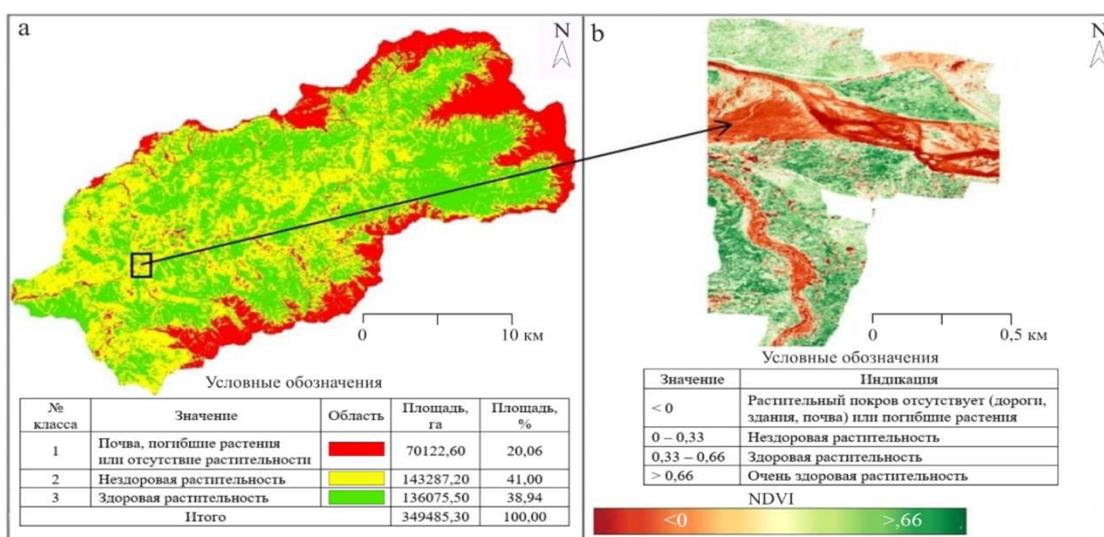
Эта формула основана на том факте, что высокая фотосинтетическая активность, которая обычно тесно связана с растениями, приводит к уменьшению отражательной способности объектов в красной области спектра и увеличению в зоне ближнего ИК-области. На основе аэросъемки можно провести картирование растительного покрова участков, выявить площадь территории покрытых и непокрытых растительностью, оценивать густоту, состояние растений и отслеживать развития процессов в них при проведения регулярного мониторинга [231].

Преимуществом осуществления мониторинга изменений характера растительности, степени её деградации и т.д. и получения данные ДЗЗ является возможность оценки по состоянию растительного покрова посредством расчёта вегетационных индексов. В свою очередь изучение состояния растительного покрова играет важную роль при селевых исследованиях, поскольку растительность оказывает прямое воздействие на режим и параметры стока, т.е. на условия селеформирования. Растительность иммобилизует большое

количество воды и увеличивает сопротивление сдвигу и сцепление почвы с массой [232-237].

Пространственные вариации плотности растений на исследуемой территории были извлечены из изображений NDVI, изображения, чувствительного к концентрации хлорофилла, присутствующего на поверхности [233].

Получение информации о растительности и расчёта вегетационного индекса NDVI реализована использованием данных не только космосъёмки со спутника Landsat-8 (рисунок 4.28, а), но также и с квадрокоптера DJI Phantom 4 (рисунок 4.28, б).



**Рисунок 4.28 – Карта NDVI бассейна р. Камароб от 18.07.2019. а - карта составленная по данным космических снимков Landsat-8 (а); б - карта состояния растительного покрова, построенная по данным съёмки с квадрокоптера DJI Phantom**

Расчёты параметров NDVI для Landsat 8 были осуществлены с использованием следующего уравнения:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (4.2)$$

где:

NIR - это энергия, отражённая в ближней инфракрасной части области спектра;

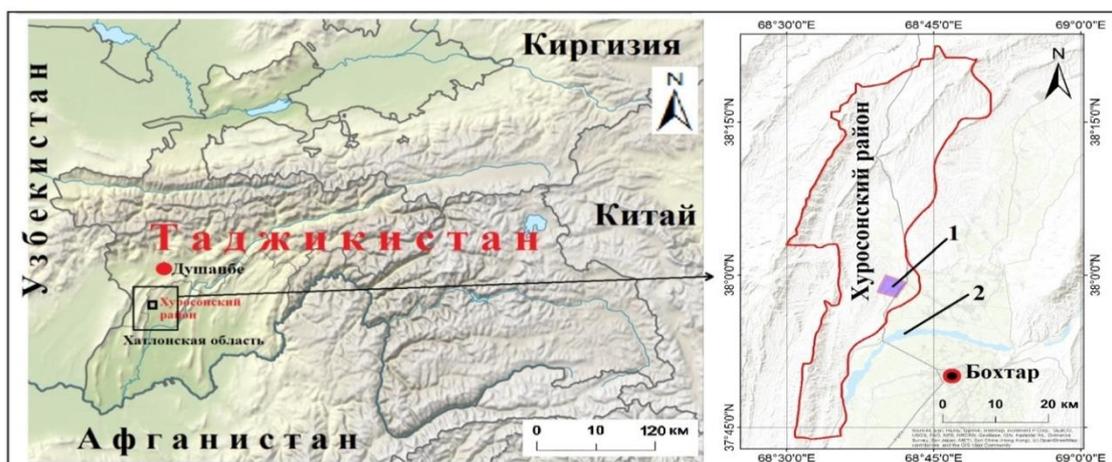
R - отражённая в красной части области спектра [233-234].

Полёты квадрокоптера, для съёмок, проводились в автоматическом режиме с использованием приложения

DroneDeploy, применяющаяся для проведения полётов небольших территорий по заранее заданным маршрутам.

Построение карты состояния растительного покрова, исследуемой территории реализована по методике, приведенной в [237].

Из-за проливных дождей, 14 - 16 мая 2020 г., на территории джамота С. Айни Хуросонского района, Хатлонской области, сформировался сильный селевой поток, нанёсший значительный ущерб хозяйству. С целью мониторинга и исследования района, 10 июля 2020 года нами были проведены аэрофото-видео съёмки (рисунок 4.29) местности с помощью БПЛА (QC-2 Micro UAV) и квадрокоптера Dji Ispire 1 (рисунок 4.30).



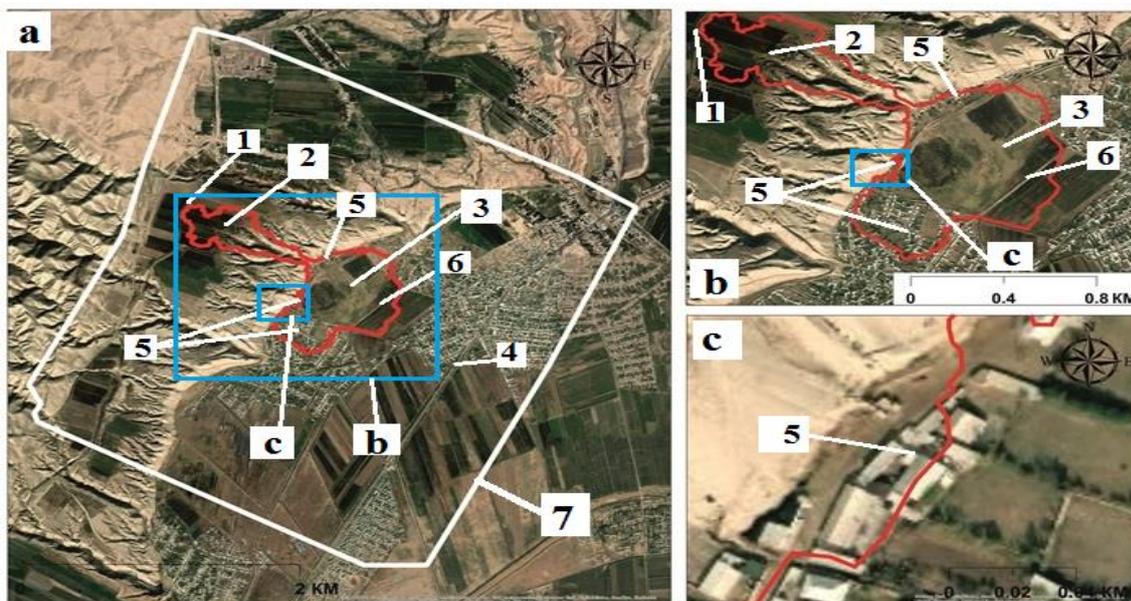
**Рисунок 4.29 – Район исследований на физико-географической и топографической карте. 1 - участок съёмки с БПЛА, 2 - р. Вахш**



**Рисунок 4.30 – Подготовка полётов БПЛА в условиях предгорья. Хуросонский район.**

На основе сравнительного анализа данных космоснимков с ресурса Google Earth с 30 ноября 2019 г. (наиболее новые

доступные данные сверхвысокого разрешения на данную территорию) (рисунок 4.31) и аэрофотоснимков полученных с использованием БПЛА 10 июля 2020 г. (рисунки 4.32 и 4.33), были выявлены: зона формирования и отложения селевого потока; разрушенные дома и дороги, а также и другие пострадавшие объекты. При этом, установлено, что площадь селевых отложений составляет около 0,5 км<sup>2</sup>.



**Рисунок 4.31 – Исследуемая местность (джамоат С. Айни, Хуросонский район) до схода селевого потока, с сервиса Google Earth (a,b,c) ресурс Google Earth. 1 - ирригационный канал (в начальной зоне селевого бассейна), 2 – зона формирования селя до схода селевого потока, 3 – зона селевого отложения до схода селевого потока, 4 – автомобильная дорога Душанбе - Бохтар А384, 5 – жилые дома, 6 – дорога между населёнными пунктами, 7 – участок проведения аэрофотосъемок с помощью БПЛА**

Была подготовлена цифровая модель рельефа Хуросонского района по данным SRTM. В виду того данные SRTM с разрешением 30 м снимков не позволяют детально оценить ситуацию данной территории, то нами была подготовлена цифровая модель местности, полученный с помощью БПЛА (БПЛА QC-2) позволяющая более детально изучить рельеф местности, её изменение после схода селевого потока и в дальнейшем осуществить возможное прогнозирование селепроявлений и разработать соответствующие противоселевые мероприятия (рисунки 4.34 и 4.35).

