

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА**

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии

*На правах рукописи*

УДК: 551.435.627(575.3)

ББЛ 26.3 (Тадж.)

Ф - 12



**РАХИМЗОДА МАНИЖА РАХМОН**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата

геолого-минералогических наук

Специальность 25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение

и грунтоведение

**Научный руководитель**

**кандидат геол.-мин. наук**

**Оймухаммадзода И.С.**

Душанбе-2025

## Оглавление

<b>Список сокращений .....</b>	<b>3</b>
<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА I. К ИСТОРИИ ИЗУЧЕННОСТИ РАЙОНА РАБОТ .....</b>	<b>10-23</b>
<b>ГЛАВА II. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ .....</b>	<b>24-44</b>
2.1. Стратиграфия .....	25-33
2.2. Тектоника .....	33-37
2.3. Геоморфология .....	37-39
2.4. Сейсмичность исследуемой территории .....	39-44
<b>ГЛАВА III. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>45-52</b>
<b>ГЛАВА IV. ЗОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ ПО СТЕПЕНИ ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОПОЛЗНЕЙ .....</b>	<b>53-79</b>
<b>ГЛАВА V. ВЛИЯНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАЗВИТИЕ ОСЫПЕЙ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ .....</b>	<b>80-108</b>
<b>ГЛАВА VI. ВОСПРИИМЧИВОСТИ ТЕРРИТОРИИ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ЛАВИН .....</b>	<b>109-127</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>128-129</b>
<b>РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ .....</b>	<b>130-131</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>132-153</b>

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ВАК - Высшая аттестационная комиссия

ГИС – Геоинформационная система

РТ – Реестр свидетельств о государственной регистрации

AUK – Площадь под кривой

ROC – Рабочая характеристика приёмника

УДК – Универсальный десятичный классификатор

ГР – Государственная регистрация

НАНТ – Национальная академия наук Таджикистана

ЦМР – Цифровая модель рельефа

USGS – Геологическая служба Соединённых Штатов

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Характерной особенностью Юго-Восточного Таджикистана (Памир) является активное проявление современных экзогенных геологических процессов, таких, как оползни, осыпи, лавины, сели и т.п. В разные годы на Памире проводились многочисленные работы по изучению тектоники, стратиграфии, геоморфологии, сейсмоки, полезных ископаемых и по инженерной геологии, в результате которых было установлено сложное строение региона. Интерес к его изучению не угас до сих пор, но на современном этапе в связи с активизацией климатических изменений, зачастую приобретающих характер катастрофических событий, весьма актуальным является изучение экзогенных геологических процессов. Примером могут служить гляциальные сели, прошедшие на Памире в 2015 и 2023 годах. Повсеместное повышение температуры ведёт к увеличению количества выпадающих дождей и таянию ледников, что также активизирует экзогенные процессы. В этих условиях необходимо применение современных методов исследования, в первую очередь дистанционного зондирования. В пределах долины р. Гунт расположены г. Хорог, населенные пункты Шугнанского района, оздоровительные санатории, а также проходит международного «Шёлково пути» Душанбе-Хорог-Кульма. Для уменьшения степени угрозы населению и их хозяйствам от последствий экзогенных геологических процессов весьма важны более детальное изучение этих процессов на изучаемой территории, их пространственной взаимосвязи с геологическими, морфометрическими и климатическими факторами, а также оценка восприимчивости к их возникновению с применением современных геоинформационных технологий. Из числа экзогенных геологических процессов предметом исследования долины р. Гунт являлись оползни, осыпи и лавины, изучение которых имеет большое практическое значение при освоении новых территорий.

### **Степень научной проработанности темы исследования.**

Основным требованием к методам расчёта соотношения частотности является снижение вычислительной трудоёмкости при одновременном сохранении приемлемого уровня точности получаемых результатов. Совершенствование метод оценки соотношение частотности посвящены работы Х.М. Абул, А.Л. Ачу, С. Мандал, Ш.А. Файзуллоев, Ш. Мухаммадзода, Д.Ф. Байгенов, С. Хуссайн, Р. Мохамингам, С. Мина, Х.Л. Хонг, Н. Салим, П. Янг, И. Янинг, Ф. Силалахи, С. Памила, Б. Сон и другие.

**Связь исследования с программами и научными темами.** Научно-исследовательская работа проводилась в первую очередь в рамках национальной стратегии Республики Таджикистан по снижению риска стихийных бедствий на 2019-2030 годы, утвержденной постановлением Правительства Республики Таджикистан от 29 декабря 2018 года, №602; Программы геологического развития Республики Таджикистан на 2021-2030 гг., утвержденной постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 апреля 2021 года, №172, и в соответствии с темой «Создание новой карты сейсмической опасности территорий Таджикистана» лаборатории оценки сейсмической опасности Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ (УДК 550.34:551.78(575.3), № ГР №0116ТJ00576).

### **Общая характеристика работы**

**Целью диссертационной работы.** Выявление пространственной закономерности развития экзогенных геологических процессов долины р. Гунт и разработка карт, характеризующих вероятность возникновения оползней, осыпей и лавин на исследуемой территории.

**Задачи исследования.** Достижение цели обеспечивалось решением ряда задач, в том числе:

1. Составление карт инвентаризации оползней, осыпей и лавин долины р. Гунт с использованием архивных материалов и данных дистанционного зондирования.

2. Создание ГИС - базы данных оползней, осыпей и лавин.
3. Установление факторов пространственных взаимоотношений оползней, осыпей и лавин.
4. Разработка модели восприимчивости к формированию оползней, осыпей и лавин с применением количественных методов исследования.
5. Сравнительный анализ модели восприимчивости к возникновению экзогенных процессов с применением ROC- кривой.

**Объект исследования.** Объектом исследования явилась долина р. Гунт Юго-Западного Памира.

**Предмет исследования.** Экзогенные геологические процессы, такие, как оползи, осыпи и лавины долины р. Гунт.

**Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.** Полученные результаты в ходе исследования долины р. Гунт весьма важны для оценки оползневой, лавинной опасности и опасности возникновения осыпей, а также выявления рисков при планировании землепользования. Результаты также можно использовать для оценки степени ущерба от природных опасностей. Используемый метод также рекомендуется для оценки восприимчивости к возникновению оползней, осыпей и лавин других территории Горно-Бадахшанской Автономной Области.

**Научная новизна работы.**

1. Впервые проведён коррелятивный анализ оползневых явлений долины реки Гунт с применением современных ГИС-технологий.
2. Впервые был использован количественный метод (соотношения частотности) для выявления пространственных закономерностей осыпей.
3. Впервые создана карта восприимчивости к возникновению осыпей.
4. Впервые проведена оценка восприимчивости к возникновению лавин, на основе выявленных коррелятивов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Развитие оползневых явлений территории долины реки Гунт зависит от морфометрических, климатических и геологических условий.

2. Взвешивание основных факторов осыпей района исследования позволило создать модель восприимчивости к их возникновению с хорошей прогностической способностью.

3. Моделирование восприимчивости к возникновению лавин показывает, что наибольшими восприимчивыми зонами являются нижние части склонов долины реки Гунт.

**Степень достоверности результатов.** Научно-практические результаты получены по данным полевых и экспериментальных работ, анализ, выводы и рекомендации обоснованы и уточнены аналитическими, статистическими методами и современными компьютерными технологиями что обеспечивает достоверность результатов.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Содержание исследований в данной диссертации соответствует пунктам 10, 12, 14 и 17 паспорту специальности 25.00.08- инженерная геология, мерзлототоповедение и грунтоведение.

10. Роль климата, подземных и поверхностных вод, геологической истории и геодинамических режимов территорий, техногенеза и других факторов и развитии геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов.

12. Физические, математическое, аналоговое и другое моделирование геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов, прогноз развития во времени пространстве, оценка и управление геологическими опасностями и геологическими рисками.

14. Закономерности пространственной и временной изменчивости свойств грунтов, геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов, других компонентов инженерно-геологических и геокриологических условий, их устойчивость к природным и техногенным воздействиям разного генезиса.1.17. Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные

системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля.

17. Геоинформационные системы и геоинформационные технологии решения задач инженерной геологии, мерзлотоведения и грунтоведения.

**Личный вклад соискателя ученой степени в исследования.**

Создание ГИС-базы данных на основе оцифровки материалов, подготовка данных для интерпретации расчетов, создание моделей восприимчивости к возникновению оползней, осыпей и лавин, проведение полевых работ для верификации моделей, а также формулировке выводов и подготовке материала для научных публикаций.

**Апробация и реализация работы.** Карта инвентаризации оползней, осыпей и лавин составлена с использованием архивных данных и использованием программного обеспечения Google Earth Pro; проведением верификации данных в поле; моделированием восприимчивости к возникновению оползней, осыпей и лавин в ГИС-программе ArcGIS Desktop версии 10.6.1. и оценкой данных ROC-анализом; публикацией основных результатов работы в рецензируемых изданиях ВАК РТ; апробацией результатов научных исследований на конференциях разного ранга.

Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на: международной научно-практической конференции «Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии, гидрологии и разработки месторождений полезных ископаемых Таджикистана и сопредельных территорий», посвящённой 80-летию со дня рождения заслуженного работника Таджикистана, доктора технических наук, профессора, академика инженерной академии республики Таджикистан Комилова Одины Комиловича. Республиканская научно-теоретическая конференция на тему: «Важность внедрения современных методов поиска, разведки, добычи полезных ископаемых и учета экологическо-экономических аспектов для перспективного развития национальной промышленности страны», посвящённая «Дню геолога» на тему “Зонирования территории долины реки

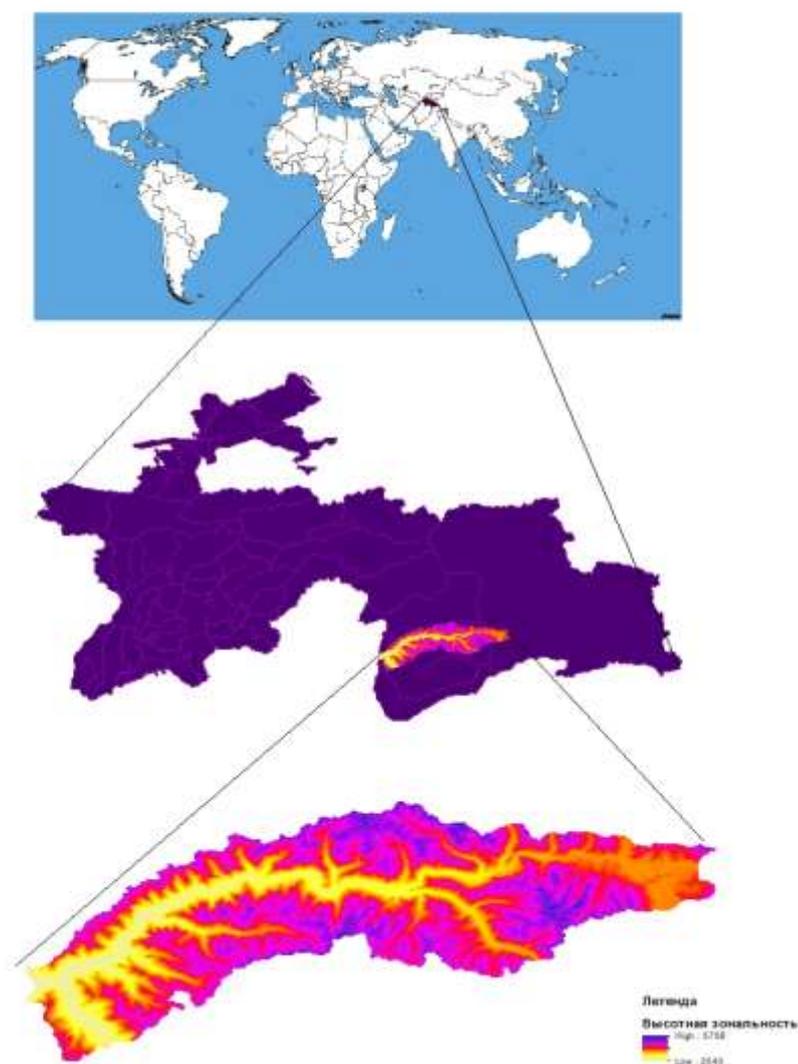
Гунт по степени восприимчивости к возникновению оползней” 8 декабря 2022 года. Республиканское научное мероприятие, посвящённое Международному дню женщин и девушек в науке и "Двадцатилетию обучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования", на тему “Влияние крутизны и экспозиции склонов на развитие оползней в долине реки Гунт” Душанбе, 2023. 14-й курс по геоинформационным системам (ГИС) для геонаучных специалистов. Учебный институт Геологической службы Индии, Хайдарабад, на тему “Some regularities of landslide phenomena in the valley of the Gund river in the repablik of Tajikistan”. 18.01-01.02.2023. Хайдарабад. Some regularities of landslide phenomena in the valley of the Gund river in the repablik of Tajikistan”. 18.01-01.02.2023. Хайдарабад. Rahimbekova M.R. Use of frequency ratio method and GIS for landslide susceptibility modeling: a case study in the South-Western part of Tajikistan. SH.A. Faizulloev., B.A. Alamov., M.R. Rahimbekova. Natural Hazart and Climate Change Conference. Szeged, 21-23 May 2025. p.24.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, из них 6 в рецензируемых ВАК при Президенте РТ изданиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка использованной литературы и включает 153 страниц компьютерного текста, 52 иллюстраций, 13 таблиц и 166 наименование литературных источников.

## ГЛАВА I. К ИСТОРИИ ИЗУЧЕННОСТИ РАЙОНА РАБОТ

*Краткий физико-географический очерк.* Долина реки Гунт, административно относящаяся к Шугнанскому и Мургабскому районам ГБАО, занимает Юго-Западную часть Памира и характеризуется высокогорным и сильно расчлененным рельефом. Район работ на севере граничит с Рушанским хребтом, на востоке - с озером Яшил-Куль, на юге - с Шугнанским хребтом, а на западе - с долиной реки Пяндж.



**Рисунок 1.1.** - Схема расположения района работ

Юго-Западный Памир характеризуется высокогорным, сильно расчленённым эрозионным рельефом. К основным физико-географическим элементам

долины р. Гунт относятся Рушанский и Шугнанский хребты, средняя абсолютная высота которых находится в пределах 5500–6000 м. Рушанский хребет, протянувшийся на 120 км в пределах Юго-Западного Памира, представляет собой труднодоступный горный массив, разделяющий бассейны рек Гунт и Бартанг. С превышающей средней высотой более 5000 м и максимальной 6080 м (пик Патхор) хребет имеет сильно расчленённый рельеф. Шугнанский хребет длиной 90 км с максимальной шириной 60 км в виде платообразного массива сосредоточен между реками Шах-дара и Гунт. Максимальная высота — это пик Скальный - 5700 м. В средней части хребта развито современное оледенение, занимающие более 180 км<sup>2</sup>.