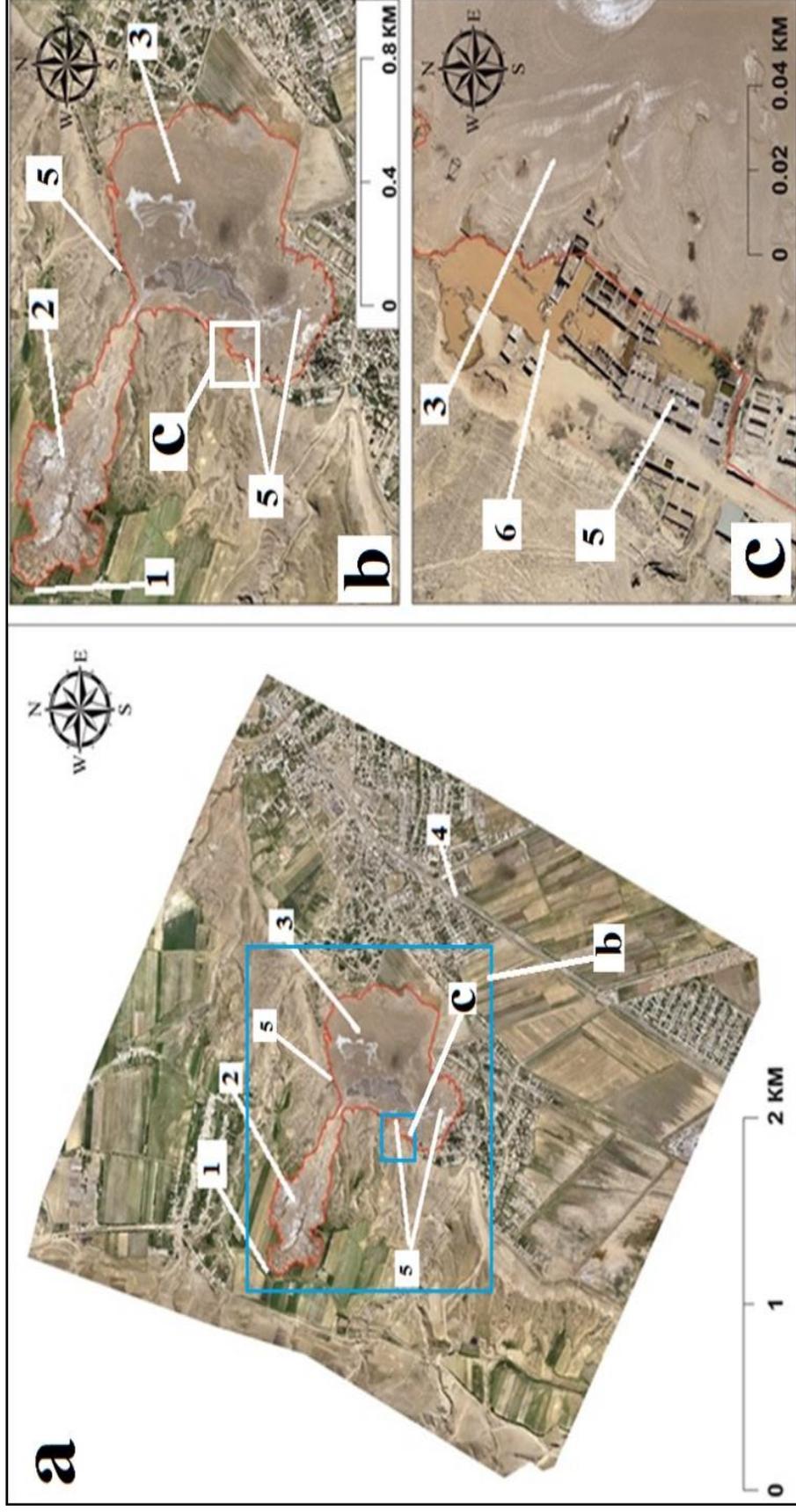
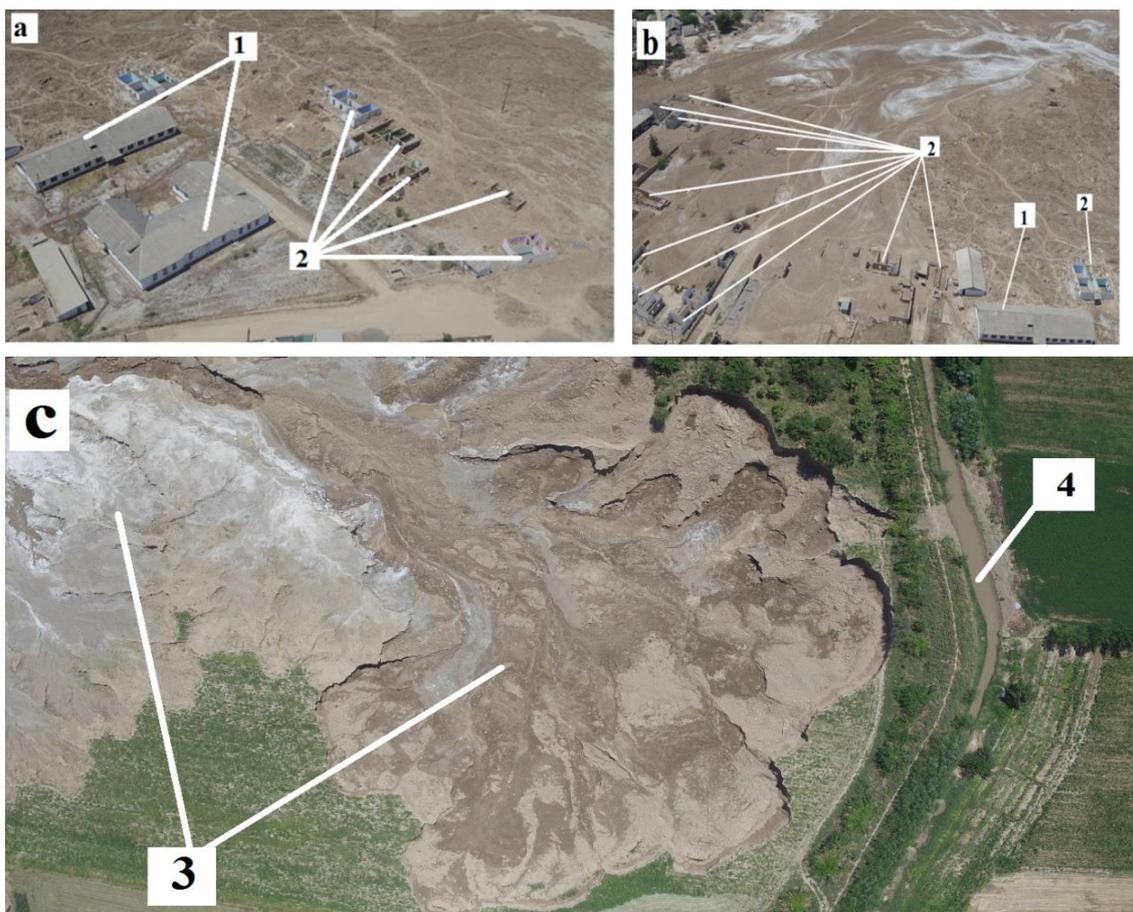


Рисунок 4.32 – Аэрофотосъёмка исследуемой местности после схода селевого потока, (a,b,c) с использованием БПЛА. 1 – ирригационный канал (в начальной зоне селевого бассейна), 2 – зона формирования селя, 3 – селевые отложения, 4 – автомобильная дорога Душанбе - Бохтар А384, 5 – жилые дома разрушенные селевым потоком, 6 – разрушенная дорога между населёнными пунктами. Пространственное разрешение – 5,62 см/пиксель, площадь 12 км<sup>2</sup>. Съёмка М.С. Сафарова и А. Бобджонова.



**Рисунок 4.33 – Фрагменты аэровидеосъёмки, произведённые с помощью квадро-коптера (а, б, с). 1 – школа, 2 – разрушенные жилые дома, 3 – зона формирования селя до схода селевого потока, 4 – ирригационный канал на (в начальной зоне селевого бассейна)**



**Рисунок 4.34 – Примеры карт селевого потока в Хуросонском районе**

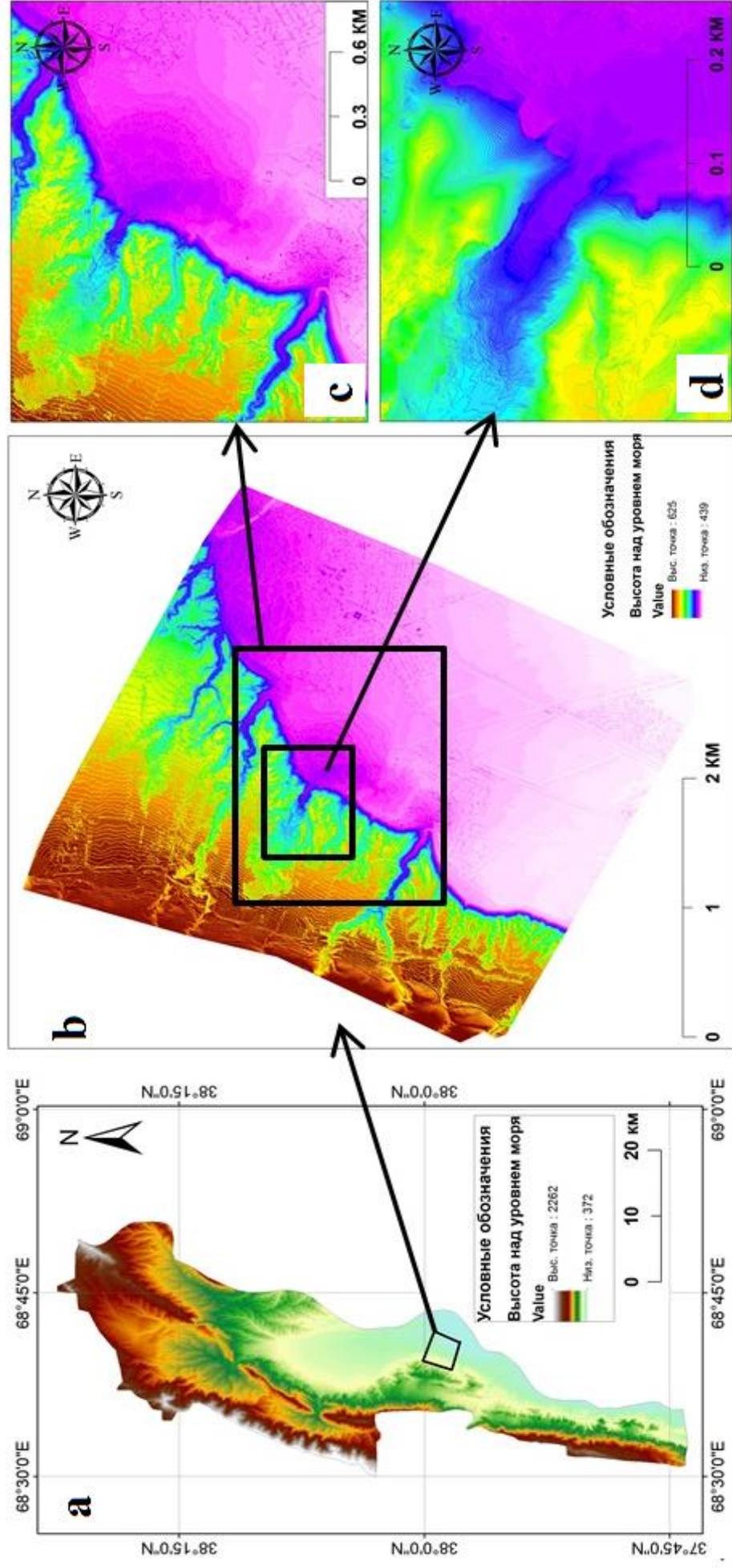


Рисунок 4.35 – ЦМР SRTM Хуронского района (а), и ЦММ исследуемого участка (b, c, d), полученные по результатам съёмки с помощью БПЛА

#### 4.2.4. Противоселевые мероприятия и сооружения

Одним из эффективных подходов к организации противоселевой защиты является применение террас и барражей. В мировой практике для уменьшения активности проявления селевых потоков часто на крутых склонах устраиваются ступенчатые террасы параллельно одна другой на расстоянии 15 - 20 м с валами и без них. Склон превращается как бы в пологую лестницу, благодаря чему замедляется скорость стекания воды и задерживаются камни. Для предотвращения размывов русла и приведения крутых уклонов в ступенчатый вид часто практикуются заграждения русел горных потоков подпорными стенами в виде порогов. Порог – это поперечная стена, расположенная по ширине русла горного потока, опущенная в грунт русла на всю высоту.

Повышение эффективности гашения давления потока и продления срока службы достигается разработкой сооружений, способные перемещаться на некоторые расстояния совместно с селевыми потоками, погашая, таким образом, их разрушительную силу. К которым отнесены гибкие противоселевые сооружения. В Швейцарии для селеопасных водотоков малой длины эффективными являются гибкие многоуровневые селезащитные барьеры. Гибкие селезащитные барьеры из кольцевых (кольчужных) сеток доказали свою надёжность в многочисленных экспериментах и реальных проектах по всему миру, задерживающий твердый селевой материал, не создавая при этом препятствия для воды и мелких частиц. Гибкие барьеры из кольцевой сетки устанавливаются в качестве сооружений для сортировки селевого потока, барьеров для защиты от селей как альтернатива бетонным дамбам и системы барражей для уменьшения уклона, и снижения эрозии дна селем и позволят существенно повысить безопасность. Особенность гибких конструкций заключается в сочетании податливости с повышенной прочностью материала в способности обладать определенной формой поверхности в напряженном состоянии, в

возможности существенно деформироваться под воздействием нагрузки [238].

Гибкие селезащитные сооружения в верховьях селевых бассейнов эффективны при объеме выноса селевой массы до 10 - 15 тыс. м<sup>3</sup>, с плотностью селевого потока 18 - 22 кН/м<sup>3</sup>, высотой потока до 2 м, скоростью селевого потока до 6 - 10 м/с. В августе 2008 г. в селевом бассейне р. Гуммер (Швейцария) было установлено тринадцать гибких селевых барьеров с общим объемом задержания селевой массы более 10 тыс. м<sup>3</sup>. Опыт их эксплуатации этих сооружений подтвердил высокую эффективность [239].

В селевых руслах бассейна р. Мзымта наиболее эффективны комплексы противоселевой защиты, включающие стабилизирующие сооружения в верховьях водотоков, а также селезадерживающие и селепропускные гидротехнические сооружения в их среднем и нижнем течениях.

Основываясь на исследованиях, авторы считают, что необходимо реализовать предложенный комплекс противоселевой защиты бассейна реки, позволяющий существенно снизить уровень селевой опасности. Рекомендации изложенные в [240-241] могут быть применены и в условиях РТ.

В настоящее время в РТ становится реальной возможность гораздо более интенсивного строительства комплексов гидроузлов (каскада) с малыми водохранилищами и запрудами в горных ущельях, предназначенных, в том числе, для гидроэнергетики и локального орошения горных земель. При такой компоновке появляется возможность использования осветленной воды, в основном из верхних слоев емкости, для систем орошения на склоновых землях, а также в зависимости от химизма наносов, транспортировать их на поля орошения и использовать в качестве мелиорантов. В целях повышения эффективности гашения селевого потока и продления срока службы противоселевых сооружений, для бассейнов горных рек, обладающих малой длиной и большими уклонами русел, актуальным является применение гибких противоселевых конструкций (рисунок 4.36), которые способны перемещаться на некоторые расстояния

совместно с селевым потоком, поглощая таким образом его разрушительную силу.



**Рисунок 4.36 – Облегченное гидротехническое противоселевое сооружение**

Особенность гибких конструкций заключается в сочетании податливости с повышенной прочностью материала, в способности обладать определенной формой поверхности в напряженном состоянии, в возможности существенно деформироваться под воздействием динамических нагрузок. Гибкие противоселевые сооружения отличаются относительной легкостью, компактностью, простотой монтажа и демонтажа, возможностью установки в верховьях селевых бассейнов с использованием простейших технических средств. Их можно эффективно применять в верховьях селевых бассейнов совместно с лесомелиоративными мероприятиями и в низовьях селевых бассейнов совместно с селепропускными сооружениями [242-243].

#### **4.2.5. Анализ и оценка полученных результатов натурных исследований**

Таким образом, применение современных технологий ДЗЗ, для исследования опасных гидрологических процессов, в

условиях изменения климата, особенно горно-предгорных территорий имеет исключительное значение.

Одной из основных причин невозможности одной из главных причин, при изучении местности, картографировании и возможного прогнозирования является отсутствие открытых данных переменных, используемых при комплексном исследовании, экологическом мониторинге окружающей среды; мониторинге растений, рек, дорог и т.д.

В отдельных странах, существует база данных переменных используемые при оценке риска стихийных бедствий, в том числе и связанные с водой, позволяющие специалистам и учёным в онлайн режиме исследовать окружающую среду и своевременно оповещать население о возможных проявлениях ЧС. В свою очередь доступность базы данных описывающие гидрологическое, геологические и другие параметры и состояние объектов позволять разработать различные модели этих процессов.