По долине реки Гунт, которая имеет значительную ширину (от 100-150 м до 300-500 м) и пологие склоны (45-70°), проходит автомагистраль Хорог-Мургаб. Истоком реки Гунт является озеро Яшилькуль, а основные притоки - это Токуз-Булак, Шарип-дара, Багив-дара и Шах-дара.

Тип питания речной сети долины реки Гунт ледниковый, в верхних частях аккумуляция влаги образует обширные площади современного оледенения. От положения снеговой линии, условий снеготаяния и запасов влаги зависит густота речной сети долины реки Гунт, суммарная протяженность которой складывается из главных речных артерий и многочисленных притоков. Изменение режима реки Гунт характеризуется непостоянством колебаний ее водности, и в зависимости от интервала времени выделяются весенний, летний и осенне-зимний сезоны. Постепенный подъем уровня воды р. Гунт начинается в конце апреля и в июне достигает своего максимума. Плавный спад уровня воды начитается в августе, который продолжается до ноября. Низкие температуры воды в реках долины наблюдаются в осенне-зимние периоды, и с повышением температуры воздуха растет температура водотоков.

В зависимости от атмосферной циркуляции, отличительными климатическими особенностями долины реки Гунт, прежде всего, являются большое значение солнечной радиации, континентальность и засушливость.

Долина находится в области круглогодичного действия циклонов и летнего действия муссона. Зима холодная и продолжительная, а лето довольно жаркое. Годовая сумма осадков в г.Хорог 260мм, а в Булун-Куле 105мм. Максимальное осадконакопление наблюдается в феврале и марте. Выпадение снега наблюдается в ноябре и декабре. Высота снежного покрова достигает до 50-70см, и он сходит в конце марта и апреля. Постоянный снежный покров сохраняется в течение 50–115 дней в году. Ветровая скорость варьируется от 0,5 до 2,5 м/с. Температурные значения воздуха в январе колеблются от -7,5 до +24,5 °С, в июле — от -22,0 до +10,5 °С, а годовой диапазон температур составляет от -5,5 до +8,5 °С. Относительная влажность в январе изменяется в широких пределах — от 25–35 % до 60–75 %. Годовая абсолютная влажность достигает максимума в июле–августе и минимальна в декабре–январе, что связано с сезонными колебаниями температуры воздуха.

*Исторический обзор.* Изучение геологии Памира берет начало с 1883 года, когда Д.Л. Ивановым был издан ряд работ по орографии Памира, его геологическому исследованию и т.д. И.В. Мушкетов, обобщая материалы предыдущих работ, выдвинул идею о дугах Средней Азии и связи Тянь-Шаня и Памиро-Алая (1919). Сведения о геологии Памира имеются в работе Д.В.Наливкина (1916), где даны сведения о горных сооружениях Центральной Азии [6, 16]. В 1928 году работы продолжались Советско-Германской экспедицией, в которой также принимали участие Д.И. Щербаков и А.Н. Лабунцов. Р. Клебельсберг (1922) установил Вахшский сброс как тектоническую структуру между Памиром и Тянь-Шанем и дал тектоническую схему области сочленения этих горных систем. С 1929 по 1931 годы начаты планомерные геолого-съёмочные работы на Памире Д.И. Щербаковым, Д.В. Никитиным, В.И. Поповым и др. Широкомасштабные работы на территории Памира начались с 1932 г. Таджикско-Памирской экспедицией. Геологические работы осуществлялись Н.П. Горбуновым, Д.И. Щербаковым, Д.В. Наливкиным, П.Д. Виноградовым, Г.П. Горшковым, А.П. Марковским, А.Е. Ферсманом, И.Е. Губиным, И.Я. Башиловым и др. В 1937

г. составлена геологическая карта Таджикской ССР и прилегающих областей среднеазиатских республик. А.П. Марковский (1934, 1935) приурочил Памир к окраинной зоне геосинклинали Тетиса [23, 24, 30, 33].

Таким образом, имели место две точки зрения о тектоническом положении Памира: первая – Памир приурочен к Альпийскому складчатому поясу [9, 13-15, 25, 35], вторая - зональное строение Памира, северные зоны которого отнесены к областям варисской складчатости, а южные - к киммерийской. Вопрос о тектонических границах между зонами Памира разбирается в работе М.М. Кухтикова (1955, 1956), где границы описываются как краевые разломы. В 1977 году вышла монографическая работа М.М. Кухтикова и Г. П. Винниченко «Краевые долгоживущие разломы Памира». В этой работе приводится геологическое описание важнейших разломов Памира (рис. 1.2) [26-28].

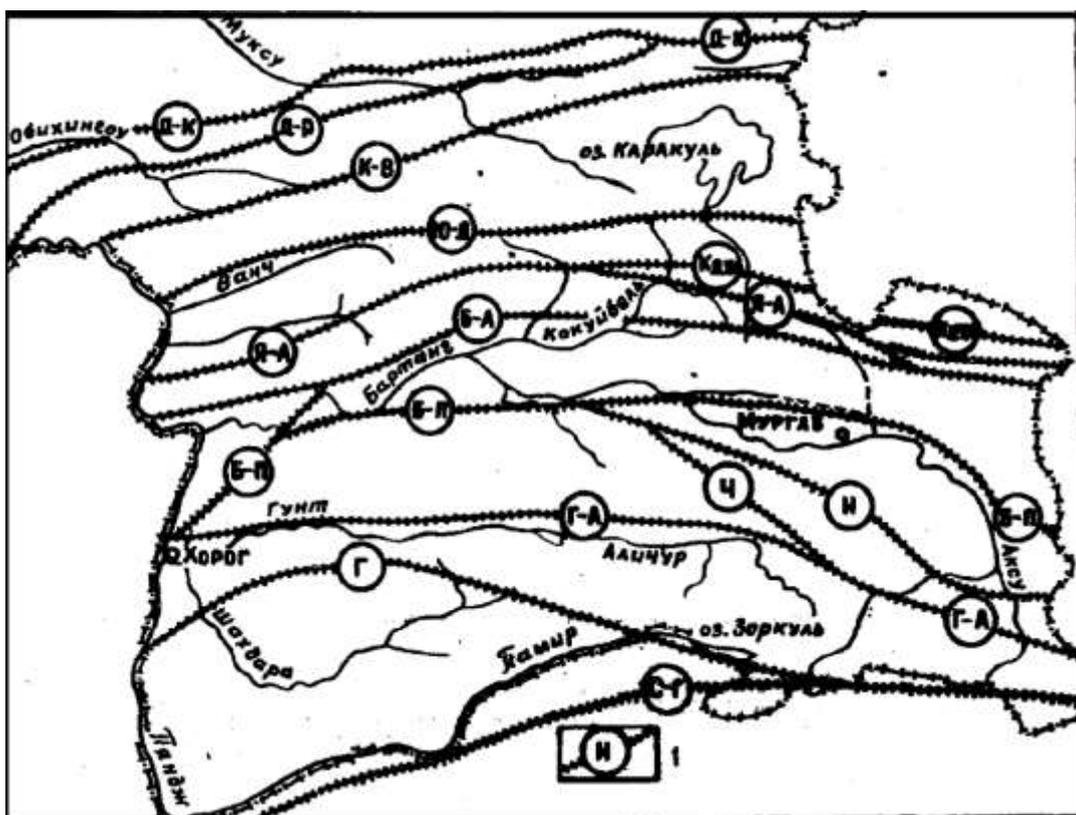


Рисунок 1.2. - Схема расположения краевых долгоживущих разломов Памира [28]

В.М. Сеницын, анализируя тектоническое строение Центральной Азии, дугообразное строение тектонических зон Памира, обосновал пересечение

двух систем древних структурных швов (1955, 1956) и выделил на их границе Памиро-Алайскую подвижную зону (1959) [42-44].

Большой интерес представляет работа Б.П. Бархатова, где Северный Памир отнесён к Урало-Тянь-Шанскому складчатому поясу, а Центральная и Южная его части - к Кавказско-Гималайскому поясу (1961).

М.В. Муратов и И.В. Архипов, изучая тектонику Памира и исходя из системы окружающих его складчатых сооружений, отнесли Памир к Альпийскому складчатому поясу (1961) [32].

В.С. Буртманом и другими (1963) и А.В. Пейве и другими (1964) было сказано о ведущей роли горизонтальных движений в формировании современной структуры Памира [7].

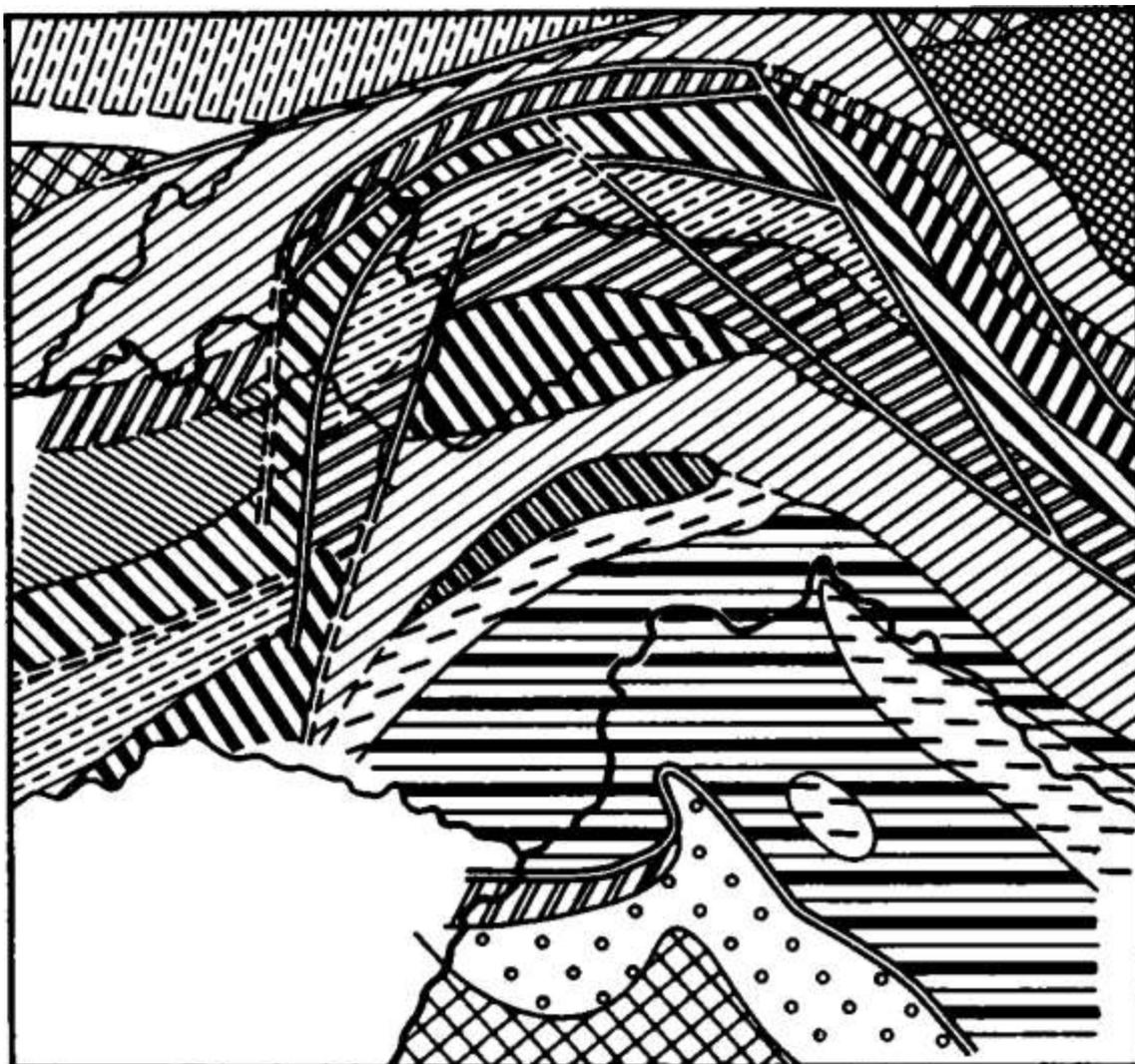
Изучая современные структуры Альпийско-Гималайского складчатого пояса, А.В. Пейве (1969) подразделил Памир на две различные части: Северную, которую относил к альпидам, и Центральную и Южную, которые образовались при надвигании северной периферии Индостанской платформы. Исходя из этого, отложения палеозойского и мезозойского возраста Центрального и Южного Памира отнесены к платформенным типам [40].

С.А. Захаров (1964, 1970), поддерживая представления о вторичном происхождении современной структуры Памира, выдвигает гипотезу зонного тектогенеза (рис. 1.3) [20, 21].

О структурно фациальных подзонах Центрального и Юго-Восточного Памира большой интерес представляют работы В.И. Дронова (1964), где эти зоны представлены как разновозрастные мезозойские сооружения и установлено их одновременное завершение в нижнем мелу развития геосинклинального этапа.

В.И. Будановым рассматривался вопрос о тектоническом размещении гранитоидных интрузий Памира (1964), в частности, их размещение в региональных структурах, пространственная сопряженность с основными и ультраосновными интрузиями, возраст интрузии и т.д. [18].

Вопросы геологического развития Памира в альпийское время отражены в работе И.В. Архипова (1964), где одновременно рассматривались и вопросы современной тектонической структуры этого региона [1].



**Рисунок 1.3.** - Схема тектонической зональности области Памирского скручивания [21]

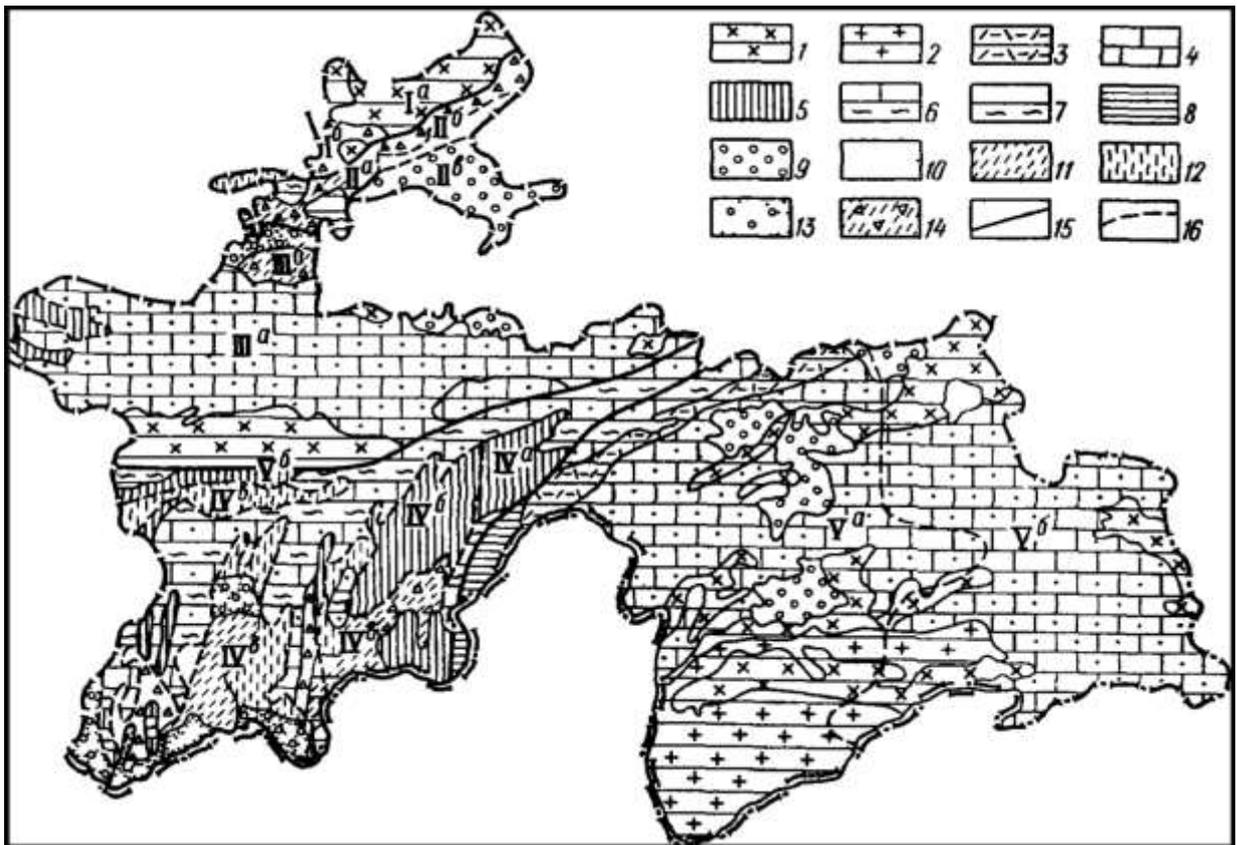
*Инженерно-геологические исследования.* Первые сведения об изучении экзогенных геологических процессов в Таджикистане отражены в монографии И.В. Мушкетова «Туркестан» (1897). В 1914 году вышла в свет работа Г.А. Шпилько «Новые данные об Усойском завале и Сарезском озере». Была составлена карта Сарезского озера. Изучены устойчивость завала, фильтрация и его стабильность. В последующие годы инженерно-геологическими и гидрогеологическими вопросами изучения территории

Таджикистана занимались И.И. Белостоцкий (1940), С.И.Клунников (1941), П.А. Смотров (1952), Н.И. Автомонов, О.В. Демичев (1958), Ю.Д.Акулов (1959), Е.Н. Сквалецкий, К.А.Федермессор (1960), В.И. Преснухин (1960-1965) [37, 38].

Большой интерес представляет работа Е.Н. Сквалецкого (1972) об инженерно-геологических условиях Таджикистана, опубликованная в книге «Гидрогеология СССР». Подробно дана инженерно-геологическая характеристика горных пород республики, которые разделены на две группы: коренные – скальные, полускальные и пластичные, и вторая группа – поверхностные отложения – грубообломочные, песчаные, глинистые и лёссовидные. Приводятся результаты физико-механических свойств пород. Большое внимание уделено современным геологическим процессам и явлениям, таким, как карстообразование, суффозия, просадки, являющиеся результатом воздействия поверхностных вод, склоновые процессы- оползни, осыпи и обвали, сели и тд. Е.Н. Сквалецким на основе геолого-структурных особенностей, геологического и тектонического развития и интенсивности инженерно-геологических процессов составлена схема инженерно-геологического районирования Таджикистана (рис. 1.4). Им разделён Таджикистан на пять инженерно-геологических регионов: Северо-Таджикский, Северо-Восточный, Центральнo-Таджикский, Юго-Западный и Юго-Восточный [46].

По морфологическим особенностям Юго-Восточный регион разделён на две инженерно-геологические области.

Первая из них высокогорная область, где характерны селевые потоки ледникового генезиса, куррумы и осыпи. Образование осыпей в основном связано с эрозией, выветриванием, морозным воздействием, которые способствуют их постоянному возникновению. В этой территории также наблюдаются грандиозные обвалы, связанные с обрушением пород.



**Рисунок 1.4.** -Инженерно-геологическое районирование Таджикистана [46]

1- Северо-Таджикский регион (Чаткало-Кураминское поднятие ). 1а – Чаткальский и Кураминский хребты, эрозионно-денудационный рельеф, преимущественное развитие скальных интрузивных и эффузивных пород палеозоя, селевые явления, снежные лавины; 1б – Мирзараватская межгорная впадина, аккумулятивный рельеф, преимущественно грубообломочные пролювиальные четвертичные отложения; II – Северо-Восточный регион (западная часть Ферганской впадины); IIа- Самгарская и Камышкурганская межгорные впадины, аккумулятивный рельеф, преимущественно грубообломочные пролювиальные четвертичные отложения; IIб – адыры Акбель – Супетау, Дигмай, Исписар, аккумулятивно-эрозионный рельеф, преимущественно полускальные и пластичные молассовые и соленосные породы, карстовые явления в соленосных отложениях; IIв – аллювиально-пролювиальная равнина и предгорные шлейфы в долине р. Сырдарьи, аккумулятивный рельеф, преимущественно аллювиально-пролювиальные четвертичные отложения и породы лёссового комплекса, подтопление и

заболачивание земель по берегам Фархадского и Кайраккумского водохранилищ, просадки на землях нового орошения в Голодной степи: III – Центрально-Таджикский регион (Гиссаро-Алайское поднятие); IIIа – Гиссарский, Зеравшанский и Туркестанский хребты, эрозионно-денудационный резко расчлененный рельеф, преимущественно скальные терригенные, карбонатные и интрузивные породы, сильная селевая деятельность, оползни в долине р. Зеравшан, высокая сейсмичность, на высоте свыше 3400м многолетняя мерзлота; IIIб – Шахристанская и Пенджикентская межгорные впадины, аккумулятивные и эрозионные формы рельефа, преимущественно полускальные молассовые породы и элювиально-пролювиальные грубообломочные отложения, селевые явления, оползни и предгорных районах; IV – Юго-Западный регион (Южно-Таджикская депрессия); IVа – хребты Петра Первого, Вахшский и их отроги, эрозионно-денудационный расчлененный рельеф, преимущественно скальные карбонатные породы, карстовые, оползневые и селевые явления; IV б – адыры, аккумулятивно-эрозионный рельеф, преимущественно полускальные молассовые породы и лёссы, селевые явления, псевдокарст и суффозия, просадочные явления; IVв – аллювиальные равнины и частные межгорные впадины (Гиссарская, Яванская, Дангаринская), преимущественно аллювиально-делювиально-пролювиальные грубообломочные отложения и лёссовые породы, просадочные явления, высокая сейсмичность (Гиссарская долина); V – Юго-Восточный регион (Памирское поднятие); Va – Западный Памир, эрозионно-денудационный, сильно расчлененный, скалистый рельеф, преимущественно скальные карбонатные, интрузивные и метаморфические породы мезозоя и палеозоя, интенсивная селевая деятельность, оползни, обвалы, высокая сейсмичность; Vб – восточный Памир, плоскогорье, преимущественно скальные терригенно-карбонатные породы мезозоя, ледниковые грубообломочные отложения, многолетняя мерзлота, морозное выветривание. Породы коренной основы. Скальные 1 – интрузивные и эффузивные. 2 – метаморфические; 3 – эффузивно-осадочные; 4 –

терригенно-карбонатные; 5 – полускальные преимущественно молассовые породы; 6 – скальные с подчинёнными пластичными, терригенно-карбонатные породы; 7 – пластичные и полускальные породы; 8 – пластичные породы. Поверхностные отложения; 9 – грубообломочные несвязные породы; 10 – песчаные породы; 11 – глинистые связанные породы подстилаются грубообломочными; 12 – лёссовые породы; 13 – грубообломочные и песчаные породы; 14 – связные породы с грубообломочными; 15 – границы регионов; 16 – границы областей.

Примером этого служит Усойский завал. В зависимости от сейсмичности подавляющая часть этой территории обвалоопасная. Установлено, что при инженерно-геологической оценке Юго-Восточного Таджикистана весьма важен характер коренных пород - приуроченности геодинамических процессов, такие как осыпи, обвалы, оползни к тем или иным породам. Важное значение имеют также тектонические нарушения и сейсмическая опасность некоторых участков данной территории.

Второе - это область высокого плоскогорья, где основным фактором инженерно-геологических условий этой территории является многолетняя и местами вечная мерзлота (35%). Многолетняя мерзлота не характерна в местах развития коренных пород.

В исследовании Е.Н. Сквалецкого (1972) рассматривается широкий спектр современных геологических процессов, включая сейсмичность, оврагообразование, эрозию почв, сели, карст, просадки, суффозию, оползни, обвалы, осыпи, вечную мерзлоту, а также уплотнение и просадки грунтов. Причину возникновения обвалов автор связывает с высокой сейсмичностью горных районов республики. На Памире наибольшие обвалы происходили во время землетрясений, примером чего служит Сарезское землетрясение 1911 года, вследствие которого образовался Усойский завал объемом 2,2 млрд. м<sup>3</sup>. Каменистые осыпи мощностью до нескольких десятков метров наблюдаются у подножия склонов. Развитие оползней установлено в основном в песчано-глинистых толщах меловых, палеогеновых и неогеновых

отложений, а их интенсивность зависит от степени увлажненности той или иной территории. Основным фактором формирования оползней является экспозиция склонов. Причиной оживления оползней являются землетрясения.

Важное значение имеет исследование В.И. Преснухина, В.М. Реймана и А.Б. Маркова (1975), посвящённое классификации оползневых деформаций на территории Таджикистана. В нём выделены пять классов деформаций в зависимости от формы движения пород: течения, скольжения, обрушения, пластическая деформация, а также сложные и переходные формы. Кроме того, по механизму смещения пород авторы выделяют девять типов оползней, включая поверхностные сплывы, оплывины, оползни-потоки, скольжения, скола, среза, сдвига, пластического течения и сложные оползни [39].

По результатам своих исследований В.И. Преснухиным и О.А. Ромовым (1975) установлена связь инженерно-геологических комплексов горных пород с экзогенными геологическими явлениями, где на основе анализа геологического строения и истории геологического развития, состава и свойств горных пород выделены формации коренных пород и отложения поверхностного типа. На их основе выделены инженерно-геологические группы горных пород и возможности в них возникновения современных инженерно-геологических процессов.

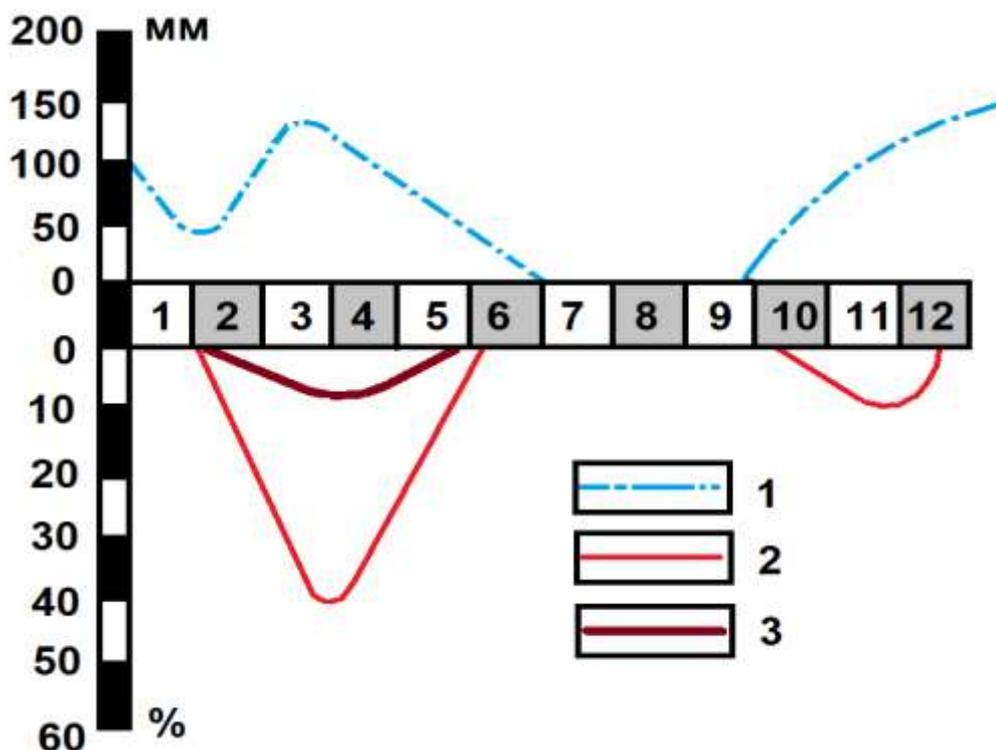
На территории Таджикистана установлена прямая зависимость развития оползней от климатических условий [38]. Это прежде всего обуславливает активность оползней в зависимости от интенсивности атмосферных осадков. Особого внимания заслуживает закономерность сезонного возникновения оползней, где установлена связь времени формирования оползней с режимом подземных вод и характером распределения атмосферных осадков (рис. 1.5).

Как видно из графика (рис. 1.5), наблюдается прямая зависимость интенсивности развития оползней от климатических условий.

В работе также обоснована роль развития оползней от неотектонических движений и их зависимость от сейсмической активности районов.

Большой практический интерес представляет изучение влияния крутизны склонов на развитие оползней [38,8,10,11,12]. Наряду с определением угла наклона склона, при исследовании крутизны склона определяются история формирования и распределение напряжений на участках склонов, а также типы оползневых смещений. Установлено, что развитие оползней в Таджикистане происходит на склонах с крутизной 30-45°. В процентном отношении 85% оползней на Памире приурочены к крутизне 30-35°, а 9% к крутизне более 45°.

В.И. Преснухиным (1975) также детально изучена роль сейсмичности при формировании оползневых явлений. Примером этого служит смещение масс горных пород при Каратагском -1907г., Сарезском-1911г., Файзабадском-1943г., и Хаитском- 1949г. землетрясениях.



**Рисунок 1.5** - График интенсивности формирования оползней по месяцам в % к годовому количеству осадков [39]

1- атмосферные осадки, 2- поверхностные оползни, 3-глубокие оползни.