Автором, при анализе и реализации исследований были использованы как национальные данные, так и данные полученные других глобальных источников.

Результаты реализованных исследований, изложенные в настоящей работе, позволяют нам сделать вывод о том, что данные полученные с использованием БПЛА, в полной мере позволяют осуществлять мониторинг, произвести анализ и оценку, связанную с опасными гидрологическими процессами, определить причины селепроявления, осуществить возможное прогнозирование селя, разработать соответствующие рекомендации.

Нижеприведённые факторы, учёт которых позволить реализовать не только мониторинг территории, но также спланировать проведение исследований:

- угол наклона - с увеличением угла наклона увеличивается риск формирования селевых потоков;

- крутизна склона - препятствует развитию слоя почвы;

- экспозиция поверхности (аспект склона) - изменение температуры воздуха с высотой характеризуется вертикальными градиентами, которые в зависимости от сезона года, экспозиции и крутизны склонов меняются в значительных пределах,

- нормализованный разностный индекс растительности,

- индекс топографического положения - отражающий морфологию топографии [45].

- индекс силы потока: SPI измеряет эрозионную силу поверхностного стока: [172].

$$SPI = \ln (A * \tan (S)) \quad (4.3)$$

где:

A - местная площадь водосбора склона, проходящая через определенный пиксель в квадратных метрах;

S - местный градиент уклона в градусах [244 - 246].

В качестве важных управляющих переменных должны быть выбраны накопления потока, расстояние до дренажной линии, индекс выветривания почвы: литологические вариации, топографический индекс влажности и др. [201].

Применение переменных с использованием различных программных продуктов позволяют смоделировать различные гидрологические процессы.

В настоящее время используются программные продукты STREAM\_2D и FLO-2D основанные на численном решении системы уравнений Сен-Венана в приближении «мелкой воды». Для численного решения системы уравнений должны быть заданы граничные и начальные условия. В качестве граничных условий в программе STREAM\_2D задаются расходы воды на верхней и уровни воды на нижней границе расчетного участка как функции времени, в качестве начальных – уровни водной поверхности в пределах расчетного участка на начало расчета. В отличие от программы STREAM\_2D, в программе FLO-2D можно рассчитывать движение селевого потока, основанной на решении уравнений неньютоновских жидкостей. Другая программа RAMMS (Rapid Mass Movements - быстрые массовые движения) позволяет осуществлять моделирование снежных лавин, селевых потоков и камнепадов [247].

Возможности применения БПЛА, с учетом высотности, труднодоступности, уменьшения риска ущерба и обеспечения безопасности работы специалистов при проведении исследований и т.д. в условиях горно-предгорной зоны в целом и в Таджикистане в частности, гораздо шире.

Мониторинговые исследования зон с опасными гидрологическими процессами с использованием БПЛА осуществлялись в разных высотных условиях. При этом диапазоны аэрофотосъемок поверхностей высот (высота над уровнем моря), варьировались от 430 - 630 м (участок исследования в Хуросонском районе) до 1300 м. (зона впадения р. Камароб в р. Сорбог) и 5470 м. (пик Северцова [248]).

Относительно особенностей исследуемых зон, следует отметить, что, например, протяженность от гребня хребта, с ледниками, до поймы р. Сурхоб составляет 12 - 14 км, с разностью высот склона 2600 – 3200 м [194]. При этом нестабильность склона является фактором возникновения рисков стихийных бедствий на более низких и средних высотах.

На наш взгляд, недостаток открытых данных высокого разрешения современного состояния окружающей среды (климат, водные ресурсы, активность протекания экзогенных процессов), с которой сталкиваются исследователи при изучении горных территорий в Таджикистане, отрицательно влияет на результаты анализа и оценки ее состояния, а также на разработку своевременного прогноза развития опасных природных процессов, в том числе и селевых. Решение данной проблемы можно, на наш взгляд с необходимостью активного развития ДЗЗ и технологий БПЛА.

Реализация целей и задач исследований с использованием современных методов и технологий мониторинга (аэрофотосъемка труднодоступных участков, создание высокоточных цифровых моделей рельефа и т.д.) зон с рисками стихийных бедствий с применением БПЛА, а также способы её обработки позволили получить оперативные, актуальные данные о состоянии селеопасных районов.

Полученные данные стали основой не только для разработки рекомендаций по применению дистанционных методов мониторинга, в том числе и оправдавшего себя метод применения БПЛА, но также позволили разработать предложения для дальнейшего изучения и анализа селевой опасности с целью предотвращения, и минимизации рисков стихийных бедствий горных и предгорных зон Таджикистана, в условиях изменения климата

## **Глава 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ДЗЗ ДЛЯ УСЛОВИЙ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ТАДЖИКИСТАНА**

Особенностью ДЗЗ является получение информации на основе анализа и оценки путем данных, полученных без контакта с изучаемым объектом или явлением. Это существенный фактор, позволяющий осуществить комплексные исследования в горных условиях, с использованием современных достижений науки, техники, технологии и изучения земли.

К ним отнесены: космическая техника и технология, применяемые в спутниковых навигационных системах; современные персональные компьютеры; микроэлектроника и новые типы сенсоров, фиксирующие электромагнитное излучение с высокими геометрическими и радиометрическими параметрами; лазерная и оптико-электронной техника, беспилотные летательные аппараты и т.д.

ДЗЗ способствуют решению задач, в том числе и созданию геоинформационных технологий, алгоритмов и программ, предназначенных для дешифрирования снимков и другие. В настоящее время, технические и технологические возможности ДЗЗ позволяют полностью переориентироваться на геоинформационные технологии.

Вышеперечисленные особенности ДЗЗ позволяют вести исследования объектов, расположенных в труднодоступных районах горных территорий Таджикистана в том числе широким применением БПЛА.

*Ниже нами приведены рекомендации по применению БПЛА.*

### **5.1. Рекомендации по управлению беспилотником в различных условиях горно-предгорной зоны с опасными гидрологическими процессами**

Мониторинг, исследование и оценка реальной селевой опасности являются одним из основных задач в предотвращении и минимизации риска, а также возможного прогнозирования

опасных гидрологических явлений в условиях горно-предгорной зоны вообще и Таджикистана в частности.

Обеспечение безопасности жизни населения, инфраструктуры и других объектов являются основной задачей мониторинга, а также управление воздействиями на опасные гидрологические процессы, в том числе селевые посредством анализа и оценки условий образования селей, мониторинга с использованием методов дистанционного зондирования, возможного прогноза их развития, предупреждения, организации защиты и устранения последствий их проявления.

«Основной задачей управления воздействиями на опасные гидрологические процессы, в том числе селевые, является обеспечение безопасности жизни людей и народнохозяйственных объектов, за счёт анализа и оценки условий формирования селей, мониторинга с применением методов дистанционного зондирования, возможного прогноза их развития, предупреждения, организация защиты территории и ликвидации последствий их проявления» [120].

Нами в период 2018 – 2020 г.г. в полевых условиях в различных горно-предгорных районах Таджикистана, в особенности территорий с наиболее вероятным риском стихийных бедствий, с применением методов дистанционного зондирования, в том числе спутниковые данные и БПЛА были проведены исследовательские и мониторинговые работы: Сарезкого озера [249], ледника Дидадь, ледников верховья бассейна Шурак, ледника Баралмось, ущелья Камароб, Вахшского хребета, зоны отложения селевого потока в Хуросонском районе и др. (рисунок 5.1).

Следует отметить, что использование БПЛА в условиях горных территорий позволяют сократить время проведения исследований и получить необходимые данные ДЗЗ (аэрофотосъемки) при отсутствии собственных спутников, а также дороговизны спутниковых данных высокого качества для оперативного мониторинга селеопасных зон.



**Рисунок 5.1 – Объекты исследований. Мониторинг окружающей среды, водных ресурсов и стихийных бедствий реализованный автором с применением БПЛА.**

На основе анализа и оценки существующих рекомендаций по применению БПЛА для различных условий горно-предгорной зоны нами были разработаны методы организации и проведения аэрофотосъемок с БПЛА высокого разрешения, адаптированные к горным условиям Таджикистана, с применением набора актуальных данных и переменных (ЦМР, ортофотомозаики, карты растительности, карты склонов и др.) позволившие осуществить:

- анализ и последующую оценку селевой опасности в исследуемых территориях;
- создать базу данных; предложить технологию постоянного мониторинга;
- определить наиболее подходящие типы БПЛА для использования в горно-предгорных условиях.

Опыт применения БПЛА в условиях горно-предгорных территорий Таджикистана позволил сделать вывод о том, что наиболее целесообразным является использования БПЛА самолётного типа QC-2 Micro и квадрокоптеров с камерами высокого разрешения, характеризующиеся значительным временем работы и возможностью осуществления полетов на больших высотах.

Оперативный мониторинг местности с воздуха, применением БПЛА и квадрокоптера, способствует своевременному, оперативному получению информации для анализа, сравнения с предыдущими данными, выявления и комплексной оценки риска возникновения опасных природных явлений, позволяющие составить оперативные ситуационные карты, а также карты изменения местности для моделирования быстрых или длительно развивающихся опасных гидрологических процессов.

Следует отметить, что при возникновении ЧС, БПЛА можно использовать непосредственно в зоне бедствия, позволяющие обнаружить его источники, осуществить территориальный анализ опасной зоны, а также оценить ущерб и вести мониторинг восстановительных работ.

На основе полученных результатов и проведения научно-исследовательских работ с применением БПЛА различного типа рекомендуется алгоритм необходимых действий:

**- ежегодный мониторинг района исследований и прилегающих к нему селеопасных горных территорий.** Необходимо ежегодно проводить аэрофотосъемку с помощью БПЛА для мониторинга и картирования зон с опасными гидрологическими явлениями, в том числе и селепроявлений, создавая и пополняя при этом базу данных. Нами с учетом вышеизложенного тезиса, запланированы ежегодные мониторинговые исследования с применением БПЛА в бассейне реки Сурхоб, селеопасных территорий Хуросонского района, и других селеопасных территорий;

**- расширение перечня объектов мониторинга и пополнение базы данных новыми геопространственными данными,** включая мониторинг ледников, пастбищ, природных экосистем, оперативную оценку пострадавших от стихийных бедствий территорий и риска формирования возможных ЧС, а также гидрологическое и геологическое картирование и т.д.

**- получение оперативных снимков с разрешением от 5 до 50 см/пиксель, составление карты селевой опасности бассейнов рек.** Использование БПЛА позволили нам получить снимки по исследуемым объектам: от 5 см (квадрокоптер Dji Phantom 4) до 15

см (БПЛА QC-2 Micro UAV) в ущелье Камароб (Раштский район), 40 см (БПЛА QC-2 Micro UAV) в леднике Баралмось и её низовьях (Ляхшский район), 28 см (БПЛА QC-2 Micro UAV) в районе ледник Дидадь, от 10 см до 30 см (БПЛА QC-2 Micro UAV) в бассейне реки Шурак и 5,62 см (БПЛА QC-2 Micro UAV) в зоне сходе селевого потока в джамоате С. Айни, Хуросонский района;

*- дальнейшее накопление результатов мониторинга и анализа бедствий для разработки рекомендаций по управлению рисками стихийных бедствий, связанных с селями.* Полученные результаты по районам исследования способствуют проведению комплексного анализа состояния селевых бассейнов и установить характерные изменения, необходимые для фиксации. В частности, использование программы Global mapper позволяет, при получении двух цифровых моделей высоты, оценить примерный объем селевых отложений, а организация периодического мониторинга позволяет оценить масштаб ущерба точнее и быстрее.

На наш взгляд, вышеизложенное будет способствовать разработать рекомендации по возможному прогнозированию опасных гидрологических явлений, для конкретных зон, характерные частым возникновением ЧС.

## **5.2. Методика разработки карт высокого разрешения для горно-предгорных зон Таджикистана**

Для принятия эффективных мер по оценке и снижению риска стихийных бедствий, а также расчёта ущерба от них необходимо предоставление полученных результатов мониторинга в доступной форме с качественной визуализацией.

Следует учитывать, что ГИС-технологии позволили решать насущные задачи обновления и поддержания в актуальном состоянии практически всего масштабного ряда картографических данных [250].

Нами, в процессе исследований, были применены данные спутниковых систем, данные полученные в процессе полевых работ с применением БПЛА и других доступные натурные и онлайн данные. При этом, использованы следующие программные

средства: Drone Deploy, Dji Go, Dji Go 4, Mission Planner, Pix4D, Global mapper, Arcgis, Google Earth и другие.

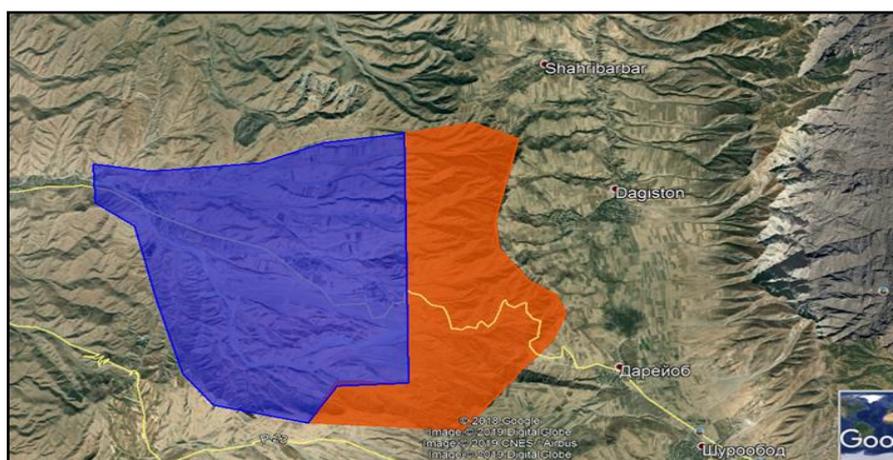
Область применения программных средств:

1. Программы Dji Go и Dji Go 4 применялись для аэрофото-видео съёмки небольших участков в полуавтоматическом режиме. В частности, она была использована при фото-видео съёмках территории ущелья Камароб и зон пострадавших в результате схода селевого потока в Хуросонском районе.