В 1976 году вышла в свет работа Преснухина В.И. «Оползни Таджикистана», где даны региональная инженерно-геологическая оценка и прогноз устойчивости склонов и классификация оползней и обвалов Таджикистана. Установлена зависимость устойчивости склонов от состава, состояния и свойств горных пород. При изучении инженерно-геологических свойств горных пород в зависимости от их сложения оценена устойчивость склонов. Весьма важное значение имеет состав горных пород, где для связных рыхлых пород, таких, как суглинки, супеси и глины, определяются гранулометрический состав, влажность, плотность, пористость, объемная масса, пластичность, набухание, сопротивление к сдвигу, коэффициент фильтрации и т.п. Для несвязных рыхлых пород установлены гранулометрический состав, объемная масса, плотность, пористость, коэффициент фильтрации, форма обломков и т.п. Исследование минералогического и петрографического состава, структурно-текстурных свойств, объемной массы, плотности, пористости, водонасыщенности, упругости и т.п. рекомендовано для горных пород с жесткими связями. Установлено, что гравитационные смещения являются основным показателем устойчивости склонов. Районирование слабой, умеренной, сильной и очень сильной пораженности устанавливается по степени активности и интенсивности гравитационных смещений. Большое внимание также уделено форме движения пород.

### **Выводы по первой главе**

История геологической изученности исследуемой территории начинается еще с 1883 года, где проводились исследования по орографическому положению Памира. В последующие годы выдвинута идея о дугообразной форме хребтов Средней Азии. Установлена связь Памира с Тянь-Шанем. Большой вклад в изучение Памира сделан Советско-Германской экспедицией.

Основной этап геологическом изучении Памира начался с 1930 и продолжался в 1950 годы. Проводились исследования по выяснению геологического строения и тектонике и были составлены геологические карты.

После 1950г. до ныне начались широкомасштабные геологические работы, непосредственно касающиеся стратиграфии, палеонтологии, магматизма, тектоники, и ряд других работ. Вышли в свет монографические научные работы, непосредственно касающиеся различных вопросов геологии Таджикистана, в том числе Памира. В этот период проводились также всесторонне исследования по гидрогеологии и инженерной геологии. Составлены геологические, тектонические, инженерно-геологические и ряд других карт, имеющих большое научное и практическое значение.

## ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ

Геологическое изучение Памира, в том числе юго-западной его части, берет начало с 1885 (Д.Л. Иванов), продолжалось в 1916-1932 (Д.В. Наливкин) годы. Последовательно с 1932 по 1936 гг. работы по изучению метаморфических толщ проводились исследователями Таджикско-Памирской экспедиции Академии наук СССР. Исследованием кристаллических массивов долины реки Гунт занимался В.А. Наливкин (1932-1934), где метаморфизм кристаллических пород связывал с внедрением интрузивных образований. Расчленение метаморфических толщ территории впервые произведено С.И. Клунниковым (1936). Этим вопросом занимались также А.П. Недзвецкий (1935), И.Г. Баранов, В.С. Глазунов (1937), Б.П. Бархатов, П.И. Никитич (1941), П.И. Никитич, Н.А. Хорев (1942). В.А. Маслениковым и М.И. Рабкиным (1948-1949) разработана обобщённая схема расчленения кристаллической серии, где метаморфические толщи долин рек Гунта и Аличура они объединили в аличурскую серию. Тектоническим районированием Памира в разные годы занимался Б.П. Бархатов (с 1953 по 1963). Обобщающая работа по вопросам тектоники, стратиграфии, петрографии кристаллической серии и магматизму выполнена В.А. Маслениковым (1955). Большой интерес представляют работы Памирской геологоразведочной экспедиции (с 1953). При проведении государственной геологической съёмки масштаба 1:200 000 выделен ряд свит (1957-1958). Данные по стратиграфии, тектонике и магматизму Памира обобщены в книге «Геология СССР» тома XXIV (1959). Начиная с 1956 по 1970, В.И. Дроновым, Э.Я. Левеном, Б.К. Кушлиным, А.М. Месхи, В.И. Будановым, Н.А. Хоревым, А.Г. Давыдченко, С.И. Харьковым, Г.В. Кузнецовым, В.П. Булиным, И.А. Гусевым и рядом других исследователей проводились масштабные поисково-съёмочные и тематические геологические работы. В 1963 вышла в свет монография Б.А.Бархатова «Тектоника Памира», где дана схема тектонического районирования Памира.

Ниже будут даны сведения о стратиграфии, тектонике, магматизму и геоморфологии долины р. Гунт по материалам вышеперечисленных исследователей.

## 2.1. Стратиграфия

Архей-протерозойские (?) образования. В пределах исследуемой территории образования этой группы представлены даршайской (Ar-Pt)? dr и друмдаринской (Ar-Pt)? dd свит ваханской серии. Также выделена друмдаринская свита ваханской серии верхнего архея Ar<sub>2</sub>? dd. Даршайская свита имеет широкое распространение по долине реки Гунт (рис. 2.1) и представлена гнейсами биотитового, биотит-роговообманкового и роговообманкового-биотитового состава.



**Рисунок 2.1.** - Гнейсы даршайской (Ar-Pt)? dr свиты ваханской серии и средне-четвертичные отложения западно - памирского (Q<sub>2</sub>zp) комплекса (левый борт долины р. Гунт)

Встречаются и гранат-биотитовые гнейсы серого и тёмно-серого цвета, и мигматиты. Мигматизация имеет свое развитие в гнейсах в виде тонких полос мощностью 1-4мм, сложенных из чередующихся полос биотитов, кварца и полевого шпата. Мощность даршайской свиты составляет 800-

1200м. На исследуемой территории друмдаринская свита мощностью 300-400 м в основном развита на юго-восточном склоне Шугнанского хребта и представлена мигматитизированными биотитовыми гнейсами. Мигматитизированные гнейсы состоят из плагиоклаза, кварца, биотита, граната и др. Друмдаринская свита ваханской серии верхнего архея представлена в основном биотитовыми, биотит-роговообманковыми гнейсами с прослоями мраморов.

Нижнепротерозойские образования района исследования представлены Аличурской серией, которая расчленена на звордаринскую ( $Pt_1?zv$ ), лянгарскую ( $Pt_1?ln$ ), марджанайскую ( $Pt_1?mr$ ) и рамаифскую ( $Pt_1?rm$ ) свиты. Звордаринская свита мощностью 1500-2000м сложена катаклазированными и лейкократовыми мигматитами. Лянгарская свита сложена в основном крупнозернистыми кварцитами, кристаллическими биотитовыми сланцами и мигматизированными гнейсами. Мощность свиты составляет 1800-2000м. Марджанайская свита мощностью 500 м состоит из мраморов, сланцев и гнейсов. Мрамора светло-серые и милонитизированные. Породы рамаифской свиты представлены слюдяными, биотитовыми, хлорит-серицитовыми сланцами и гранодиорито-гнейсами. Мощность этой свиты составляет 1500м.

Каменноугольные образования в исследуемой территории представлены в основном филлитовыми сланцами, тёмными и светлыми кварцитами и серыми, белыми мраморами, мраморизованными известняками немацдаринской свиты ( $C? nm$ ). Мощность свиты составляет свыше 600 м.

Осадочные образования каменноугольной системы и нижнего отдела перми ( $C+P_1$ ) мощностью до 1500 м представлены песчаниками, алевролитами и сланцами.

Пермская система представлена объединёнными породами карачатырского и улукского горизонтов ( $P1kr+u$ ) с общей мощностью от 350 до 500 м. Эти породы отличаются разнообразным составом, включая чёрные филлитовидные и кварц-слюдяные сланцы, серые грубослоистые кварцитовидные песчаники и полосчатые мраморы. Породы этого возраста

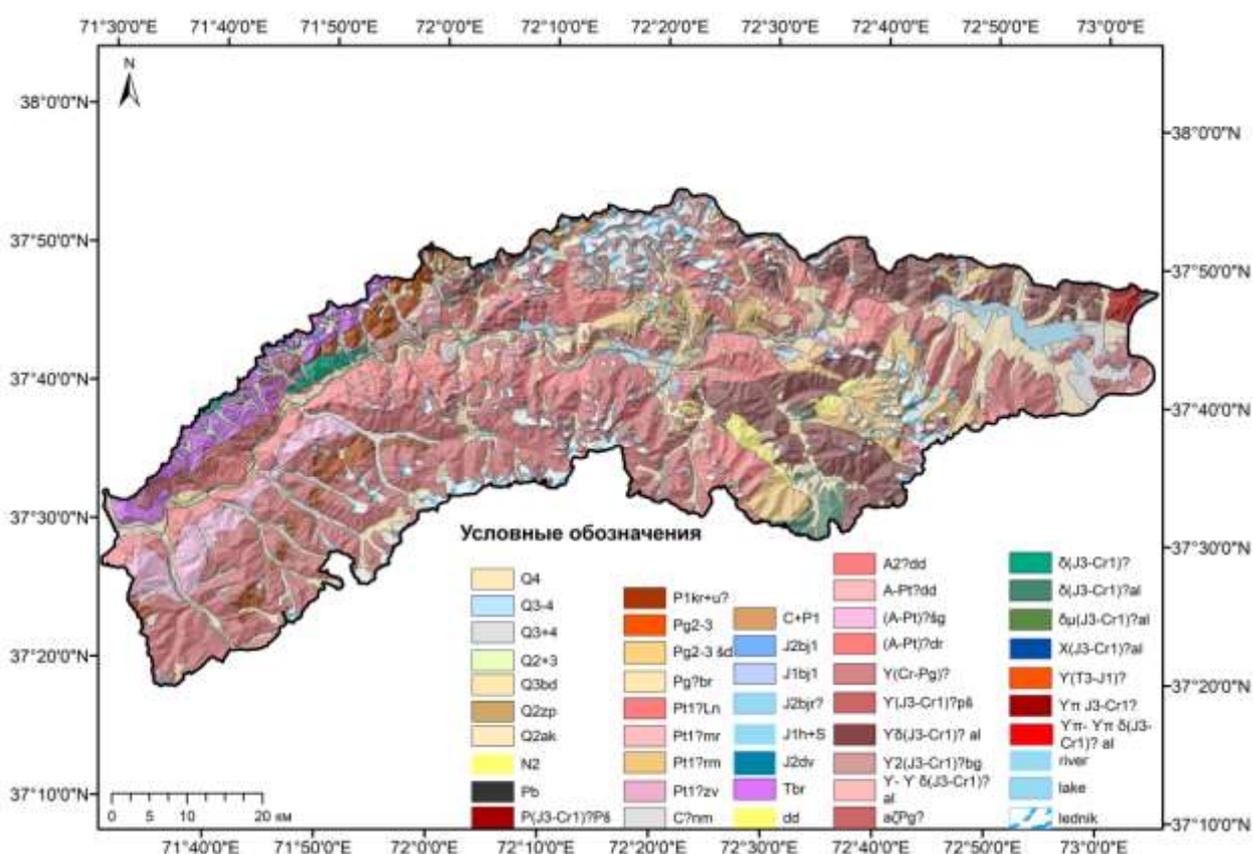
вблизи контактов с гранитоидами переходят в двуслюдяные гнейсы и роговики.

Триасовые образования на площади изучения представлены бардаринской свитой (Tbr), видимая мощность которой составляет 2000-2500 м. Свита сложена кварцитами, кварцитовидными песчаниками и метаморфическими сланцами. В строении свиты также принимают участие роговики, биотитовые, слюдяные и инъекционные гнейсы. Мощность кварцитов и кварцитовидных песчаников изменчива. Она изменяется от 5 до 80м. Мощность темно-серых сланцев достигает 6м и более. Мощность биотитовых гнейсов, которые переслаиваются с кварцитами, кварцитовидными песчаниками с кристаллическими сланцами, доходит до 15м. Инъекционные гнейсы мощностью до 10-30м размещены в основном вблизи интрузивных массивов.

Юрская система представлена геттангским и синемюрским ярусами ( $J_1h+s$ ), байосским ярусом нижнего подяруса ( $J_2bj_1$ ) и нерасчлененными отложениями девлехской свиты ( $J? dv$ ). Геттангский и синемюрский ярусы характеризуются чередованием известняков, песчаников и конгломератов, в разрезах которых местами встречаются прослои андезитов, дацитов и туфов. Породы байосского яруса сложены песчаниками, алевролитами, сланцами и известняками, мощность которых в отдельных участках достигает 360 м. Девлехская свита, мощностью более 700 м, сложена преимущественно темно-серыми массивными известняками и черными ороговикованными сланцами. Верхняя часть свиты сложена скарнированными и мраморизованными известняками. Геологическая карта долины реки Гунт, составленная нами на основе геологических карт СССР, представлена на рисунке 2.2.

На изучаемой территории палеогеновые образования представлены бартангской свитой ( $Pg? br$ ) и шахдаринской толщей ( $Pg_{2-3sd}$ ). Бартангская свита видимой мощностью 2000-2500м, включает порфириды, альбитофиры, кварцевые порфиры, туфы, туфопесчаники, туфосланцы и туфоконгломераты, которые подвергались биотитизации, хлоритизации, серицитизации и карбонатизации. Эоцен–олигоценые образования шахдаринской толщи,

перекрывая древнюю кору выветривания, сложены брекчиями и валунами. Основание толщи состоит из глыбовых брекчий, в составе которых встречаются примеси валунов. В верхней части толщи чередуются песчано-дресвяные валунники и красно-бурые гравийно-галечниковые валунники, в составе которых присутствуют обломки гнейсо-гранитов. Мощность толщи доходит до 300м.