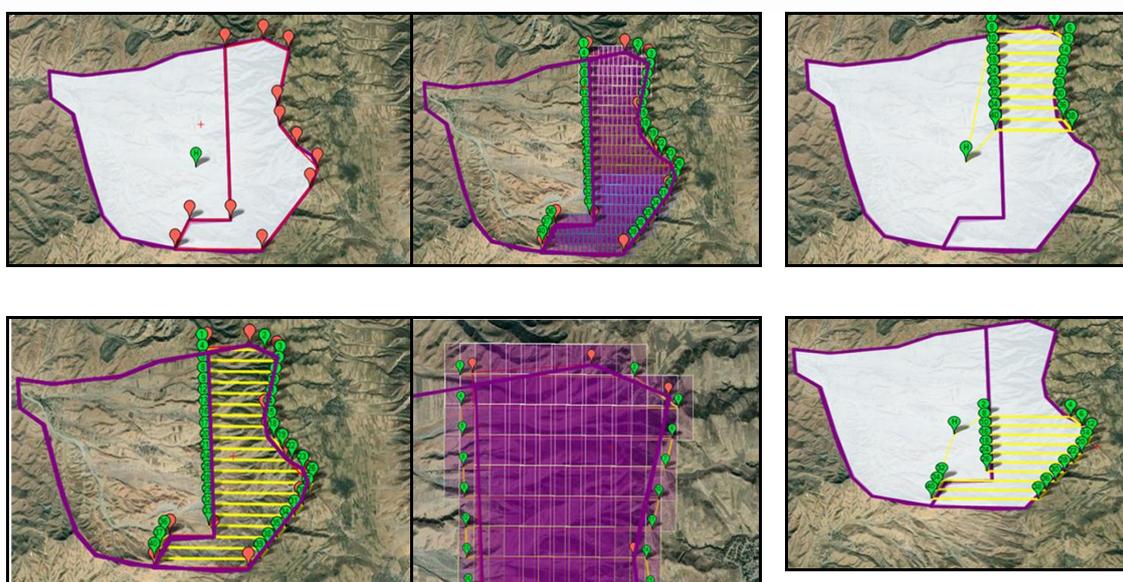
2. Программа Drone Deploy использована для осуществления аэрофотосъёмки небольших участков по заранее заданным маршрутам. Данная программа позволяет также обработать полученные данные полученные с помощи квадрокоптера. Программа Drone Deploy была успешно использована при аэрофотосъёмке и дальнейшем картировании зоны селевого отложения в с. Пингун (ущелье Камароб).

3. Программа Google Earth была применена для исследования местности перед проведением полётов, а также после них, для демонстрации готовой карты участка по результатам аэрофотосъёмки. Программа использована для дальнейшего анализа данных, полученных с помощью БПЛА, спутников, натуральных и онлайн сервисов, а также для их визуализации и оформления в виде карт и моделей. Данный сервис был использован нами для мониторинга всех запланированных для исследования объектов.

4. Программа Mission planner применялась для проведения полётов с применением БПЛА самолётного типа, для аэрофотосъёмки больших участков, по заранее заданному маршруту в автоматическом и полуавтоматическом режиме. Использование данной программы позволило осуществить успешное управление полётом БПЛА QC-2 Micro UAV и осуществить аэрофотосъёмку территорий исследований: ущелье Камароб (Раштский район), низовья ледника Баралмось (Ляхшский район), ледник Дидадь, отдельные зоны бассейна реки Шурак и последствия селевого потока, возникшего в Хуросонском районе. На рисунках 5.2 и 5.3 показан пример подготовки плана полёта с помощью БПЛА.



**Рисунок 5.2** План полёта БПЛА для аэрофотосъёмки в горно-предгорных районах. Бассейн р. Тебалай. Синий цвет - до 1500 м н.у.м., оранжевый - до 2100 м н.у.м.



a)

b)

c)

**Рисунок 5.3** - Пример подготовки плана полёта БПЛА для аэрофотосъёмки в горно-предгорных районах. а - выбор района проведения полетов с созданием маршрута полета, б - перекрытия снимков составляет 75% на 60%, с - маршрутный план полета БПЛА по контрольным точкам на 1 час (в горных условиях)

В виду того, что протяжённость маршрута составляет более 200 км, то полет всей территории производился в 4 захода и в зависимости от высоты полёты получены разные по качеству снимки, с учетом большого разнообразия орографии зоны

исследования. Естественно при низкой высоте полёта БПЛА качество съёмки будут выше, но при этом необходимо соблюдать безопасную высоту полёта и обеспечить необходимые перекрытия снимков для дальнейшего создания карт.

5. Программный продукт Pix4D использован для сшивки полученных снимков БПЛА с привязкой данных GPS. Получены результаты в виде, облака точек, ортофотомозаики, цифровые модели рельефа и трёхмерные модели.

6. Global mapper и Arcgis были применены для дальнейшего анализа данных, полученных с помощью БПЛА, спутников, натуральных и онлайн сервисов, а также для их визуализации и оформления в виде карт и моделей.

Следует отметить, что ArcMap (компонент Arcgis) позволяют удобно формировать слои пространственно привязанных объектов, осуществлять подбор условных знаков и цветовых палитр, отображать легенду карты и дополнительные материалы, а также экспортировать картографические изображения [251].

### **5.3. Экономическая эффективность применения методов и технологий ДЗЗ**

В настоящее время применение БПЛА активно практикуется в системе КЧС и ГО РТ, а также профильными институтами Национальной академии наук Таджикистана для мониторинга, исследований и в ликвидации последствий стихийных бедствий. Экономическая целесообразность применения БПЛА в горно-предгорных территориях подверженных воздействию опасных гидрологических явлений, обусловлена простотой их использования, необходимости устройства взлётно-посадочной полосы, возможностью взлёта и посадки в горно-предгорных районах без риска для людей, дешевизной в отличие от больших комплексов (самолёты, вертолёты) требующие большого количества технического персонала для обслуживания а расход топлива подобных комплексов, не сопоставим с расходами топлива для БПЛА.

Нами данные по затратам приняты по существующим кашлкующим действующие в Российской Федерации для мониторинга пожароопасной обстановки на вертолёт проводимые почти ежедневно в период с мая по сентябрь месяцы три часа в день [252].

Согласно Елисеев А.Н. [252] и др. летний час полёта вертолёт Ми-8 составляет 139 000 рублей.

Среднегодовой курс на 2020 г. составлял: 67,8055 рубля 10 таджикских сомони, то есть 1 рубль = 0,14748 сомони [253].

Тогда 139 000 рублей  $\approx$  20499 сомони.

Таким образом, при полёте около 3 часов его стоимость за один день составить:

Полет вертолёт Ми-8 =  $139\,000 \cdot 3 = 417\,000$  рублей ( $\approx 61499$  сомони)  $\approx 5765$  долларов США.

Среднегодовой курс доллара США за 2020 год был: 72,33 рублей за 1 доллар США [254].

В процессе мониторинга бассейна р. Арча капа (ледник Баралмось), были проведены 4 полёта, с затратами времени 1 ч. на каждый полет.

По существующим данным 1 лётный час БПЛА, в России составляет примерно 6000 рублей.

Тогда стоимость применения БПЛА за три полётных времени:

Полет БПЛА =  $6000 \cdot 3 = 18000$  рублей (2654.64 сомони)  $\approx 249$  долларов США.

Эффективность = Полет Ми-8 – Полет БПЛА =  $417\,000 - 18000 = 399000$  (58844.52 сомони или же 5516,38 долларов США).

Таким образом, эффективность применения БПЛА составляет примерно более 20 раз. Наряду с этим использование крупных летательных аппаратов не всегда позволяют произвести детализированную аэрофотосъёмку с целью мониторинга селёопасных и других территорий подверженных риску стихийных бедствий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждено, возрастание экстремальности природного и антропогенного характера, выявлено большой разброс распределения и изменения годовых сумм осадков, оценено существенное влияние изменения климата на интенсивность проявления опасных гидрометеорологических явлений в горно-предгорной зоне Таджикистана в условиях изменения климата.

Установлено, что территория Таджикистана наиболее подвержена опасным гидрологическим явлениям засухам (летний период) и оползням, селям, наводнениям вызванные проливными или долговременными дождями (весенний период), связанные в основном, (суммарно - до 73% ЧС) с метео-климатическими факторами.

С учетом высотной зональности селевой опасности в РТ установлено: большая часть селеопасных зон приходится на высокогорные территории; причинами возникновения селей в среднегорной зоне, являются ливневые дожди и насыщенность потока наносами; селевой поток в предгорной зоне характерен не большим включением песчаноглинистых частиц с примесью щебня и гальки, но с высокой (до 3-4 м/сек) скоростью потока.

Селевые потоки в предгорной и среднегорной зонах в основном затухают до выхода из гор, но наиболее мощные транспортируются в долинную часть. На основе результатов анализа и оценки, а также с учётом того, что около 85% территории РТ подвержены риску возникновения селей, а 32% территории находятся в зоне высокого риска их возникновения, определён основной ареал их распространения. По результатам изучения фондовых материалов, а также результатов собственных исследований обоснована, необходимость совершенствования методов и средств исследований территорий подверженных опасным гидрологическим явлениям с применением современных методов и средств ДЗЗ.

Одной из основных проблем, с которой сталкиваются исследователи при изучении горных территорий в РТ, является недостаток открытых данных высокого разрешения о

современном состоянии окружающей среды (климат, водные ресурсы, активность протекания экзогенных процессов и т.д.). Следовательно, использование технологий БПЛА, обеспечивают высокое качество при наличии эффективных программных средств для автоматической обработки материалов аэрофотосъемки, открывающие возможности для широкого их использования как при воздушном мониторинге состояния окружающей среды проведения съемки при чрезвычайных ситуациях.

Впервые в Таджикистане реализованы мониторинговые исследования территорий с опасными гидрологическими явлениями, с применением данных спутниковых снимков Landsat, Sentinel, радарных снимков SRTM, данных метеоспутников, космоснимков с ресурса Google Earth и данных полученные с помощью БПЛА, а также впервые проведены аэрофотосъемки с применением, БПЛА на высоте более 6000 м н.у.м. Для ущелья Камароб были получены аэрофотоснимки с использованием БПЛА, а также набор актуальных данных для последующей оценки селевой опасности территории; создана база данных; предложена технология постоянного мониторинга.

Исследования по визуализации и мониторингу заиления наносами чаши водохранилища Нурекской ГЭС, выполнялись с использованием изображения Landsat. Использование данных нормализованного разностного водного индекса (NDWI) подтвердило его эффективность для исследования заиления водохранилищ.

С учетом существующих технологий ДЗЗ, созданы собственные методы организации и проведения аэрофотосъемок с БПЛА высокого разрешения, с применением набора актуальных данных и переменных (ЦМР, ортофотомозаики, карты растительности, карты склонов и др.) позволяющие осуществить анализ и последующую оценку селевой опасности в исследуемых территориях: создать базу данных; разработать технологию постоянного мониторинга; определить наиболее подходящие типы БПЛА для использования в различных условиях горно-предгорной

зоны РТ при отсутствии собственных спутников для оперативного мониторинга из космоса.

Результаты исследований рекомендуются для соответствующих служб Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне при Правительстве РТ, Комитета по охране окружающей среды при Правительстве РТ, при чтении лекций и на практических занятиях, для студентов соответствующих специальностей, обучающихся в Таджикском национальном университете и других высших учебных заведениях, а также при подготовке и переподготовке специалистов работающих в организациях связанных с деятельностью по исследованиям рисков стихийных бедствий связанных с водой.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанная методика аэрофотосъемок с помощью БПЛА самолётного типа QC-2 Micro, квадрокоптеров Dji Phantom-4 и Dji Inspire 1 а также спутниковых данных по участкам исследования, использованные при: изучении современного состояния Сарезского озера; мониторинга селеопасных территорий и состояния ледников в Таджикабадском и Лахшском районах; комплексном исследовании селевой безопасности и экологического мониторинга ущелья Камароб; исследовании зоны схода селевого потока в Хуросонском районе рекомендуется использовать при проведении мониторинга горно-предгорных зон РТ.

2. Результаты исследований, позволяют рекомендовать БПЛА самолётного типа QC-2 Micro, оснащённого фотоаппаратом Sony RX1 и квадрокоптеры с камерами высокого разрешения и прошедшие эксплуатацию в сложных условиях горной территории РТ, для решения задач мониторинга и картографирования опасных гидрологических явлений и их последствий.

3. Разработанная методология организации полётов БПЛА, с использованием данных спутниковых снимков Landsat, Sentinel, радарных снимков SRTM, космоснимки с ресурса Google Earth

рекомендуется использовать для мониторинговых работ в горно-предгорных зонах.

4. Рекомендуется использовать информацию по осадкам полученная по данным геостационарных спутников (CPU TS, PERSIANN, NASA POWER, PERSIANN CDR), позволяющие минимизировать разность между данными полученными на основе дистанционного зондирования осадков и данными стационарных метеостанции для изучения рисков стихийных бедствий (селевые потоки) по районам исследования и при отсутствии стационарных метеостанций в горных, труднодоступных зонах.

5. Оценку состояния растительного покрова оказывающий прямое воздействие на режим и параметры селеформирования, а также играющий важную роль при селевых исследованиях, рекомендуются производить посредством расчета вегетационных индексов NDVI, с использованием данных съёмки со спутника Landsat-8 и с квадрокоптера DJI Phantom 4.