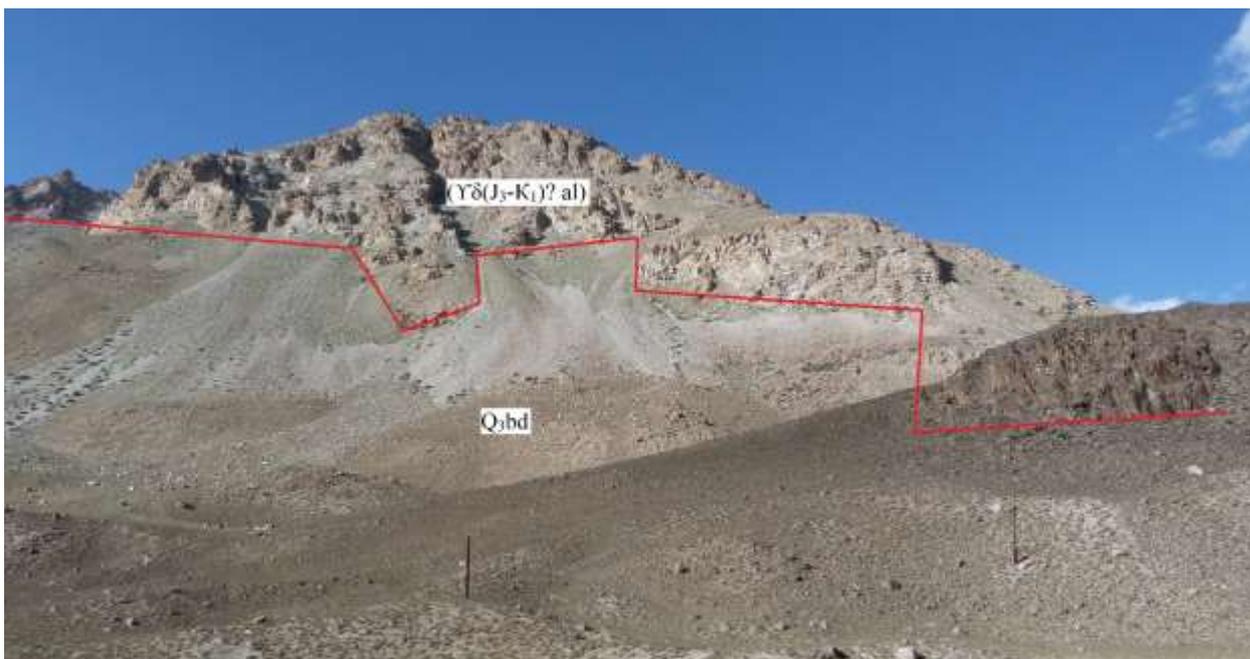
**Рисунок 2.2.** - Геологическая карта долины реки Гунт ( Рахимбекова М.Р., 2024. На основе геологических карт СССР масштаба 1:200000)

Неогеновая система представлена континентальными отложениями миоцена дузахдаринской толщи ( $N_1?$  dd), образует склоновые и русловые фации. Склоновые образования состоят из зеленовато-серых крупно-, средне- и мелкообломочных брекчий, а в верхней части разреза залегает последовательность чередующихся горизонтов мелко- и среднегалечных конгломератов зеленовато-серого оттенка, а также буро-малиновых брекчий, среди которых встречаются прослой гравелитов и песчаников. Русловые

фации сложены преимущественно конгломератами с мелкими и средними галечниками, перемежающимися прослоями гравелитов, песков и конгломерато-брекчий. Мощность дузахдаринской толщи составляет свыше 215 м.

Плиоценовые ( $N_2$ ) образования неогена мощностью 665 м, представлены брекчиями, валунами, конгломератами, песчаниками, глинами и мергелями. В отдельных участках разреза плиоценовые отложения представлены чередованием горизонтов мелко- и среднеобломочных брекчий, конгломерато-брекчий и конгломератов, в составе которых встречаются прослой гравелитов, песчаников, а местами и глин. Отложения четвертичной системы в пределах долины реки Гунт имеют широкое распространение. Среднечетвертичные отложения представлены западно-памирским ( $Q_{2zp}$ ) и аксуйским ( $Q_{2ak}$ ) комплексами. Западно-памирский комплекс сложен ледниковыми образованиями, слабо холмистыми, сильно задернованными и цементированными моренами валунного и песчано-глинистого состава, и аллювиальными отложениями, состоящими из хорошо окатанных галечников и песков. Местами мощность песчано-галечных отложений достигает 15 м. Аксуйский комплекс сложен валунно-галечниковыми отложениями. Местами встречаются аллювиальные галечники и пески с прослоями глин. Средне- и верхнечетвертичные образования ( $Q_{2+3}$ ) образуют галечники, гравийно-галечниковые валуны, в которых наблюдаются прослой глин и песков. Высота аккумулятивных террас, сложенных верхнечетвертичными отложениями, местами доходит до 40 м. Из верхнечетвертичных отложений в районе исследования встречаются породы бадахшанского комплекса ( $Q_{3bd}$ ), образуя древние конусы выноса и оползневые шлейфы в устьях боковых притоков, склоновые оползни и каменные глетчеры. Отложения бадахшанского комплекса также слагают завалы и аккумулятивные террасы рек и притоков (рис. 2.3). Верхнечетвертичные современные отложения ( $Q_{3+4}$ ) в основном представлены галечниками, песками, глинами, щебнями, валунами, суглинками и склоновыми брекчиями. Они образуют делювиально-

коллювиальные отложения, слагающие сцементированные конуса осыпей, имеющих наклон к руслу рек. В верховьях речных долин развиты ледниковые отложения этого возраста, которые сложены грубообломочным и цементированным материалом. Отложения этого возраста также образуют гравитационные образования, такие, как оползни, оплывины и каменные глетчеры.



**Рисунок 2.3.** - Верхнечетвертичные отложения бадахшанского комплекса и граниты и гранодиориты аличурского комплекса

### **Интрузивные образования**

*Позднетриасовый – раннеюрский (?) интрузивный комплекс  $Y$  ( $T_3$ - $J_1$ )?*

Породы этого комплекса представлены гранитами, гнейсо-гранитами и гранодиоритами. Граниты в основном имеют незначительное распространение. Занимают центральные части массивов и постепенно переходят в гнейсо-граниты. Гнейсо-граниты имеют светло-серый цвет, текстура гнейсовидная и порфировидная, структура порфиробластическая, милониитовая и гранобластовая. Состоят из кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклаза, биотита и мусковита, а из аксессуарных минералов

встречаются циркон, апатит, сфен и монацит. Гранитоиды подвергались процессам катаклаза и перекристаллизации, имеют бластогранитовые, порфиробластовые и катакластические структуры.

*Позднеюрские – раннемеловые (?) интрузии.* К ним относятся гранитоиды аличурского, башгумбезского и памиро-шугнанского комплексов.

Диориты, кварцевые диориты и гранодиориты  $\delta(J_3-K_1)?$  Южнодебастинского массива расположены на правом борту реки Гунт. Диориты средне-, мелкозернистые, цвет темно-серый, структура гипидиоморфнозернистая, состоят из плагиоклазов, биотита, роговой обманки и кварца. В гранитах присутствуют ксенолиты диоритов. Кварцевые диориты в основном развиты в периферийной части массива и состоят из плагиоклаза, роговой обманки, биотита, калиевого полевого шпата и кварца.

Гранитоиды аличурского комплекса в пределах исследуемой территории имеют широкое развитие. Граниты и гранодиориты аличурского типа ( $\Upsilon-\Upsilon\delta(J_3-K_1)?al$ ) по правому борту долины реки Гунт (рис. 2.4) формируют пастообразные тела и образуют две основные фазы: граниты, гнейсо-граниты, гранодиориты, гнейсо-гранодиориты, плагиограниты, гнейсо-плагиограниты и мелкозернистые микроклиновые граниты. Структура гранитов гипидиоморфнозернистая; состоят из плагиоклаза, калиевого полевого шпата, кварца и биотита. Из вторичных минералов присутствуют хлорит, серицит, мусковит, эпидот, а из акцессорных циркон, апатит, монацит, сфен, рутил и ортит.



**Рисунок 2.4.** - Граниты и гранодиориты аличурского типа (правый борт долины реки Гунт)

Гранодиориты серые, среднезернистые, структура гипидиоморфнозернистая и порфировидная. Породообразующие минералы - плагиоклаз, калиевый полевой шпат, кварц и биотит. Интенсивное огнейсование наблюдаются у плагиогранитов и гнейсо-плагиогранитов, имеющих аналогичный состав с гранитами. Биотитовые граниты и гранодиориты аличурского комплекса ( $\Upsilon\delta(J_3-K_1)$ ? al) образуют основную часть интрузивных массивов аличурского комплекса. Породы массивные, местами гнейсовидные, среднезернистые, светло - серые, имеют гипидиоморфнозернистую и монцонитовую структуру. Состоят из плагиоклаза, калиевого полевого шпата, кварца, биотита, роговой обманки и пироксена. Башгумбезский комплекс ( $\Upsilon_2(J_3-K_1)$ ?bg) сложен биотитовыми порфировидными гранитами. Установлен ряд фациальных разновидностей интрузивных массивов: лейкократовые, крупнозернистые граниты; мезократовые, крупнозернистые, порфировидные граниты; мезократовые,

среднезернистые граниты и мелкозернистые граниты. Биотитовые и двуслюдяные граниты памирско–шугнанского комплекса ( $\Upsilon(J_3-K_1)?ps$ ) между ваханской и аличурской сериями образуют межформационный интрузив. Граниты мелкозернистые, местами крупнозернистые, светло–серые и имеют массивную текстуру. Структура гранитов бластическая, встречается и гипидиоморфнозернистая структура. Состоят из плагиоклаза, калиевого полевого шпата, кварца, биотита, мусковита, монацита, циркона, апатита, граната, сфена, серицита и хлорита.

*Меловой – палеогеновый (?) интрузивный комплекс ( $\Upsilon(K-Pg)?$ ).* Массивы этого типа образуют мелкозернистые биотитовые порфиробластические граниты и двуслюдяные биотитовые среднезернистые и порфировидные граниты, которые в зависимости от гибридизации и автометаморфизма в разных массивах по составу отличаются. Породообразующие минералы гранитов - плагиоклаз, калиевый полевой шпата, кварц и биотит, а аксессуарные минералы - циркон, апатит и сфен.

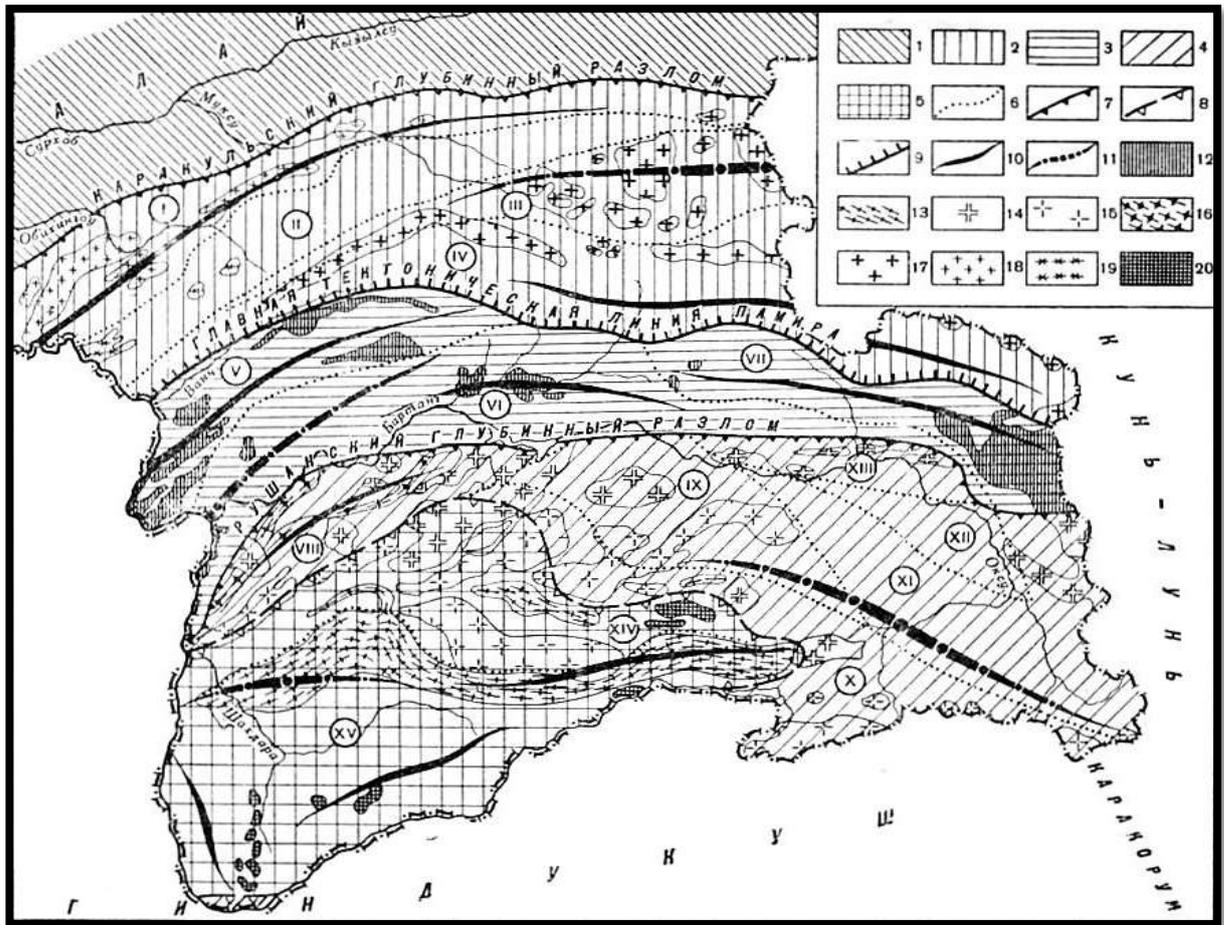
*Палеогеновый (?) комплекс малых интрузий.* Они образуют андезитодациты, граносиенит-порфиры и гранит – порфиры ( $\alpha\xi Pg?$ ). Андезитодациты характеризуются порфировидной текстурой, цвет серо-зеленый, структура среднезернистая. Состоят из плагиоклаза и биотита. Граносиенит-порфиры и гранит–порфиры также имеют порфировидную структуру, породообразующие минералы кварц и калиевый полевой шпат, цвет у них белый, фиолетовый и бледно-красный.

## 2.2. Тектоника

Долина реки Гунт, согласно схеме тектонического районирования Бархатова П.Б. (1968), расположена в Юго-Западной тектонической зоне (рис. 2.5), в пределах которой выделены две подзоны: Шахдаринская и Гунт-Аличурская [6].

*Шахдаринская подзона* состоит из пород ваханской серии, структурами которой являются Шугнанская синклиналь и Гунтская антиклиналь. Ось Шугнанской антиклинали в виде пологой дуги выгнута на север, а ширина ядра с пологим залеганием пород составляет 6 км. Крылья складки протянуты на 40 км, северное крыло более крутое -  $30-50^{\circ}$ , а южное пологое -  $30-50^{\circ}$ . Ось Гунтской антиклинали протянута по левому борту реки Гунта, и она асимметрична. Северное крыло антиклинали круче южного. Разрывные нарушения Шахдаринской подзоны имеют пологопадающую и крутопадающую структуры. Элементы пологопадающих разрывных нарушений хорошо выражены в пологих зонах сланцеватых милонитов и катаклазов по гнейсам и гранитам памиро-шугнанского комплекса. Мощностью 50-250м пологопадающие разрывные структуры в основном развиты вдоль границ Шахдары. Крутопадающие разрывные нарушения сопровождаются зонами дробления пород, имеют меридиональную и широтную ориентировку.

*Гунт – Аличурская подзона*, занимая бассейны рек Тогузбулака и Гунт – Аличура, представлена двумя системами складок – опрокинутых и лежащих. Опрокинутые складка ясно выраженные и имеют дугообразные конфигурации. Лежачие складки имеют перпендикулярный характер к простиранию границ и структур Шахдаринской подзоны.



**Рисунок 2.5.** - Схематическая тектоническая карта Памира [6]

1 – Памиро-Кунь-Луньский передовой прогиб; 2- зона Северного Памира с подзонами: I – Калай-Хумб-Сауксайской, II – Курговатской, III – Каракульской, IV -Дарваз-Сарыкольской; 3- зона Центрального Памира с подзонами: V – Ванч-Язгулемской; VI – Сарезско-Пшартской; VII – Музкол-Ранкульской; 4 – зона Юго-Восточного Памира с подзонами: VIII – Рушанской; IX – Базардаринской; X – Гурумдинской; XI – Истыкской; XII – Тохтамышской; XIII – Пшартской и Мургабской; 5 – зона Юго-Западного Памира с подзонами: XIV – Гунтской и XV – Ваханской; 6 – границы подзон; 7 – границы зон; 8 – условная граница зоны Юго-Западного Памира; 9 – граница сооружений Кунь-Луны и Каракорума; 10 – антиклинали; 11 – синклинали. Гранитоиды: 12 – К2 – Р; 13 – I3 – K1 (памирско-шугнанный тип); 14 – I3 – K1 (башгумбезский тип); 15 – I3- K1 (аличурский тип); 16 – II?; 17 – P2 – T; 18 – C2; 19 – Pr2?; 20 – αC?

К юго-западу от Южно-Аличурского разлома в мраморах маржанайской свиты опрокинутые складки хорошо выражены в виде синклинали северо-восточного простирания, с углами падения крыльев  $35^{\circ}$ . Аналогичная складка наблюдается и к северу от Гунтского и Южно-Аличурского разломов (Немацдаринская синклиналь), имеющая широтное направление по долине реки Гунт. Угол падения северо-восточного крыла складки составляет  $50-60^{\circ}$ , а юго-восточного –  $30-40^{\circ}$ . К северу синклинали мигматиты претерпели тектоническое наращение, в результате которого образовалась Звордаринская антиклиналь. Среди мраморов и кристаллических сланцев крупная опрокинутая на север антиклинальная складка занимает правый борт реки Шадзуддара. Азимут падения крыла складки северо-восточный, а угол падения от  $30$  до  $85^{\circ}$ . В памиро-шугнанских гнейсо-гранитах вблизи озера Яшилькуль установлена асимметричная антиклиналь северо-западного направления с пологим залеганием  $20-30^{\circ}$  северо-восточного крыла и  $30-50^{\circ}$  противоположного крыла.

Лежачие складчатые нарушения в пределах исследуемой территории имеют также широкое распространение. К ним относится Южно-Аличурская антиклиналь, имеющая восток-северо-восточное направление. Крылья у антиклинали пологие,  $30^{\circ}$ . Ядро складки сложено памиро-шугнанскими гнейсо-гранитами. Харгушская синклиналь с пологими крыльями,  $30-35^{\circ}$ , расположенная параллельно Южно-Аличурской антиклинали, сложена гранито-гнейсами рамаифской свиты. Бакчигирская антиклиналь шириною от 5 до 10 км занимает левобережье р.Тогузбулак, наклонена на юго-восток ( $40-60^{\circ}$ ). Меридиональная антиклинальная складка, имеющая сложную конфигурацию, установлена в долине р. Шадзуддары. Складка узкая, размах крыльев 300-500м. Синклинальная складка также была установлена в мраморах маржанайской свиты (Бархатов, 1943ф), южное крыло которой опрокинуто на юго-восток под углом  $40-50^{\circ}$ . Другая синклинальная складка расположена к северо-западу от Лянгарского разлома, осевая линия которого

выгнута к северо-западному направлению. Ядро складки сложено гранито-гнейсами рамаифской свиты.

Пологопадающие и крутопадающие разрывные нарушения в пределах подзоны пользуются широким распространением. Южно-Памирский разлом, протягивающийся по южному склону Аличурского хребта, к югу от оз. Турумтайкуль срезается Южно-Аличурским разломом. В нижней части р. Дузахдары он разделяется на две линии, первая из которых прослеживается вдоль реки Гунт, образуя Гунтский надвиг, а вторая образует субширотный сброс, пересекая Дузахдару, Токузбулак, доходя до Актайляка. Яшилькульский разрыв (надвиг), занимает правый борт р. Гунт. Сопровождающийся зоной катаклаза сланцев протягивается из бассейна р. Шадзуддары до Булункуля. Скол скольжения висячего крыла надвига по южному берегу оз. Яшилькуль в зоне катаклаза по памиро-шугнанскому комплексу имеет северо-восточное простирание.

Крутопадающие разрывные нарушения сопровождаются зонами дробления и отрицательными формами рельефа. К ним относятся Звордаринский с амплитудой смещения 10 км, Чапдаринский, рассекающий границу между Шахдаринской и Гунт-Аличурской подзон с амплитудой движений 2-3 км, выпуклообразный Южно-Аличурский с амплитудой сброса 1-1,5 км, Тагаркатинский с амплитудой 1,5-2 км и Лянгарский, амплитуда которого достигает 1-1,5 км.

В пределах исследуемой территории наблюдаются также группирующиеся мелкие разрывные нарушения, которые местами образуют самостоятельные сгущения.

### **2.3. Геоморфология**

Долина р. Гунт характеризуется своеобразным рельефом, в пределах которой денудационный и аккумулятивный типы рельефа образуют два морфологических подтипа.

Первый подтип, который свойствен денудационным рельефам, образует пологие склоны и днища древних долин, глубоко расчлененный эрозионный рельеф и экзарационный рельеф.

В долине р. Гунт весьма развиты пологие склоны и днища древних долин, низкие отметки которых наблюдаются в низовьях реки Дузахдары высотой 3500м, к западу и востоку они достигают высоты 4500 м, а на севере на водоразделе Шугнанского хребта их фрагменты обнаружены на высоте 5500м. Отложения этого типа рельефа имеют эоцен-олигоценый возраст. Глубоко расчлененный эрозионный рельеф свойствен для р. Гунт и его притоков, превышения высоты которого составляют 1500-2000м. Возраст этого типа рельефа датируется как послеолигоценый. Экзарационный рельеф занимает водораздельные части гор и отрогов. В этом регионе снеговая линия в северном склоне Шугнанского хребта занимает высоту 4500-4900м, а на южном - 4700-5000м. Этот тип рельефа в основном развивался в четвертичное время.

С аккумулятивным рельефом связан второй морфологический подтип – это аллювиальный рельеф долин, пролювиальный рельеф конусов выноса, моренно-оползневой рельеф и рельеф склонов с аккумулятивным покровом. Аллювиальный рельеф занимает участки главных долин, где над поймами рек образует до шести террас, имеющих широкие поверхности, местами до 0,5 км. Широким распространением пользуется пролювиальный рельеф конусов выноса. В верхнечетвертичных и современных отложениях размер конусов выноса достигает 2х2 км. Они наблюдаются в устьях притоков первого, которые подрезаны водотоками рек и их потоками до глубины 10-15 км, и второго порядка, находящихся в процессе формирования. Для конусов выносов характерно формирование оползней, которые осложняют их структуру. Широким распространением пользуется моренно-оползневой рельеф в долинах, которые подразделены на береговые и конечные морены. Береговые морены в виде валов с крутыми (40-45<sup>0</sup>) склонами наблюдаются вдоль коренных склонов верховьев долин. Конечные морены формируются

при соединении береговых валов конца языка ледников. В устьях притоков долин встречаются и скопления конусообразных холмов, которые связаны с оползанием аккумулятивных отложений покрова склонов. Оползни имеют расплывчатые контуры. Иногда встречаются оползни-завалы, состоящие из продуктов аккумулятивного покрова.

В долине р. Гунт широким развитием пользуется рельеф склонов с аккумулятивным покровом, которые представлены осыпными шлейфами (рис. 2.6.) и крупноглыбовыми коллювиальными отложениями. Осыпные шлейфы подвергались переработке в результате эрозии, происходившей в четвертичное время.



**Рисунок 2.6.** - Осыпные шлейфы в склонах и подножиях гор долины реки Гунт

#### **2.4. Сейсмичность исследуемой территории**

Первые сведения о землетрясениях в Таджикистане встречаются в работах И.В. Мушкетова и А.П. Орлова (1893). На Памире Шпилько (1914), Голицыным (1915) и Преображенским (1920) было исследовано и изучено

Сарезское землетрясение. Сейсмическое районирование Средней Азии было проведено Д.И. Мушкетовым (1933). Районирование составлялось на основе ряда зарегистрированных землетрясений.

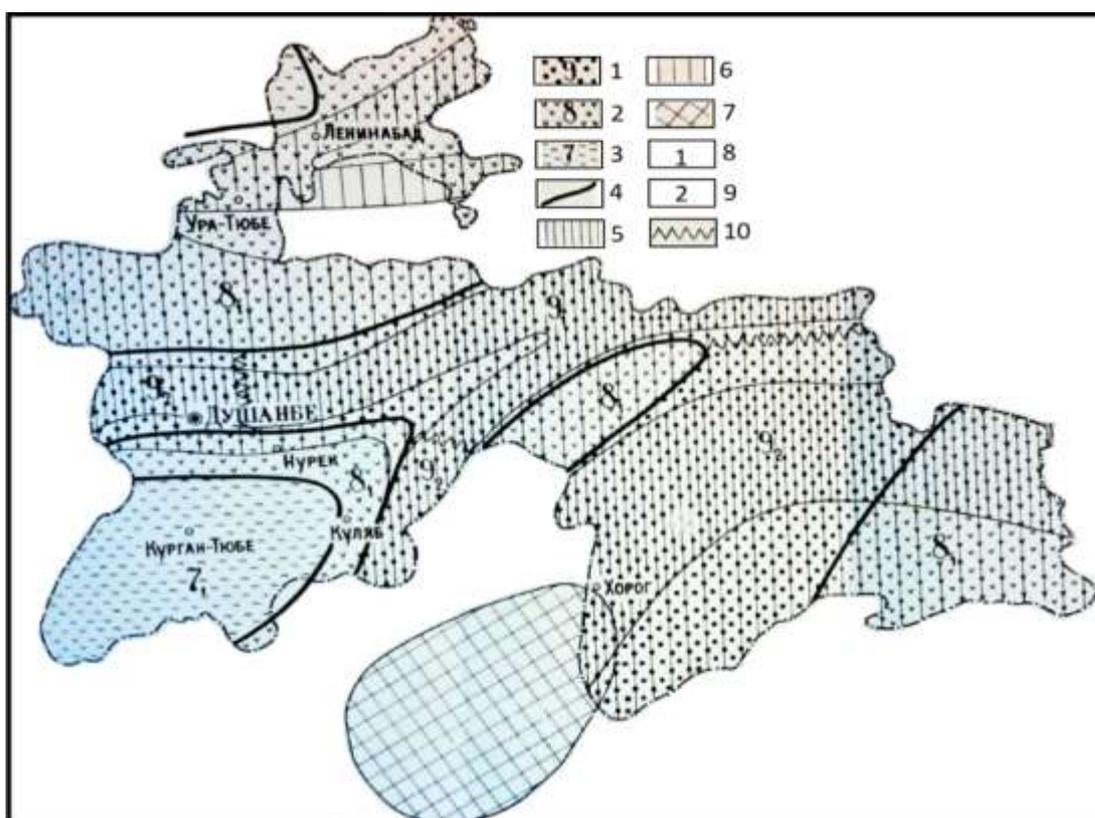
В 1947 И.Е. Губиным выделены тектонические сейсмогенные зоны Таджикистана. Большой интерес представляет работа И.Е. Губина (1960), где дана подробная характеристика землетрясений во внутренней зоне Памира Куэнь-Луня, Язгулем-Таш-Курганской и Памиро-Каракорумской зонах. В этой работе также дана классификация землетрясений по их связям с различными геологическими структурами и миграции землетрясений, и условиях развития геологических структур. И.Е. Губиным (1960) впервые составлена карта сейсмогенных зон северо-запада Памира, где выделены Каракульско-Момукская, вдоль Каракульского разлома, Северо-Памирская, охватывающая Северный Памир, и Язгулем-Таш-Курганская, охватывающая Центральный Памир, сейсмогенные зоны. В 1976 И.Е. Губиным составлена новая карта сейсмогенных зон территории Памира, где выделены Каракульско-Момукская и Центрально-Памирская зоны [15].

В своей работе О.В. Соболев и О.А. Кучай (1985) на основе обобщения результатов предыдущих работ и анализа данных механизма очагов землетрясений рассмотрели вопрос деформации земной коры для уточнения условий генезиса сильных землетрясений Памира и его сеймотектонической обстановки. Ими выявлено, что земная кора Памира имеет напряженное одноосное горизонтальное сжатие в юг-юго-восточном и север-северо-западном направлениях, и установлена блоковая структура сеймотектонической деформации внутри зон Памира [45].

А.М. Бабаевым, Г.В. Кошлаковым и К.М. Мирзоевым (1978) новая карта сейсмического районирования Таджикистана (рис. 2.7) составлена по повторяемости сильных землетрясений и затуханию балльности с учетом расстояния. Установлено, что наибольший период повторяемости сильных землетрясений (девятибалльных) наблюдаются в сейсмогенных подзонах Юго-Западного Памира. Авторами Северный Памир отнесен к

восьмибалльной зоне, в связи с чем уменьшились зоны девятибалльных землетрясений на Памире [2, 4, 49, 59].