6. На основе полученных результатов с применением БПЛА рекомендуется: осуществлять ежегодный мониторинг района исследований и прилегающих к нему селеопасных горных территорий; расширить перечень объектов мониторинга и пополнение базы данных новыми геопространственными информациями; организовать оперативные снимки с дальнейшим накоплением результатов мониторинга по возможному прогнозированию и управлению рисками стихийных бедствий, связанных с селями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2013. -592с.
2. Воробьева А.А. Дистанционное зондирование земли-Санкт-Петербург 2012 г.
3. Хабаров Д.А., Адиев Т.С., Попова О.О., Чугунов В.А., Кожевников В.А., 2019. Анализ современных технологий дистанционного зондирования Земли. Московский экономический журнал, № 1, с. 181–190, <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-11068>
4. Коберниченко, В.Г. Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли: [учеб. пособие] / В. Г. Коберниченко ; М-во образо-вания и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екате-рин-бург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 220 с.
5. Особенности аэрокосмического зондирования. Московский Государственный Университет Леса. Ресурс: <https://studfile.net>
6. Сутырина Е. Н. Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие / Е. Н. Сутырина. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с. ISBN 978-5-9624-0801-9
7. Види\_датчиків.pdf (nmu.org.ua) [URL:https://it.nmu.org.ua/](https://it.nmu.org.ua/)
8. Кирпичников А.П. Метод обнаружения наземных объектов на основе цифровой карты местности при дистанционном зондировании земли / А.П.Кирпичников, Д.И.Мифтахутдинов, И.С.Ризаев., Э.Г.Тахавова //Вестник технологического университета. 2017 , Том 20, №17, С. 77-80
9. Кашкин В.Б. Цифровая обработка изображений (дистанционное зондирование Земли из космоса) : метод. указания для студентов / сост.В. Б. Кашкин // Красноярск : КГТУ, 1998, 24 с.
10. Сафаров Н.И. Цифровая обработка аэрокосмических снимков местности земной поверхности / Н.И. Сафаров, Т.С. Сибгатуллин, А.И. Гиниятуллин // Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития: Сборник статей по материалам II междуна-родной научно-практической конференции, Уфа, 07 апреля 2020 года. -Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2020. – С. 42-48. – EDN CZZGOD.
11. Дистанционное зондирование Земли при эколого-геологических исследованиях Режим доступа: <http://www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/4Graduate/RemoteSensing/Lecture04.pdf>
12. Официальный сайт Модиса. URL <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

13. Tabone, Ilaria. (2015). Comparison of meteorological observations and WRF model retrieved Cloud Top Height for the JEM-EUSO experiment.

14. Кантемиров, Ю. И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций PS и SBAS / Ю. И. Кантемиров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 62-66. – EDN UIYCCN.

15. M. Richards: "A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing". IEEE Aerospace and Electronic, Vol. 22, No. 9, September 2007.

16. Мусихин, В. В. Создание цифровой модели местности с помощью данных радарной радиолокационной съемки / В. В. Мусихин, Ю. С. Курков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12. – № 9. – С. 116-124. – EDN SIKBZR.

17. Лекции по дистанционным методам геологических исследований - А.В. Тевелев <https://geo.web.ru/~tevelev/remsen.htm>

18. Панасюк М.В., Сафиоллин Ф.Н., Логинов Н.А, Пудовик Е.М. Картография, фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли : учебное пособие / - Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2018. - 121 с.

19. <https://southafricatoday.net/environment/radar-returns-to-remote-sensing-through-free-near-real-time-global-imagery/>

20. Доросинский Л.Г. Оптимальная обработка радиолокационных изображений, формируемых в РСА: монография. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – 212 с.

21. Гришко М.Ю. Методика дешифрирования тепловых космических снимков для картографирования природных и антропогенных территорий: дис. Кандидат наук:25.00.33 – Картография. Москва. 2015. 199 с.

22. Использование космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для географических исследований (Источник: <http://www.geogr.msu.ru>).

23. <https://www.radioscanner.ru/forum/topic43241-42.html>

24. Губин В.Н. Дистанционные методы в геологии: Учеб. пособие для студентов спец. I 51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».-Мн.: БГУ, 2003.

25. Ципилева Т.А. Геоинформационные системы: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2004. – 162 с.

26. . Ulrik Mårtensson. Introduction to Remote Sensing and Geographical Information Systems. Department of Physical Geography and Ecosystems Sciences Lund University. (Source: <https://www.nateko.lu.se> ).

27. Ананьев Ю.С. Геоинформационные системы. Учеб. пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. - 70 с.

28. Кащенко Н. А. Геоинформационные системы [Текст]: учебн. пос. для вузов / Н.А. Кащенко, Е.В. Попов, А.В. Чечин; Нижегород. гос. архитектур.- строит. ун-т – Н.Новгород: ННГАСУ, 2012. – 130 с. ISBN 978-5-87941-863-7

29. Гусева А.В. Геоинформационные системы // ГИАБ. 2013. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geoinformatsionnye-sistemy> (дата обращения: 06.01.2023).

30. Васьков и.м., К вопросу о методологии и методах изучения гляциальных селей и их генезиса / Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита / Материалы IV Международной конференции, Россия, г. Иркутск – 2016 г.

31. Фазылов А.Р. Влияние изменения климата на гидроэкологическую безопасность / А.Р. Фазылов // Материалы Центрально-Азиатской международной научно-практической конференции «25 лет водному сотрудничеству государств Центральной Азии: опыт пройденного, задачи будущего». -Ташкент, 23-24 ноября 2017. -С. 212-219. Режим доступа: [http://www.icwc-aral.uz/25years/pdf/25\\_icwc\\_conference\\_abstracts.pdf](http://www.icwc-aral.uz/25years/pdf/25_icwc_conference_abstracts.pdf).

32. Пятый национальный доклад по сохранению биоразнообразия Республики Таджикистан / Правительство Республики Таджикистан. Душанбе – 2014. Режим доступа: URL: <https://www.cbd.int/doc/world/tj/tj-nr-05-ru.pdf>.

33. Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Применение современных технологий дистанционного зондирования для мониторинга селеопасных районов горных территорий // ГеоРиск. –Том XIV, -2020. - №2. -С. 32-41, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-32-41>

34. Тенденции технологического развития методов дистанционного зондирования Земли, 2005. Пространственные данные, № 1, URL: <http://www.gisa.ru/21948.html> (дата обращения: 12.05.2020).

35. Кодиров А. А. Инженерно - геодезические и геологические особенности строительства автодорог в условиях высокогорья таджикистана (на примере реконструкции и строительства автодороги Шамсиддин Шохин – Калаи Хумб – хорог). дис. на соискание ученой степени канд.геолого-минерологических наук, Душанбе 2020г.

36. Кодиров А.А., Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Совершенствование технологии изысканий автодорог в горных районах с использованием данных дистанционного зондирования// Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2018. №3(158). С. 49-57

37. Журавлев В.Н., Журавлев П.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в отраслях экономики: состояние и перспективы. Научный вестник МГТУ ГА. 2016;(226):156-164

38. Думин Д. И., Динь Ч. З., Фам В. Д., Киричек Р. В. Применение установленных на БПЛА систем обнаружения GSM-устройств для поиска пострадавших в результате ЧС // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 2. .с. 62–69.

39. Атутова Ж.В. Опыт применения дистанционных данных при изучении восстановительной динамики геосистем / Материалы Всероссийской научно-практической конференции Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Иркутск, 22–23 мая 2018 г. с.. 3-7

40. Атутова Ж.В., Макаров С.А. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов при исследовании ландшафтов в районах распространения опасных экзогенных процессов. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Иркутск, 22–23 мая 2018 г. с. 7-10

41. Ерофеев А.А., Ябаркин А.Ю., Еремеев В.Ф. Первые результаты аэрофотосъемки горно-ледникового бассейна Актру с использованием БПЛА / Материалы Всероссийской научно-практической конференции Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Иркутск, 22–23 мая 2018 г. с. 68-70

42. Глобальные и национальные приоритеты снижения риска бедствий и катастроф / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. 396 с.

43. Хабарова И.А., Хабаров Д.А., Яворская И.Д., Иванов И.Н. / Обзор современных достижений в фотограмметрии и аэрофотосъемке

/ Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. - 2019. - № 4-2. - с. 15-33

44. Лабутина И.А., Балдина Е.А.. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие / Лабутина И.А., Балдина Е.А.; Всемирный фонд дикой природы (WWF России). Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона» – М., 2011. – 88 с.

45. Забиров Р.Д. Оледенение Памира. - М.: Географгиз, 1955.

46. Файрузшоева О. С. История геологических исследований ГБАО в системе академических и производственных учреждений России и Таджикистана (1872-1991 гг.)// Дис. на соискание степени канд. наук. Душанбе-2019, 167 с.

47. Папырин Л.П. Сарезская катастрофа: геофизический прогноз Центр ГЕОН им. В.В. Федынского, Москва, Россия. [Электронный ресурс]: URL: <http://sarez.ferghana.ru>.

48. Зинченко О.Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. Москва, Россия, 2011. [https://racurs.ru/upload/iblock/092/UAV\\_1.pdf](https://racurs.ru/upload/iblock/092/UAV_1.pdf)

49. Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Риски стихийных бедствий, связанные с водой и дистанционные методы их мониторинга // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. -2018. -№4(173), -С. 160–166.

50. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние – Уфа: ФОТОН, 2014.– 217с.

51. Кремчеев Э.А. Состояние метрологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов / Э.А.Кремчеев, А.С.Данилов, Ю.Д.Смирнов // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 96-105. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.96

52. Lemmens M., 2011. UAV. GIM International, v.25, n.2, p.11

53. R. AL-Tahir, M. Arthur, and D. Davis., Low Cost Aerial Mapping Alternatives for Natural Disasters in the Caribbean, (Trinidad and Tobago 2011).

54. Смирнов А., [Электронный ресурс] // Как выбрать беспилотник для картографических задач. URL:<https://russiandrone.ru/publications/kak-vybrat-bespilotnik-dlya-kartograficheskikh-zadach/>

55. Eisenbeiß H., UAV Photogrammetry. PhD Thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zurich, 2009.

56. Отчёт Научно-исследовательского центра экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе) за 2020 г.

57. Сафаров М.С., Фазылов А.Р., Фазылов В.А. Мониторинг и исследования водных объектов и опасных гидрологических явлений горных территорий с применением беспилотных летательных аппаратов // Вестник Международного университета Кыргызстана. - Бишкек: УНПК Международный университет Кыргызстана, -2021.- №2(43). -С.349-355.

58. Официальный сайт Pix4d. Режим доступа: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/sections/360003718992-Manual>

59. Международное десятилетие действий «Вода для устойчивого развития», 2018–2028 годы. (дата обращения: 11.06.2020). Режим доступа: <https://www.un.org/ru/events/waterdecade>.

60. Изменение климата и как следствие интенсивное таяние ледников представляет реальную угрозу для региона Центральной. Режим доступа: <https://tj.sputniknews.ru/asia/20190404/1028606032/Tajikistan-30-let-izchezlo-10-protsentov-lednikov.html>. (Дата обращения: 04.06.2019 г.)

61. Официальный сайт филиала Исполнительного Комитета Международного Фонда Спасения Арала в Республики Таджикистан. Режим доступа: <http://www.tfec-ifas.tj/index.php/ru/o-tadzhikistane>. Дата обращения: 04.11.2019 г.

62. Диагностический доклад по водным ресурсам Центральной Азии. 2001. <http://www.cawater-info.net/library/rus/water-rus.pdf>.

63. Национальный план действий Республики Таджикистан по смягчению последствий изменения климата – Душанбе: Таджикглавгидромет, 2003. -264с.

64. Ледники – водные ресурсы Таджикистана в условиях изменения климата / Государственное Учреждение по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистана, 2010. 19 с.

65. Водные ресурсы Таджикистана: формирование и использование, Холназар М. Режим доступа: [https://ca-c.org/journal/13-1998/st\\_11\\_muhabbatov.shtml](https://ca-c.org/journal/13-1998/st_11_muhabbatov.shtml).

66. Изменение климата и как следствие интенсивное таяние ледников представляет реальную угрозу для региона Центральной Азии. Режим доступа: <https://tj.sputniknews.ru/>

67. Официальный сайт Агентства по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Таджикистан Режим доступа: <http://www.meteo.tj/about/tajikiston/>

68. База знаний [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.cawater-info.net/bk/map\\_07.htm](http://www.cawater-info.net/bk/map_07.htm)

69. Кобулиев З. В. Мониторинг состояния ледников Таджикистана с учётом изменения климата. URL:[https://www.unecce.org/fileadmin/DAM/hlm/projects/UNDA-9th\\_tranche/Documents/Tajikistan/2017\\_May/03\\_Kobuliyev.pdf](https://www.unecce.org/fileadmin/DAM/hlm/projects/UNDA-9th_tranche/Documents/Tajikistan/2017_May/03_Kobuliyev.pdf).

70. Второе Национальное Сообщение Республики Таджикистан по Рамочной Конвенции ООН об Изменении Климата / Правительство Республики Таджикистан, Государственное Учреждение по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан / 2008. – 93с.

71. Справочник по климату СССР, Выпуск 31, Таджикская СССР,- Ч. 4 Влажность воздуха, осадки и снежный покров, Ленинград, Гидрометиздат, 1969, 213 с.

72. Управление водными ресурсами в сельскохозяйственном секторе Таджикистана. Роль Ассоциаций водопользователей в совершенствовании водно-энергетической взаимосвязи - технический отчёт. Душанбе, Таджикистан. URL: <https://www.osce.org/files/f/documents/2/8/413231.pdf>.

73. Aalto, J., Kämäräinen, M., Shodmonov, M., Rajabov, N., & Venalainen, A. (2017). Features of Tajikistan's past and future climate. *International Journal of Climatology*, 37(14), 4949-4961. <https://doi.org/10.1002/joc.5135>

74. Третье Национальное Сообщение Республики Таджикистан по Рамочной Конвенции ООН об Изменении Климата / Правительство Республики Таджикистан, Государственное Учреждение по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан / 2014. – 167 с.

75. Основные черты геологического строения и металлогении Таджикистана, Официальный сайт Главного управления геологии при Правительстве Республики Таджикистан URL:<http://www.gst.tj/geologiya.html>

76. Баратов Р.Б., Буданов В.И. Геологические очерки Памиро-Алая. Душанбе: Дониш, 2005.- 235 с.

77. Геология СССР, т. XXIV, Таджикская ССР, часть I – Геологическое описание

78. Деникаев Ш.Ш. Тектоника Памира. Душанбе. Изд. «Джамил», 2004.- 95 с.

79. Ш.Ш. Деникаев: О древнем завале в районе Сарезского озера Доклады Академии наук Таджикской ССР. 1970. Том XIII, №3

80. Ёров З. Ё, Вольнов Б.А. Полезные ископаемые и перспективы развития горнорудной промышленности Памира. Душанбе-Хорог, 2006.- 154 с.

81. Рудные поля Карамазара. Том II. Душанбе: Ирфон, 1972.- 387 с., том III, Душанбе: Ирфон, 1975.- 449 с.

82. Yogibekov Dzhovid, Sang Miao, Xiao Wenjiao, Windley Brian, Mamadjanov Yunus, Yang He, Huang Peng, Aminov Jovid, Vatanbekov Furqat. Late Paleozoic to Late Triassic northward accretion and incorporation of seamounts along the northern South Pamir: Insights from the anatomy of the Pshart accretionary complex// Geological Journal, 2020, p.1-21. DOI: 10.1002/gj.3906.

83. Nazarov Parviz, Zhongshan Shen, Mamadjanov Yunus, Sajid Zulqarnaina Loess deposits in southern Tajikistan (Central Asia): Magnetic properties and paleoclimate// Quaternary Geochronology, Available online 19 August 2020, doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101114

84. Jamshed Aminov, Ivan Koulikov, Andrey Jakovlev, Junmeng Zhao, Sami El Khrepy, Jovid Aminov, Nassir Al Arifi, Javhar Aminov, Yunus Mamadjanov. Directions of lithosphere interactions in the Pamir-Hindu Kush junction inferred from anisotropic tomography // Canadian Journal of Earth Sciences, 2020, 57(5): 601-616, doi.org/10.1139/cjes-2019-0081.

85. Расчленение стратифицированных и интрузивных образований Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1976.-268 с.

86. Шадчинев А.С., Бахтдавлатов Р.Д. Геологическое строение и полезные ископаемые фанерозоя Кухистана (Центральный Таджикистан). Душанбе, 2008.- 405 с.

87. Геология и минеральные комплексы Западного Карамазара. Том I. Москва: Недра, 1972.- 440 с.

88. М.:Госгеолтехиздат, 1959.- 736 с., часть II – Полезные ископаемые. М.:Госгеолтехиздат, 1966.- 600 с.

89. Виноградов П.Д., Довжиков А.Е., Зубцов Е.И. Огнев В.Н. Тянь-Шаньская складчатая область. В кн.: геологическое строение СССР. Том 3. Тектоника. Госгеолтехиздат, М., 1958.- с. 94-105.

90. Кухтиков М. М. тектоническая зональность и важнейшие закономерности строения и развития Гиссаро-Алая в палеозое. Душанбе: Дониш, 1968.-298с.

91. Р.Б. Баратов, Г.И. Бослер, Я. А., Беккер и др. Земная кора и верхняя мантия Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1981.-284 с.

92. Бархатов Б.П. Тектоника Памира. Изд. ЛГУ, 1963.-242 с.

93. Буданов В.И. Основные черты истории развития магматизма Памира. В кн.: Материалы по геологии Памира, вып.2. Душанбе, 1964, с.174-194.

94. Афиногенова Л.Н. Основные черты эндогенной металлогении Южного Памира. Душанбе: Дониш, 1979.- 130 с.

95. Атлас Таджикской ССР, Душанбе - Москва 1968

96. Гидрогеология СССР Том ХLI Таджикская ССР, Москва 1972, с. 69

97. Концепция по рациональному использованию и охране водных ресурсов в Республике Таджикистан / Утверждена Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 1 декабря 2001, г. Душанбе. -19 с.

98. А. С. Ахмедов, Р. Баратов, Фазылов А. Р. Управление подземными водами в РТ. [unesc.org/fileadmin/DAM/env/water/cwc/ground-water/управ.подземными\\_водами\\_в\\_Республике\\_Таджикистан\\_Ахмедов\\_и\\_Баратов.pdf](https://unesc.org/fileadmin/DAM/env/water/cwc/ground-water/управ.подземными_водами_в_Республике_Таджикистан_Ахмедов_и_Баратов.pdf)

99. Водные ресурсы. Официальный сайт Министерства энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. Режим доступа: [https://www.mewr.tj/?page\\_id=390](https://www.mewr.tj/?page_id=390)

100. Расход воды и водопользования [Электронный ресурс] Source: water flow and water use date. Режим доступа: [www.catawater-info.net](http://www.catawater-info.net). Дата обращения: 08.06.2020 г.

101. Поверхностные воды/ База данных по использованию земельных и водных ресурсов бассейна Аральского моря. URL: [http://cawater-info.net/bk/water\\_land\\_resources\\_use/docs/water\\_res.html](http://cawater-info.net/bk/water_land_resources_use/docs/water_res.html)

102. Реки [Электронный ресурс] URL: <https://www.tajik-gateway.org/wp/geography/reki-tadzhikistana/>

103. Реки Таджикистана. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fcomunicom.ru%2Fgeografiya%2F412-reki-tadzhikistana>.

104. Водный кодекс Республики Таджикистан, Национальный центр законодательства при Президенте Республики Таджикистан  
Режим доступа: [http://ncz.tj/system/files/Legislation/1688\\_ru.pdf](http://ncz.tj/system/files/Legislation/1688_ru.pdf).

105. Реки и озера Таджикистана. Министерство охраны природы Республики Таджикистан. Главное управление по гидрометеорологии и Наблюдениям за природной средой. Душанбе. 2003. -23с. Режим доступа: [http://meteo.tj/files/doc/rivers\\_and\\_lakes.pdf](http://meteo.tj/files/doc/rivers_and_lakes.pdf).

106. Таджикистан. CAWater-info. Портал знаний о водных ресурсах и экологии Центральной Азии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cawater-info.net/bd/tajikistan.htm>.

107. Саидов И. И. Управление водными ресурсами для ирригации в зоне формирования стока (на примере Республики Таджикистан): дис. док. тех. наук: 25.00.27, 06.01.02, Бишкек – Душанбе 2014 г. — 451 с.

108. Байдуллоева Джамила - Начальник Гидрометеорологического центра Государственное учреждение по гидрометеорологии Республики Таджикистан // Глобальная информационно-диагностическая система для оценки риска возникновения быстроразвивающихся паводков 5-7 мая Анкара, Турция

109. Первое Национальное Сообщение Республики Таджикистан по Рамочной Конвенции ООН об Изменении Климата. Министерство охраны природы. Главное Управление по гидрометеорологии и наблюдениям за природной средой/Душанбе – 2002. – 136 с.

110. Средний расход воды отдельных рек Таджикистана по десятилетиям. Zoë Environment Network. Режим доступа: <https://www.flickr.com/photos/zoi-environment/16345841112/>. Дата обращения: 09.08.2019 г.

111. Aizen, V., Aizen, E., Surazakov, A., Kuzmichenok, V., Khalsa, S., Nikitin, S. (2009). Climate and Snow/Glacier Water Resources Changes in Central Asia in the last 50 years based on remote sensed and in-situ data. NASA poster. Режим доступа: [http://lcluc.umd.edu/sites/default/files/lcluc\\_documents/aizen\\_lcluc\\_apr2009\\_poster\\_0.pdf](http://lcluc.umd.edu/sites/default/files/lcluc_documents/aizen_lcluc_apr2009_poster_0.pdf).

112. Обзоры по адаптации в горных районах: адаптация к изменению климата в горных районах Центральной Азии. [https://www.weadapt.org/sites/weadapt.org/files/2017/june/centralasia\\_rus.pdf](https://www.weadapt.org/sites/weadapt.org/files/2017/june/centralasia_rus.pdf).

113. Cruz, R.V., H. Harasawa, M. Lal, S. Wu, Y. Anokhin, B. Punsalma, Y. Honda, M. Jafari, C. Li and N. Huu Ninh (2007). Asia. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 469-506. Режим доступа: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4\\_wg2\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf).

114. ГАООСЛХ (2008/2009). 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. Бишкек, 2008. Доступно по адресу: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/kyrnc2r.pdf> /

115. Фазылов А.Р. Значение водохранилищ при комплексном регулировании и управлении водными ресурсами в условиях напряженного водохозяйственного баланса Центрально-Азиатского региона.- Вода для мелиорации, водоснабжения отраслей экономики и природной среды в условиях изменения климата. Часть 2: Сб. научн. трудов Сети водохозяйственных организаций Восточной Европы, Кавказа, Центральной Азии, вып. 12. - Ташкент: НИЦ МКВК, 2018. - 96 с., С. 45-61. Режим доступа: [http://www.cawater-info.net/library/rus/еесса\\_papers\\_collection\\_vol\\_12\\_2018.pdf](http://www.cawater-info.net/library/rus/еесса_papers_collection_vol_12_2018.pdf)

116. Национальный доклад о состоянии окружающей среды Республики Таджикистан. - Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан. Режим доступа: <http://www.gksintranet.tj/ecostat>.

117. Загинаев В.В. Мониторинг высокогорных озер Северного склона Кыргызского хребта с целью определения прорывоопасного периода [Текст] / В.В. Загинаев, С.А. Ерохин, Н. Кубанычбукулу, Д.Т. Чонтоев // «Наука, новые технологии и инновации».- Бишкек: №4 2019, С. 139-142. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39842300>

118. Экономика изменения климата в Центральной и Западной Азии (RDTA-8119 REG). Промежуточный отчет. Азиатский банк развития. Техническое содействие исследования и развития (RDTA). - март 2016. -С.52-53.

119. Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Опасные гидрологические явления в условиях изменения климата в Таджикистане // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. -2019. -№3. -С. 86–93.

120. Классификация стихийных бедствий. Справка. Режим доступа: [https://aif.ru/dontknows/file/klassifikaciya\\_stihiynyh\\_bedstviy\\_spravka](https://aif.ru/dontknows/file/klassifikaciya_stihiynyh_bedstviy_spravka).

121. Национальная стратегия Республики Таджикистан по управлению риском бедствий на 2010-2015 гг. (утв. Постановлением Правительства Республики Таджикистан 30 марта 2010 г. № 164).

122. Додхоева М. Ф. Некоторые аспекты здоровья населения Таджикистана в условиях потепления климата / М. Ф. Додхоева, М. К. Рафиев, Д. А. Каюмова, Х. Ш. Сабурова // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – Т. 57. – № 7. – С. 606-611. – EDN TLRTJT.

123. Mustafafo. S Safarov. Significant Influence of Carbonates on Determining Organic Carbon and Black Carbon: A Case Study in Tajikistan, Central Asia / Pengfei Chen, Shichang Kang, Sabur F. Abdullaev, Mustafafo S. Safarov. Jie Huang, Zhaofu Hu, Lekhendra Tripathee, and Chaoliu Li // Environmental Science & Technology Article ASAP// DOI:10.1021/acs.est.0c05876.

124. Финаев А.Ф. Потенциал загрязнения атмосферы Таджикистана по сочетанию метеорологических факторов // Известия АН Республики Таджикистан Отделение наук о Земле, №1, 1994 г. -С. 69-78

125. Улучшение гидрометеорологического обеспечения в Республике Таджикистан Всемирный банк, 2009.

126. Ашуров Н., Мамадалиев Б.Н., Яблоков А.А. (1999). Грозный природный феномен в Таджикистане. “Мир путешествий”, Душанбе, 1999. – С. 66 - 81.

127. Опасные природные явления в Таджикистане Душанбе, Таджикистан -2018. URL: <https://www.osce.org/files/f/documents/f/c/408011.pdf>.

128. Николь Пфефферле, Марко Цолли, Роберт Биркандт. Профиль изменения климата: Таджикистан. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Душанбе, 2020 г –С. 20

129. Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А. Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края. Гидротехника. - 2013. №4. с. 16-20.

130. Волосухин В.А, Чижов А.Е., Новиков С.Г. Наводнения: проблемы снижения ущербов. Обоснование защиты // Гидротехника. – 2011. – № 2. – С. 46-50. – EDN НТСНГV.

131. Волосухин В.А. Влияние наводнений на качество поверхностных вод // Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2019": Материалы XII Международной научно-практической конференции, Москва, 22–23 октября 2019 года. – Москва: ООО "Лик", 2019. – С. 13-19. – EDN ТТGРJС.

132. Волосухин, В. А. Организация гидрологического мониторинга с целью информационного обеспечения региональной системы предупреждения чрезвычайных ситуаций и защиты

населенных пунктов (на примере Краснодарского края) / В. А. Волосухин, Ю. Ю. Ткаченко // Наука и безопасность. – 2014. – № 2(11). – С. 65-67. – EDN THQWFF.

133. Управление подготовки, обучения населения и учёта невоенизированных формирований гражданской обороны Главного штаба Чрезвычайные ситуации природного характера, возможные на территории Республики Таджикистан и их последствия. Издание первое, КЧС И ГО при Правительстве РТ, Душанбе – 2007, 42 с.