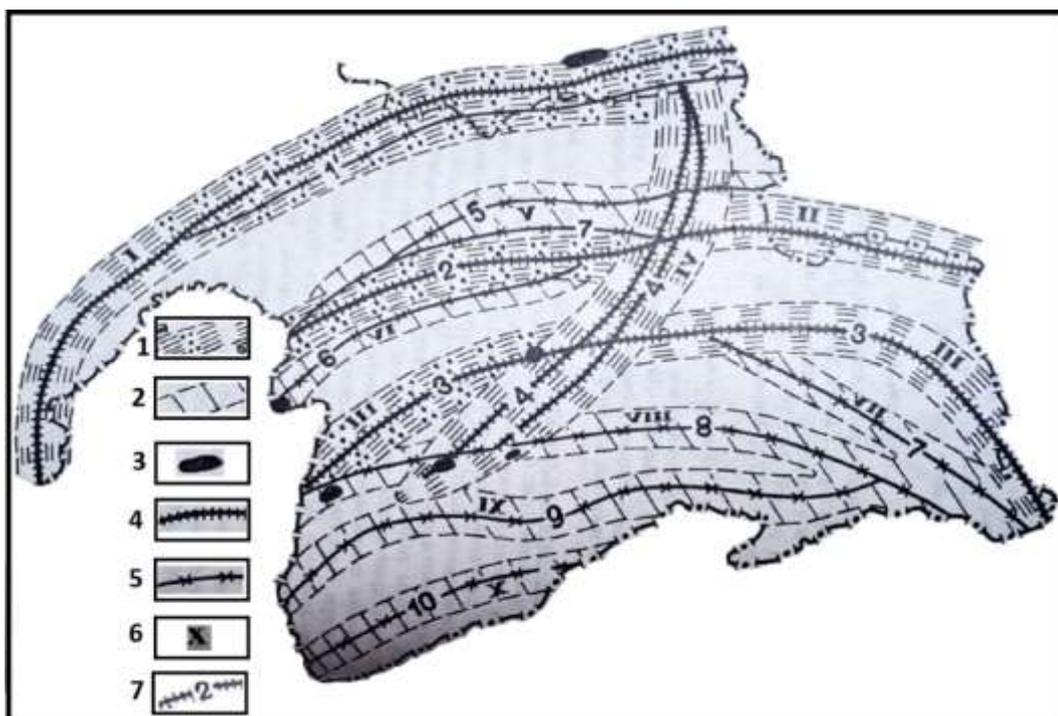
В этой же работе также подробно исследована роль сейсмогенных разломов при составлении карты сейсмического районирования территории Таджикистана. Изучен Дарваз-Каракульский краевой разлом, расположенный в зоне соприкосновения складчатых сооружений Северного Памира и Таджикской депрессии. Дана характеристика тектонических структур Северного и Центрального Памира. Центральнопамирский краевой разлом Куэнь-луньской и Каракорумской складчатых систем претерпел разные периоды своего геосинклинального развития где в альпийское время отделял области, имеющие различные тектонические режимы [5, 6, 17, 19, 110, 148, 150]. В работе также указана роль Бартанг-Пшартского краевого разлома как одного из основных тектонических нарушений Памира.



**Рисунок 2.7.** - Карта сейсмического районирования территории Таджикистана [4]

*1-9 - балльные районы; 2- 8 балльные районы; 3- 7- балльные районы; 4- граница балльности; 5- зоны с магнитудами  $M=7,5-8,6$ ; 6-зоны с магнитудами  $M=6,3-7,4$ ; 7- зона наибольшей плотности подкорových землетрясений; 8- первая категория повторяемости (30-300 лет); 9- вторая категория повторяемости (300-3000 лет); 10-граница категории повторяемости.*

Большой интерес представляет работа Г.Ш. Ачилова, А.М. Бабаева, К.М. Мирзоева и Р.С. Михайловой (1985) о сейсмогенных зонах Памира, где выделены четыре зоны первой – Дарваз-Заалайская, Ванч-Акбайталская, Бартанг-Пшартская, Каракульско-Сарезская и семь зон второй – Южно-Дарвазский, Танымасский, Язгулемский, Истыкский, Гунт-Аличурский, Гармчашминский и Шахдаринский категории. Сейсмогенные зоны выделены на основе геолого-геофизических и сейсмологических данных. Авторами установлено, что в зависимости от проявления тектонических движений и сейсмической активизации территория Памира делится на западную и восточную части. В Северной подзоне Дарваз – Заалайской и Каракуль-Сарезской сейсмогенных зон концентрация эпицентров землетрясений более плотная (рис. 2.8). Одновременно установлено, что сильные землетрясения зафиксированы в зонах крупных разрывных нарушений, а слабые сосредоточены в любых точках сейсмоактивных зон и связываются с процессами складкообразования [3, 36].



**Рисунок 2.8.** - Схема сейсмогенных зон Памира [3]

*1-2 -сейсмогенные зоны; 1-1 категории; а, б -подзоны со значительной (а) и незначительной (б) контрастностью тектонических движений по сейсмогенным разломам; 2-II категории; 3- сейсмогравитационные образования; 4-5 -разломы первой (4) и второй (5) категорий, 6-7 – номера сейсмогенных зон (6) и разломов (7). Зоны первой категории: I– Дарваз-Заалайская, II- Ванч-Акбайталская, III- Бартанг-Пишартская, IV- Каракульско-Сарезская; зоны второй категории: V– Южно-Дарвазская, VI- Танымасская, VII-Язгулемская, VIII - Истыкская, IX - Гунт-Аличурская, X- Гармчаиминская, XI-Шахдаринская.*

### **Выводы по второй главе**

На исследуемой территории присутствуют разнообразные геологические образования, охватывающие широкий временной диапазон от архейских до четвертичных отложений. Выявлены различные свиты и комплексы, отражающие сложные процессы метаморфизма, мигматизации и осадкообразования. Наибольшего внимания заслуживает разнообразие

горных пород таких, как гнейсы, кварциты, сланцы и мраморы, а также изменения в их составе в зависимости от геологического возраста.

Тектоническая структура исследуемой территории представляет собой сложное взаимодействие различных разрывных нарушений и структур, отражающих многократные тектонические процессы, включая как сжатие, так и растяжение земной коры. Выявлены Шахдаринская и Гунт-Аличурская подзоны, каждая из которых характеризуется своими особенностями складчатых и разрывных деформаций.

Результаты многочисленных исследований сейсмичности Памира, подчеркивают высокую активность землетрясений в регионе. Выделены сейсмогенные зоны и проанализированы тектонические структуры, что позволило установить закономерности распространения и интенсивности землетрясений. Сейсмическая активность тесно связана с геологическими и тектоническими процессами. Выделенные зоны сейсмического районирования, такие, как Каракульско-Сарезская и Дарваз-Заалайская, показывают различия в частоте и силе землетрясений, что подтверждает их роль в региональной сейсмической активности.

Геоморфология долины реки Гунт характеризуется разнообразием рельефа, образованного денудационными и аккумулятивными процессами. Денудационные формы в основном пологие склоны и глубоко расчленённый эрозионный рельеф, аккумулятивный рельеф представлен аллювиальными террасами, пролювиальными конусами выноса и моренно-оползневыми образованиями.

### ГЛАВА III. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оползни служат объектом для обучения и для валидации. При этом сперва создаётся модель восприимчивости к возникновению оползней, и после с помощью второй группы оползней осуществляется оценка точности модели. В частности, во многих публикациях рекомендуется использовать 70% оползней для обучения и 30% для валидации. Причём выбор оползней должен быть рандомным. Кроме того, во избежание ошибочного результата, оползни также должны распространяться по всей изучаемой территории [69, 72, 124-126].

Разбиение оползней на две группы обеспечивает нас важнейшей особенностью наших данных - независимостью. Полная независимость модели от оползней для валидации необходима для того, чтобы найти ответ на вопрос: до какой степени модель совпадает с реальностью [68, 71, 104, 105, 108, 128, 130]?

В отличие от индекса поражённости территорий оползнями, который характеризует лишь места существующих оползней и не может показать другие уязвимые площади, восприимчивые к возникновению оползней, кроме уже подверженных оползневому процессу, модель показывает места их будущего возникновения. В связи с этим, наряду с прогнозом актуальность приобретает и точность модели [80, 90, 106, 107, 109, 111].

Оценка работоспособности модели восприимчивости к возникновению оползней обычно делается с применением ROC-анализа. Пока что это единственный способ получения количественных данных о прогностической способности модели и единственный способ обнаружения того, что наша модель удовлетворяет предъявляемым требованиям [22, 29, 31, 107, 147].

В литературе кросс-табуляцию называют по-разному, в одних случаях - перекрестной таблицей, а в других - таблицей сопряженности. Независимо от этого, она исполняет одну функцию: помогает анализировать категориальные и численные данные.

Перекрестные таблицы делают анализ одной или нескольких переменных более детализованным. Исключение кросс-табуляции при анализе данных может привести к непараллельным интерпретациям информации.

Кросс-табуляция является идеальным способом выявления закономерностей оползневых явлений, которые визуально невозможно определить.

Любое явление — это результат какого-то процесса, который происходит в определённых условиях, и оползневые явления в этом плане не исключение.

Независимо от фактора, активизирующего оползневой процесс (сейсмическое воздействие, атмосферные осадки и деятельность человека), он формируется в конкретных морфометрических, геологических и климатических условиях (рис. 3.1).

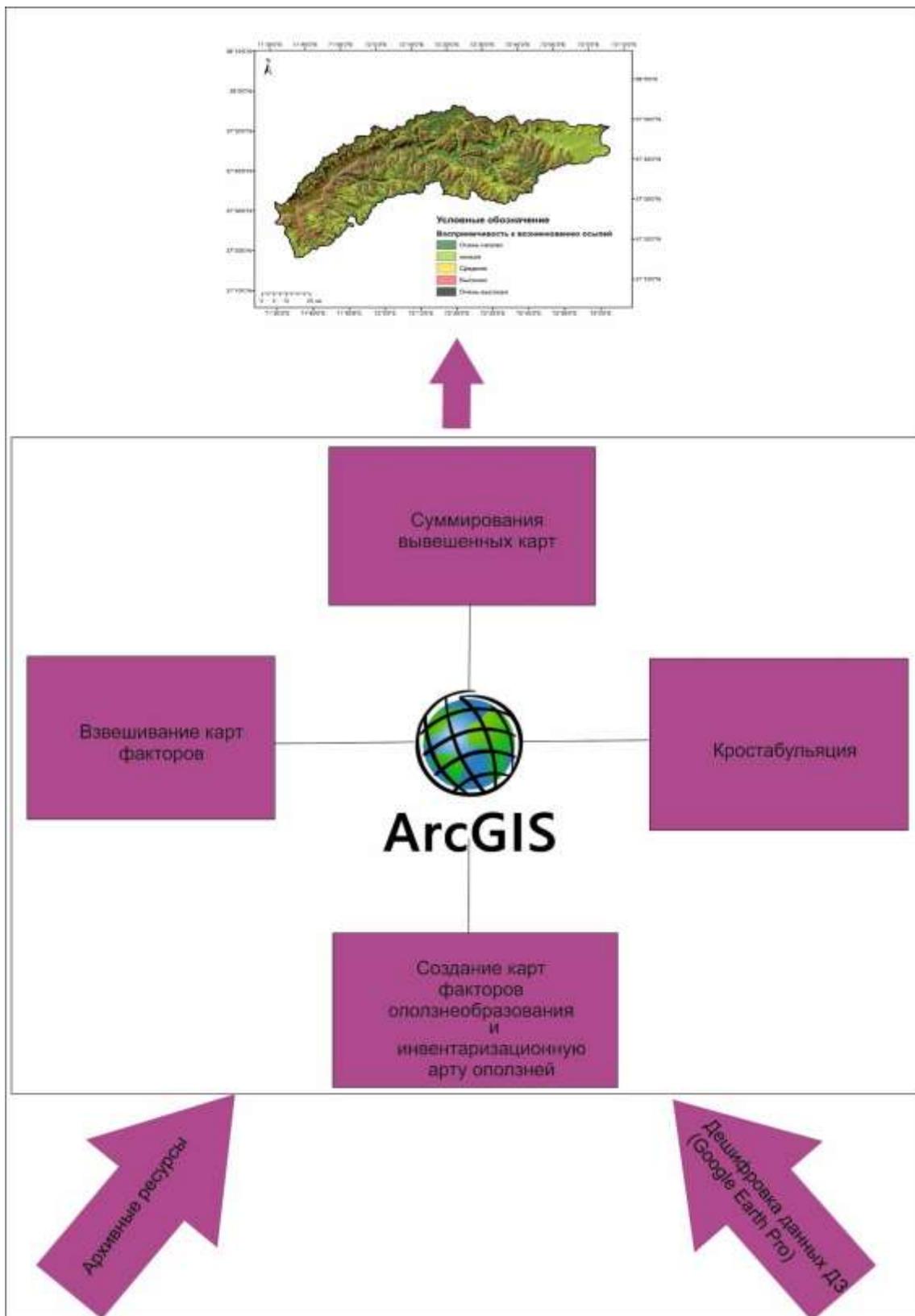
Не зря говорят, что «прошлое - это ключ к будущему», и, следуя этому принципу и изучая прошлое, можно районировать территорию по степени предрасположенности к возникновению оползней [50, 69, 82, 83, 164].

Это возможно в том случае, если определён ряд признаков оползнеобразования. Определение признаков оползнеобразования осуществляется с помощью сопоставления уже существующих оползней с пространственно-привязанных карт факторов их образования.

Их сопоставление, в свою очередь, выполнимо с помощью кросс-табуляции.

Одного сопоставления оползней с факторами их образования недостаточно, чтобы говорить об их признаках, для этого исследователи предложили ряд количественных и полуколичественных методов выявления взаимоотношения оползневых явлений с факторами их образования. Решение задач, связанных с выявлением пространственных закономерностей оползневых явлений, сопряжённых с изучением больших территорий, предопределяет целесообразность применения статистических методов их вычисления с помощью компьютерных программ. Применение современных компьютерных программ уменьшает затраты труда в несколько раз, а

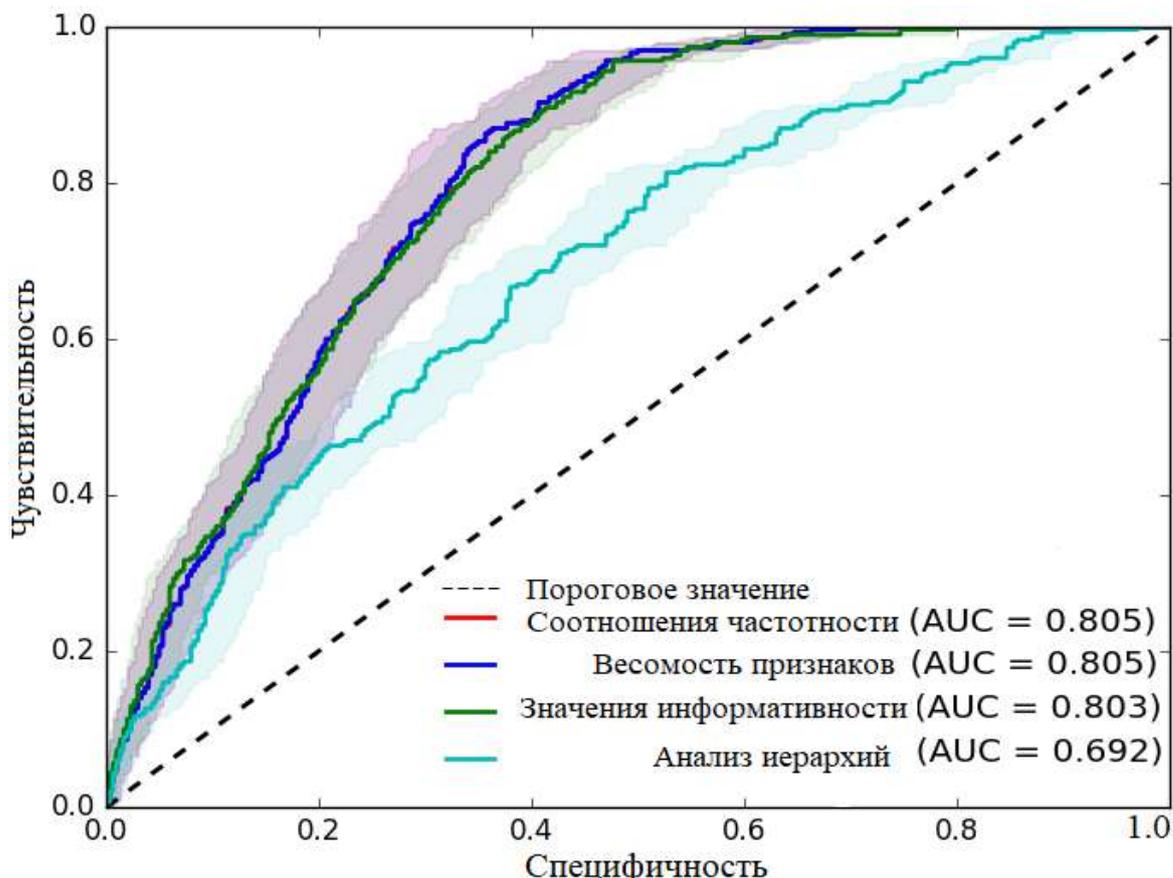
результаты намного превосходят результаты, полученные традиционным путём.