134. Перов В. Ф. Селеведение. — Москва: Географический факультет МГУ, 2012. — 272 с. — ISBN 978-5-89575-208-1.

135. ЧС природного характера. Официальный сайт МЧС России/ Главное управление по Магаданской области. Режим доступа: <https://49.mchs.gov.ru/eayatnost/poleznaya-informaciya/rekomendacii-naseleniyu/chs-prirodnogo-haraktera/sel>.

136. Флейшман, С.М. Сели / С.М. Флейшман -Л.: Гидрометеиздат, 1970, - 352 с.

137. Фазылов А.Р., Фазылов В.А., Гидротехнические мероприятия и регулирование селей в условиях изменения климата // Вестник Донского государственного аграрного университета, 2017, 2(24.1), ч. 1. с.105-112. [http://www.dongau.ru/nauka-i-innovatsii/vestnik-universiteta/2017\\_24.1\\_2017.pdf](http://www.dongau.ru/nauka-i-innovatsii/vestnik-universiteta/2017_24.1_2017.pdf).

138. А. Р. Медеу, В. П. Благовещенский, Т. А. Баймолдаев, Т. Л. Киренская, Б. С. Степанов / Селевые явления юго-восточного Казахстана: Основы мониторинга в Иле Алатау. – Алматы: Институт географии, 2018. т. 2., ч. 2. – 288 с.

139. Сафаров М.С., Фазылов А.Р., Гулаёзов М.Ш., Наврузшоев Х.Д. Опасные природные процессы экзогенного характера бассейна реки Зеравшан (Пенджикент, Таджикистан) // Endless Light in Science. – 2022. – № 5-5. – С. 218-227. – DOI 10.24412/2709-1201-2022-218-227. – EDN UJLLWR.

140. Садриддинов Н.Т., Шодиев Б.С, Шодиев И.М., Шодиев М.С Обеспечение экологической устойчивости и развитие общества // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия гуманитарных и экономических наук. 2016. №1-2(37). С. 101-107.

141. Флейшман С. М. Селевые потоки. -М.: Географгиз, 1951. - 96 с.

142. Флейшман, С.М. Сели / С.М. Флейшман 2-е изд. - Л.: Гидрометеиздат. 1978. - 312 с.

143. Б.Д. Зайков / Селевые потоки и их распространение на территории СССР – Гидрометеиздат, Ленинград - 1957, - 152 с.

144. Медеу А.Р. / Оценка и картографирование селевой опасности в бассейнах рек Киши и Улкен Алматы (9-13) // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) 3 (60), 2019

145. Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Касаткин Н.Е., Капица В.П., Касенов М.К., Раймбекова Ж.Т. Гляциальные сели в Заилийском Алатау за последние 120 лет. Лёд и Снег. 2020;60 (2):213-224. <https://doi.org/10.31857/S2076673420020035>

146. А. Р. Медеу / Селевые явления юго-восточного Казахстана: Основы управления. – Алматы, 2011. Т. 1. – 284с.,

147. Краткий курс лекций по предмету «Основы безопасности жизнедеятельности»: Учебное пособие для студентов колледжей. // Составители: Кислицина З.В., Коленникова О.В. – Омск: ФГОУ СПО «ОмКПТ», 2008. - с.156.

148. Шарабаев В.А., Ашуров С. Обуздание селевых потоков. - Душанбе: Ирфон, 1972. 67 с.

149. Якутилов М.Р Сели и борьба с ними в Таджикистане. - Душанбе: Ирфон, 1966. - 48 с.

150. Яблоков А.А., Сели Таджикистана Душанбе 2009 г. стр. 7.

151. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Анаев М. А., Соловьев В. В., Шагин С. И. Многоцелевой авиационный комплекс мониторинга, предупреждения и защиты от стихийных бедствий на базе беспилотного летательного аппарата «Нарт» // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3(116). С. 229-238.

152. Ресурсы поверхностных вод СССР, Том 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Бассейн р. Амударья. 1971.

153. Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан на период до 2030 года/ Утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 2 октября 2019 года, №482, стр. 7-16, Душанбе- 2019.

154. Национальное Информационное Агентство Таджикистана «Ховар» дата доступа: 13.11.2020г. Режим доступа: <https://khovar.tj/rus/2020/10/segodnya-mezhdunarodnyj-den-poumensheniyu-opasnosti-stihijnyh-bedstvij-v-tadzhikistane-nablyudaetsya-ne-tolko-umenshenie-ih-kolichestva-no-i-snizhenie-gibeli-lyudej/>

155. КЧС отчитался перед представителями СМИ за 2019 год. Официальный сайт КЧС и ГО при ПРТ. Режим доступа: [<https://kchs.tj/node/1291>. Дата доступа: 07.02.2020 г.

156. Официальный сайт медиа группы ASIA-Plus, 2015. В Таджикистане 16 семей отказались переселяться из опасных зон. Режим доступа: <https://asiaplustj.info/ru> (дата обращения: 12.05.2020)

157. Алейникова А.М. Очаги формирования селевых процессов в высокогорных ландшафтах долины р. Адыл-су (Приэльбрусье) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды Второй конференции. Москва, 2012, с. 9-10.

158. Ёкубов Ш.А., Муродкулов Ш.Я., Олимов Б, Сафаров М.С., Файзуллоев Ш.А. Исследование зон возможного развития экзогенных геологических процессов при сейсмических явлениях на территории Лахшского района в Таджикистане // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук, 2020, №1, с. 101-107.

159. Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д. А., Черноморец С.С. Колебания уровня воды в горных ледниковых озерах Приэльбрусья // Геориск. 2013. № 3. С. 20–27

160. Пирмамадов У. Селевые потоки вызванные прорывом гляциальных высокогорных озер на территории Таджикистана. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тр. Второй конференции, посвященной 100-летию С.М. Флейшмана. 2012, с. 72-73.

161. Kapitsa, V. Shahgedanova, M. MacHugh, H. Severskiy, I. Medeu, A. Assessment of evolution and risks of glacier lake outbursts in the Djungarskiy Alatau, Central Asia, using Landsat imagery and glacier bed topography modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2017, 1817-1856. (15 cites 89-й перцентиль) <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1837-2017>

162. Akhmetkal R. Medeu, Nikolay V. Popov, Viktor P. Blagovechshenskiy, Maulken A. Askarova, Alikhan A. Medeu, Sandugash U. Ranova, Aidana Kamalbekova, Tobias Bolch. Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan // *Earth-Science Reviews*. 2022. V. 229. 103999. (Scopus, 99 перцентиль) <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>

163. Medeu, A.R., Tokmagambetov, T.G. Kokarev, A.L. Plekhanov, P.A. Plekhanova, N.S. Effects of glaciological and hydro-meteorological conditions on the glacial danger in Zailiyskiy Alatau. 2017. *Led i Sneg*. 57(2). 261-268. (32-й перцентиль) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-2-261-268>

164. А. Р. Медеу, В. П. Благовещенский, Н. Е. Касаткин [и др.]. Гляциальные сели в Заилийском Алатау за последние 120 лет // Лёд и

снег. -2020. -Т. 60. -№ 2. -С. 213-224. - DOI 10.31857/S2076673420020035. – EDN GGDGIK.

165. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В. [и др.]. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли. – 2007. – Т. 11. – № 1. – С. 72-85. – EDN HZGMXV.

166. Зарипов Р.Г., Имомназаров Ф.С., Тагойбеков А.С. Оценка селевых потоков бассейна реки Шураки Капали (левый приток реки Сурхоб, Таджикистан) и разработка мер по снижению риска. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. – Труды 6-й конференции (Таджикистан), 2020, с. 342-350.

167. Кидяева В.М., Крыленко И.В., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Куровская В.А., Раимбеков Ю.Х., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О. Реакция высокогорных озер западного Памира на изменение климата (на примере озера Варшезкуль Нижнее, Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). Геоморфология. 2021;(3):90-104. <https://doi.org/10.31857/S0435428121030068>

168. Х. М. Саидмурадов, К. В. Станюкович // Таджикистан: природа и природные ресурсы. Дониш, Душанбе – 1982.

169. Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Запорожченко Э.В., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., 2019. Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе. Геориск, Том XIII, № 1, с. 26–36, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-1-26-36>

170. Черноморец С., Савернюк Е., Бобов Р., Асмаатов Н., Мавлоназаров О., Мирмамадов Д., Пирмамадов У., Шафиев Г., 2015. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии, Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова, Санкт-Петербург, 2015, с. 261–264.

171. Сафаров, М.С., Фазылов А.Р. Селевая активность в бассейне реки Арчакапа // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2022. – № 2(187). – С. 125-135. – EDN ZYTWVQ.

172. Национальная стратегия Республики Таджикистан по снижению риска стихийных бедствий на 2019-2030 годы.

Постановление Правительство Республики Таджикистан от 29 декабря 2018 года №602 г.Душанбе, 161 стр. URL: <https://khf.tj/sites/default/files/pdf/Natsionalnaya-Strategiya.pdf>

173. Обзор о чрезвычайных ситуациях в Республике Таджикистан за 2019 год// КЧС и ГО РТ. Режим доступа: <https://www.osce.org/files/f/do-cuments/5/a/475247.pdf>.

174. КЧС отчитался перед представителями СМИ за первое полугодие. Официальный сайт КЧС. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1504> Дата доступа: 23/07/2020 г.

175. КЧС отчитался перед представителями СМИ за 2020 год. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1875>

176. Avesta information agency. Ущерб от стихийных бедствий за прошлый год в Таджикистане превысил \$5,2 млн. Режим доступа: <http://avesta.tj/2021/02/11/ushherb-ot-stihijnyh-bedstvij-za-proshlyj-god-v-tadzhikistane-prevysil-5-2-mln>. Дата доступа: 14.02.2021 г.

177. Фазылов А.Р. Селевая безопасность в Таджикистане [Текст] / А.Р. Фазылов, Н.П. Лавров, Д.Б. Ниязов // Сб. науч. тр. ФГБОУ ВПО РГАТУ «Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства»; под ред. Н.В. Бышова. -Рязань, 2017. -С. 77,80.

178. Информация о селях на территории страны. Официальный сайт КЧС. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1321> Дата доступа: 22.03.2020 г.

179. Ситуация в Хуросонском районе, комиссия по ЧС подвела итоги нанесенного ущерба. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1337>. Дата доступа: 02.04.2020 г.

180. В результате прошедших обильных дождей в ряде районов страны зафиксирован сход селей. Официальный сайт КЧС. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1414>. Дата доступа: 15.05.2020 г.

181. Предварительные итоги по ущербу из-за схода селей в Хуросоне. Официальный сайт КЧС: Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1417>. Дата доступа: 18.05.2020 г.

182. КЧС: сохраняется сход селей и камнепадов. Официальный сайт КЧС. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1436>. Дата доступа: 10.06.2020 г.

183. Сводка КЧС: происшествие за сутки, работа спасателей. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1460>. Дата доступа: 24.06.2020 г.

184. Оперативная сводка КЧС за прошедшие сутки. Официальный сайт КЧС. Режим доступа: <https://kchs.tj/node/1494>. Дата доступа: 15.07.2020 г.

185. Обзор о чрезвычайных ситуациях в Республике Таджикистан за 2021 год// КЧС и ГО РТ. Режим доступа: <https://www.osce.org/files/f/do-cuments/5/a/475247.pdf>.

186. Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных территорий в условиях изменения климата (Камароб, Таджикистан) // Труды 6-й международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». -Таджикистан, -2020. -С. 313-322.

187. Сафаров М.С. Камароб: физико-географическая характеристика, геологическое строение, сейсмичность, биологическое разнообразие, водные ресурсы, радиационная обстановка: Монография / Ф. Рахими, А.С. Саидов, Ю. Мамаджанов, Х.Х. Хисориев, Р.Б. Сатторов, К. Партоев, З.В. Кобулиев, А. Каюмов, И. Мирсаидзода, Ф.Р. Хакимов, Б. Бобозода, П. Аминзода, Д.С. Кадамов, А.А. Собиров, Ш.М. Мубаллиева, Ф.И. Шаймуродов, К.Ф. Эмомов, А.К. Ходжиев, Ф.И. Рахимов, М.С. Сафаров, К.А. Бобокалонов, М.С.Худжаев, Ф.А. Хамидов, М.З. Ахмедов, Л.С. Набиев, Д.Р. Шарафутдинов, Н.Х. Амиркулов, Т.А. Начмуддинов, Б.Б. Баротов, Ш.Р. Муродов, Дж. Давлатов, Р.У. Джураев, Х.Ш. Валиев. - Душанбе: Дониш, -2020. -199 с.

188. Официальный сайт медиа группы ASIA-Plus, 2015. Сельубийца, URL: <https://asiaplustj.info/ru> (дата обращения: 12.05.2020).

189. Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан .2015 URL: [http://oldstat.wv.tj/img/ab01deaab07fe8aca74876d31d53affa\\_1453453713.pdf](http://oldstat.wv.tj/img/ab01deaab07fe8aca74876d31d53affa_1453453713.pdf)

190. Официальный сайт КЧС. URL: <https://www.khf.tj> и <https://www.khf.tj-/node/2459> (Дата доступа 12/08/2020).

191. Официальный сайт КЧС. URL: <https://www.khf.tj-/node/2306> [Дата доступа 13/06/2020].

192. В Ляхше зафиксирована ледниковая сель. Официальный сайт КЧС. URL: <https://www.khf.tj-/node/2214> (Дата доступа 28/07/2021).

193. Ледники Таджикистана / Министерство охраны природы Республики Таджикистан/Главное управление по гидрометеорологии и наблюдениям за природной средой, стр. 12-14, Душанбе – 2003.

194. Каталог ледников СССР. Том 14. Сред-няя Азия. Выпуск 3. Амударья. Часть 6. Бассейн реки Сурхоб между устьями рек Обихингоу и Муксу. -Л.: Гидрометеоздат, 1971. - 92 с.

195. Каюмов А.К., Сафаров М.С. Инновационные методы изучения ледников // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Водные ресурсы: состояние, новые подходы и перспективы развития», посвященной 30-летию Государственной Независимости Республики Таджикистан. 22-23 октября 2021 г., Душанбе, Республика Таджикистан // Душанбе, 2021, т.1. № 3. с. 39-43.

196. В.И. Липский / Горная Бухара: Результаты трёхлетних путешествий в Среднюю Азию в 1896, 1897 и 1899 году / стр. 439, 484

197. Официальный сайт медиа группы ASIA-Plus, 2015. Отколовшаяся часть ледника нанесла удар по Таджикабаду, URL: <https://asiaplustj.info/ru/news/tajikistan/incidents/20160830/230174>

198. Рахими Ф., Мухаббатов Х. Ниязов А. С., Аброров Х// Вода, наука и устойчивое развитие (на тадж.). Дониш, Душанбе-2019г., 129 с.

199. Тохиров С., Искандаров Н. Обнома. Душанбе: Ирфон, 2010. –479 с. 118.

200. Муминов Абулкосим Оманкулович. Геоэкологическая оценка загрязненности поверхностных вод бассейна реки вахш и влияние водохранилищ на климатические условия прибрежных районов дис. на соискание учёной степени канд.географических наук. Санкт-Петербург 2020 г.- 123 с.

201. Racha Elkadiri, Mohamed Sultan, Ahmed M. Youssef, Tamer Elbayoumi, Ronald Chase, Ali B. Bulkhi, and Mohamed M. Al-Katheeri/A Remote Sensing-Based Approach for Debris-Flow. Susceptibility Assessment Using Artificial Neural Networks and Logistic Regression Modeling/IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, vol. 7, no. 12, December 2014

202. J. Chiu, C. Dow, C. Lin, J. Lin, and H. Hsieh, “A watershed-based debris flow early warning system using sensor web enabling techniques in heterogeneous environments,” IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., vol. 5, no. 6, pp. 1729–1739, Dec. 2012.

203. Y. Hong, R. F. Adler, and G. Huffman, “An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 45, no. 6, pp. 1671–1680, Jun. 2007.

204. K. Muthu, M. Petrou, C. Tarantino, and P. Blonda, "Landslide possibility mapping using fuzzy approaches," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 4, pp. 1253–1265, Apr. 2008.

205. F. Chang, Y. Chiang, and W. Lee, "Investigating the impact of the Chi-Chi earthquake on the occurrence of debris flows using artificial neural networks," *Hydrol. Process.*, vol. 23, pp. 2728–2736, 2009.

206. Center for Hydrometeorology and Remote Sensing Data portal: Режим доступа: URL: <https://chrsdata.eng.uci.edu/>

207. Hong, Y., K.Hsu, S.Sorooshian, and X.Gao, 2004: Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. *Journal of Appl. Meteorology*, 43, 1834–1852, doi:<https://doi.org/10.1175/JAM2173.1>.

208. Официальный сайт Центра гидрометеорологии и дистанционного зондирования (CHRS) Калифорнийского университета в Ирвине. Режим доступа: [http://chrs.web.uci.edu/SP\\_activities00.php](http://chrs.web.uci.edu/SP_activities00.php)

209. The PERSIANN System. URL: <http://chrs.web.uci.edu>

210. Электронный ресурс. URL: [http://chrs.web.uci.edu/SP\\_activities01.php](http://chrs.web.uci.edu/SP_activities01.php)

211. Phu Nguyen, Andrea Thorstensen, Soroosh Sorooshian, Kuolin Hsu, Amir AghaKouchak J. Flood Forecasting and Inundation Mapping Using HiResFlood-UCI and Near-Real-Time Satellite Precipitation Data: The 2008 Iowa Flood. *Journal of Hydrometeor.* (2015) 16 (3): 1171–1183.

212. Ashouri, Hamed, Gehne, Maria & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 06 Nov 2020. "The Climate Data Guide: PERSIANN-CDR: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/persiann-cdr-precipitation-estimation-remotely-sensed-information-using-artificial>.

213. Joyce, R.J., J.E. Janowiak, P. A. Arkin and P. Xie, 2004: CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *J. Hydrometeorology*, 5, 487-503.

214. Xie, P., R. Joyce, S. Wu, S.-H. Yoo, Y. Yarosh, F. Sun, and R. Lin, 2017: Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates. *J. Hydrometeor.*, 18, DOI: <http://dx.doi.org>

215. Scofield, R. A., 1987: The NESDIS operational convective precipitation estimation technique. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1773-1792

216. Vicente, G. A., R. A. Scofield, and W. P. Menzel, 1998: The operational GOES infrared rainfall estimation technique. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 1883- 1898

217. Scofield, R. A., and R. J. Kuligowski, 2003: Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events. Mon. Wea. Rev., 18, 1037-1051.

218. Оценка количества осадков со спутника STAR – Гидро-оценка (STAR Satellite Rainfall Estimates - Hydro-Estimator). Режим доступа: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/ff/HydroEst.php>

219. Hsu, K., X.Gao, S.Sorooshian, and H. V.Gupta, 1997: Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. J. Appl. Meteor., 36, 1176–1190.

220. Hsu, K., S.Sellars, P.Nguyen, D.Braithwaite, and W.Chu, 2013: G-WADI PERSIANN-CCS GeoServer for extreme precipitation event monitoring. Sci. Cold Arid Reg., 5 (1), 6–15.

221. Sorooshian, S., K.Hsu, X.Gao, H.Gupta, B.Imam, and D.Braithwaite, 2000: Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81, 2035–2046.

222. Hong, Y., R. F.Adler, A.Negri, and G. J.Huffman, 2007a: Flood and landslide applications of near real-time satellite rainfall products. Nat. Hazards, 43, 285–294.

223. Hong, Y., D.Gochis, J. T.Chen, K. L.Hsu, and S.Sorooshian, 2007b: Evaluation of PERSIANN-CCS rainfall measurement using the NAME event rain gauge network. J. Hydrometeor., 8, 469–482.

224. Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. & Lister, D.H. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Sci Data 7, 109 2020. <https://rdcu.be/b3nUI>

225. Муртазаев У.И. Водохранилища Таджикистана и их влияние на прилегающие ландшафты.- Душанбе: изд. «Ирфон», 2005.-304с.- С.10.

226. Ёров А.Ё. Инструментальные исследования процесса заиления водохранилища Нурекской ГЭС [Текст] / А.Ё. Ёров, Х. Ибодзода, С.Н. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции «Математические проблемы технической гидромеханики, теории фильтрации и орошаемого земледелия» посв. 70-летию докт. техн. наук, профессора Саттарова М.А. (27-28 мая 2008г., г. Душанбе, Таджикистан). -Душанбе, 2008. -С.28-32.

227. Д.Х. Аминов, А.Р. Фазылов, З.В. Кобулиев, Дж. Аминов, М.С. Сафаров Мониторинг заиления водохранилищ с

использованием методов дистанционного зондирования // Материалы Международной научно-практической конференции «Комплексное использование водно-энергетических ресурсов Центральной Азии в условиях глобального изменения климата» (г. Душанбе, 3-4 декабря 2020 г.). – Душанбе, 2020. - С. 57-68.

228. Мониторинг озера Сарез: [Электронный ресурс] // Отчет экспедиции по мониторингу озера Сарез в июле месяце 2017 г., URL: <https://www.rceesa.tj/?p=812> /.

229. Зарипов Р.Г., Имомназаров Ф.С., Тагойбеков А.С., Гляциальные селевые потоки и другие природные угрозы бассейна р. Шураки Капали (хребет Петра первого, Таджикистан): исследование и мероприятия по снижению риска чрезвычайных ситуаций/ «Геориск», Том XIV, №2/2020

230. NDVI - теория и практика. Gislab/ [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html>

231. Вегетационные индексы и использование спектрональных данных БПЛА eVe Ag компании senseFly (Швейцария). ГЕОСалют. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.geosalut.ru/img/file/bpla\\_evee\\_selskoe\\_hoz-yaytsvo.pdf](http://www.geosalut.ru/img/file/bpla_evee_selskoe_hoz-yaytsvo.pdf).

232. D. J. Varnes, Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. Paris, France: International Association Engineering Geology, Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes, 1984.

233. R. C. Sidle, and H. Ochiai, Landslides: Processes, Prediction, and Land use. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, 2006.

234. J. Rau, L. Chen, J. Liu, and T. Wu, “Dynamics monitoring and disaster assessment for watershed management using time-series satellite images,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 45, pp. 1641–1649, 2007.

235. J. Vauhkonen et al., “Classification of spruce and pine trees using active hyperspectral LiDAR,” IEEE Geosci Remote Sens. Lett., vol. 10, no. 5, pp. 1138–1141, Sep. 2013.

236. C. J. Tucker, “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation,” Remote Sens. Environ., vol. 8, pp. 127–150, 1979.

237. Официальный сайт DroneDeploy, 2017. Identifying crop variability with drones, URL: <https://blog.dronedeploy.com/identifying-crop-variability-whats-the-difference-between-ndvi-false-ndvi-and-vari-plant-health-98c380381a33> (дата обращения: 12.05.2020).

238. Волосухин В.А., Титоренко А.И. Проблемы селевой активности на горных реках Черноморского побережья // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 4. С. 103–106.

239. Волосухин В.А., Анахаев К.Н., Пономарев А.А. Инженерная защита территории олимпийских объектов от селевых потоков / В. А. Волосухин, // Гидротехника. – 2011. – № 3. – С. 76-79. – EDN UJKIKH.

240. Волосухин В.А., Титоренко А.И. Селевые процессы в бассейне реки Мзымта (Западный Кавказ) // ГеоРиск. – 2012. – № 4. – С. 38-43. – EDN PSZPVF.

241. Волосухин, В. А. Инженерная защита олимпийских объектов в Б. Сочи от селевых потоков / В. А. Волосухин, А. И. Титоренко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. – № 3. – С. 22-24. – EDN QALAGL.

242. Титоренко, А.И. Применение и методы расчёта гибких противоселевых сооружений / А.И. Титоренко // Вестник Волгоградского гос. архит.-строит. ун-та. Стр-во и архит. – 2012. – Вып. 26 (45). – С. 5–12.

243. ОДМ 218.2.052-2015 Проектирование и строительство противоселевых сооружений для защиты автомобильных дорог. Министерство транспорта Российской Федерации. Федеральное дорожное агентство. URL: <https://www.dokipedia.ru/document/5317436>

244. S. Park, C. Choi, B. Kim, and J. Kim, “Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea,” Environ. Earth Sci., vol. 68, pp. 1443–1464, 2013.

245. J. Jenness, Topographic Position Index (tpi jen. Avx) Extension for ArcView 3.x, v.1.3 a. Jenness Enterprises, 2006 [Online]. Available: <http://www.jennes-sent.com/arcview/tpi/htm>

246. Токарев С. В., Рощина К. Н. // Картирование элементов рельефа земной поверхности с использованием индекса топографической позиции (на примере Крымского полуострова) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. Том 1 (67). №4. 2015 г. С. 64–85.

247. Кидяева В.М., Петраков Д.А., Черноморец С.С. [и др.]. Моделирование прорыва Башкаринских озёр 1 сентября 2017 года // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита : труды 5-й Международной конференции, Тбилиси, Грузия, 01–05 октября 2018 года / Селевая ассоциация; Институт водного хозяйства им. Ц.

Мирцхулава Грузинского технического университета. – Тбилиси, Грузия: Универсал, 2018. – С. 367-377. – EDN VUJULI.

248. Отчёт о горном походе 4 к.с. по Памиру летом 2010 г. 1/2 [Электронный ресурс]. Дата доступа 10.09.2020. Режим доступа: [http://www.mountain.ru/article/article\\_display1.php?article\\_id=5048](http://www.mountain.ru/article/article_display1.php?article_id=5048)

249. Ф. Рахими, А. С. Саидов, И.С. Оймухаммадзода, Ю Мамаджанов, А.Р. Ищук, Р. У. Джураев и Н. Ниёзов. Озеро Сарез (история исследования, физико-географическая характеристика, геологическое строение и сейсмичность) – Душанбе: Дониш, 2018. 288 с.

250. Современные космические данные дистанционного зондирования – основа построения единой системы пространственных данных // Информационный бюллетень ГИС-ассоциации. – 2006. – № 1

251. Аристов, К.А. Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Изучение многофазных катастрофических гляциальных событий картографическим методом // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита : труды 5-й Международной конференции, Тбилиси, Грузия, 01–05 октября 2018 года / Селевая ассоциация; Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета. – Тбилиси, Грузия: Универсал, 2018. – С. 246-261. – EDN VUJUNO.

252. Елисеев А.Н., Фёдоров Д.М., Кондратьев Р.Ю. Оценка экономической эффективности применения БПЛА//Пожарная безопасность: проблемы и перспективы том: 1, номер: 9, 2018 стр. 252-253

253. Курсы валют [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ratestats.com/tajikistani-somoni/2019/>. Дата доступа: 19.02.2021

254. Курс доллара США за 2020 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vbr.ru/banki/kurs-valut/cbrf/usd/2020>. Дата доступа: 19.02.2021

**М.С. Сафаров, А.Р. Фазылов**

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И  
МОНИТОРИНГ СЕЛЕОПАСНЫХ РАЙОНОВ  
ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ТАДЖИКИСТАНА**

ISBN 987-99985-57-81-9



Подписано в печать 01.08.2023. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 12,0. Тираж 200 экз.

Отпечатано в типографии «Промэкспо».  
734042, г. Душанбе, ул. Айни 13В.  
Тел.: (+992 37) 227-63-73, 919-76-97-97.  
E-mail: promexpo\_tj@mail.ru