**Рисунок 3.1.** - Схема проведения моделирования восприимчивости к возникновению оползней

Другое преимущество применения компьютерных программ при изучении пространственных закономерностей оползневых явлений — это то, что с помощью них решаются даже принципиально нерешаемые задачи. Одна из широко используемых компьютерных программ, предназначенных для анализа геопространственных данных, это ArcGIS ArcMap. [70, 87, 101, 127, 129, 167,].

Район каскада ГЭС на реке Вахш является единственной территорией в Таджикистане, где с целью выбора наиболее подходящей карты восприимчивости к возникновению оползней была сделана количественная и полуколичественная оценка. Также была проведена валидация (рис. 3.2) всех созданных моделей.



**Рисунок 3.2.** - Сравнение моделей восприимчивости к возникновению оползней

**Материалы.** Задача моделирования оползневой восприимчивости является крайне сложной, поскольку охватывает широкий спектр вопросов. Сюда относится как дешифрирование космических и аэрофотоснимков с

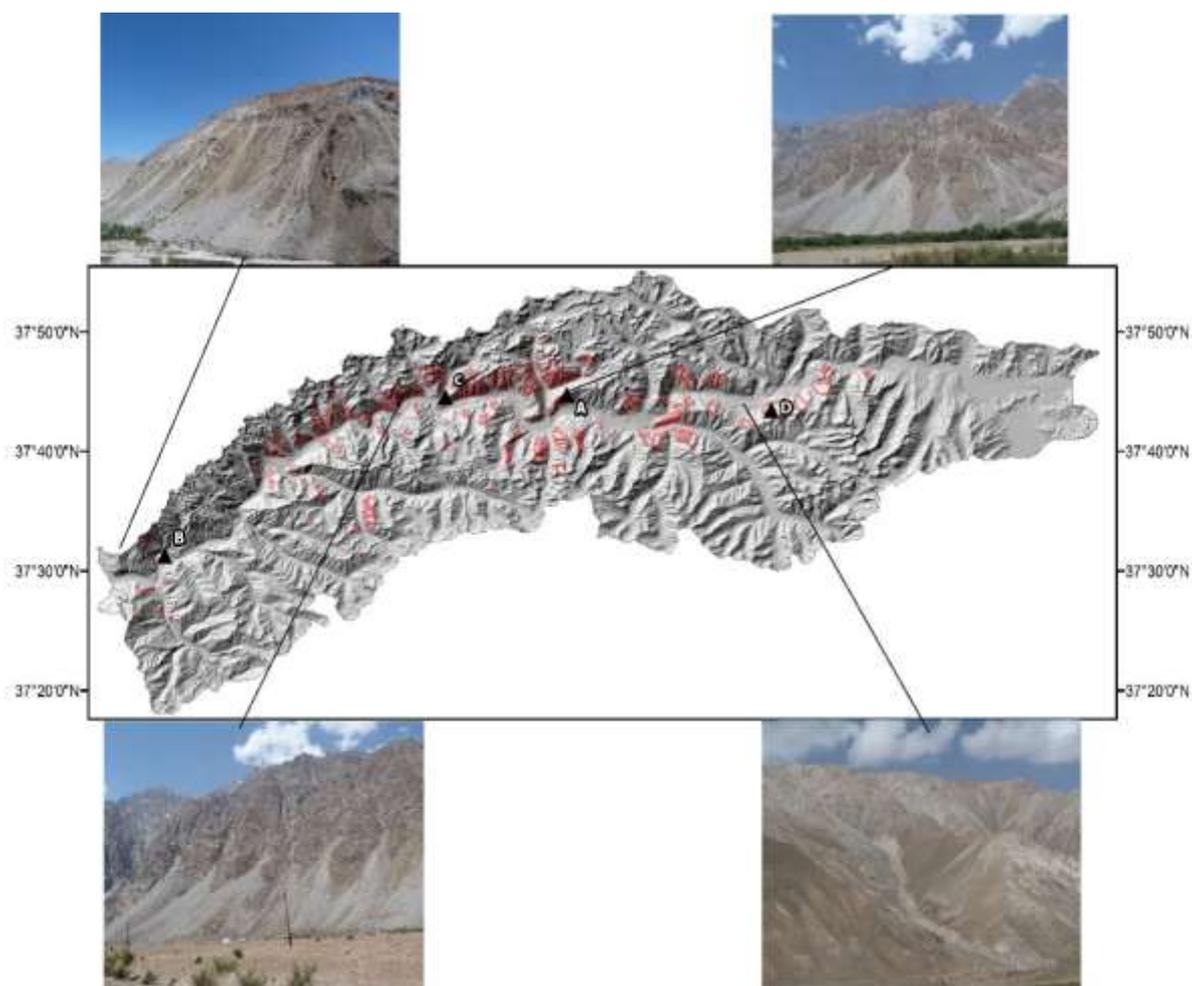
последующим составлением карт инвентаризации оползней и их полевой проверкой, так и изучение пространственных закономерностей их распространения. Хотя эти направления тесно взаимосвязаны, в практической деятельности каждое из них имеет самостоятельное значение. Кроме того, моделирование оползневой восприимчивости предполагает решение ряда дополнительных задач, обладающих собственными особенностями и важным прикладным значением. Карту, показывающую пространственное распределение оползневых явлений, в практике называют картой инвентаризации. Она создаётся использованием дешифровки космических снимков и аэрофотоснимков [84, 86, 88, 89].

Однако в большей части исследователи используют существующие архивные ресурсы. Несмотря на это, космические снимки и аэрофотоснимки никогда не теряют свою ценность при создании карты инвентаризации экзогенных геологических процессов или при других инженерно-геологических работах. Это связано с тем, что морфология поверхности земли всегда изменяется, и за короткий период времени под воздействием климатических, геологических, антропогенных и других факторов может происходить множество склоновых процессов. Таким образом, дешифровка космических снимков и аэрофотоснимков даёт нам возможность дополнить карту инвентаризации оползневых явлений более свежей информацией [58, 112, 113, 115, 119, 120, 131].

Надо также отметить, что дополнение карты инвентаризации оползневых явлений новыми данными не даёт нам право сказать, что оползни, которые обнаруживаются в ходе дешифровки, возникли после существующих оползней, и даже они могут быть намного старше, чем существующие оползни. При дешифровке космических снимков некоторые оползни сложно дешифрируемые, и именно из-за этого при наличии карты инвентаризации все равно необходимо сделать тщательную дешифровку с целью дополнения карты.

Правильная дешифровка, в первую очередь, зависит от опыта дешифровщика и определения морфологических отличий оползня от морфологии окружающих объектов. Существенное влияние на дешифровку оказывает и качество анализируемых снимков [133-136].

После того как мы пришли к максимальному количеству на данный момент существующих оползней, в ход сразу же вступает верификация карты непосредственно на поле (рис. 3.3). Верификация необходима для того, чтобы удостовериться в правильности дешифровки данных дистанционного зондирования. С другой стороны, она позволяет нам обнаружить оползни, которые на снимках не видны или трудно дешифруемы, и тем самым усовершенствовать нашу карту.



**Рисунок 3.3.** - Верификация результатов дешифровки материалов дистанционного зондирования

Модель восприимчивости к возникновению оползней является конечным результатом первого так называемого шага оценки риска от оползней независимо от масштаба. Она показывает места возможных будущих оползней, которые имеют большое практическое значение при планировании строительства любых сооружений или объектов народнохозяйственного назначения [23, 91-95].

Практика показывает, что определение морфологических особенностей оползней зависит не только от опыта дешифровщика и качества космических снимков и аэрофотоснимков, но и от качества монитора компьютера. Использование монитора с низким разрешением может привести к неправильной интерпретации снимков.

Показательным примером выявления оползней в процессе полевой верификации карт служат совместные исследования, проведённые в сентябре 2023 года сотрудниками Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана и Университета Сегеда (Венгрия) в долинах рек Бартанг и Гунт. В ходе этих работ было зафиксировано четыре оползневых образования.

### **Выводы по третьей главе**

1. При оценке точности модели восприимчивости к возникновению оползней валидация входит в состав неизменных работ. Карта восприимчивости к возникновению оползней в случае отсутствия данной процедуры, независимо от метода исследования и входных материалов, оставляет за собой сомнение и не всегда внедряется в производство. Точность модели зависит от того до какой степени оползни, предназначенные для валидации, соответствуют зонам с высокой и очень высокой восприимчивостью.
2. Разбиение оползней на две группы обеспечивает нас важнейшим преимуществом наших данных - независимостью. Полная независимость модели от оползней для валидации необходима для того, чтобы найти ответ на вопрос: до какой степени модель совпадает с реальностью?

3. Инвентаризационная карта без её верификации непосредственно на поле не считается полноценной. С другой стороны, в ходе верификации также можно обнаружить те явления, которые при дешифровке космических снимков невозможно обнаружить.

## **ГЛАВА IV. ЗОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ ПО СТЕПЕНИ ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОПОЛЗНЕЙ**

Оползни являются одним из наиболее широко распространённых и активно развивающихся экзогенных геологических процессов в долине реки Гунд, расположенной в пределах высокогорной части Памира. Формирование и эволюция оползневых процессов в этом районе обусловлены сочетанием крутых склонов, интенсивной тектонической дислокации, сложного литолого-структурного строения, сейсмической активности и неблагоприятных климатических условий. Структурно долина реки Гунт приурочена к зоне активного поднятия с резкими амплитудами вертикальных движений, что способствует постоянному перераспределению масс на склонах.

Развитие оползней в регионе в значительной степени контролируется геологическим строением. В пределах склонов широко распространены слабосцементированные и легко выветриваемые породы: глинистые сланцы, алевролиты, аргиллиты, чередующиеся с более прочными песчаниками и метаморфитами.

Ключевую роль в запуске и развитии оползневых процессов играют климатические и гидрогеологические факторы. Весеннее снеготаяние, сильные ливневые осадки, а также процессы инфильтрации и аккумуляции подповерхностных вод создают условия для снижения прочности склонов и активации смещений. Повышенная влажность пород приводит к изменению их физико-механических свойств, росту порового давления и формированию условий для движения масс по слабым слоям.

Сейсмичность Памира также оказывает существенное влияние на оползнеобразование. Повторяющиеся сейсмические толчки различной интенсивности провоцируют как начальные стадии формирования оползней, так и реактивацию ранее стабилизированных тел. Нередко оползневые события приурочены к зонам тектонических нарушений, где наблюдается

значительное дробление пород и формирование трещиноватых, ослабленных участков склонов.

Морфологически оползни долины Гунт представлены широким спектром форм: от локальных мелкомасштабных смещений до крупных, многотоннажных массивов. Для большинства оползней характерна языковидная или ложкообразная форма, наличие тыловых ниш, деформированной средней зоны и лобовых валов. В ряде случаев наблюдаются признаки многостадийности формирования оползней, когда более молодые смещения перекрывают или деформируют древние, стабилизированные тела. Это указывает на циклический характер процессов, поддерживаемый современными природными условиями.

В пределах долины реки Гунт большой интерес представляет следы старых оползневых движений. Примером может служить визуально изученный оползень (Рис. 4.1), где в верхней части видны вогнутые контуры, характерные для зон отрыва. Плавные выемки и бугристая поверхность в нижней части тела свидетельствуют о накоплении материала (зона аккумуляции), куда сошёл сдвинутый грунт. Рельеф данной территории характеризуется крутыми склонами со средними уклонами в пределах 28–40°, что соответствует критическим значениям для развития гравитационных процессов. Морфометрические признаки (форма, крутизна, экспозиция склона) указывают на то, что склон обращён к югу и юго-западу, что способствует активному дневному нагреву, выветриванию и, как следствие, разрушению слагающих его пород. По морфологическим признакам, данный оползень можно отнести к комбинированному типу. Начальная стадия — скольжение вдоль поверхности слабых пород, далее наблюдается переход в текучее состояние с формированием бугристой аккумулятивной зоны. Видимые следы движения (открытые участки, нарушение покрова) указывают на активность в последние десятилетия. Данный участок долины Гунт находится в зоне активного тектонического напряжения. Вероятна близость к разломам субмеридионального и субширотного простирания.

Постоянные тектонические подвижки, даже малой интенсивности, могут нарушать структуру пород и способствовать их ослаблению.

Таким образом, рассматриваемый оползень в долине реки Гунт представляет собой типичный пример гравитационного процесса в высокогорных условиях Памира. Он сформировался на основе сочетания неблагоприятных геоморфологических, литологических и гидрологических факторов и продолжает оставаться потенциальным источником чрезвычайной ситуации. Устойчивость склона зависит от сезонных колебаний влажности и сейсмической активности, что требует постоянного мониторинга, инженерной стабилизации и комплексного подхода к оценке риска и защиты территории.



**Рисунок 4.1.** - Оползневое тело долины реки Гунт

В долине реки Гунт также исследована структурно-денудационный оползень со смешанным механизмом смещения (рис. 4.2). Начальная стадия характеризуется сдвигом, далее развивается как сползание с элементами осыпания и текучести. Видна четко выраженная головная часть оползня с уступом отрыва, который проходит по линии перегиба склона. Центральная

часть представляет собой зону смещения с многочисленными поверхностями скольжения и эрозионными выработками. В нижней части видна зона аккумуляции материала, местами с наложенными осыпями и признаками повторного сдвига. Склон крутой, с вогнуто-выпуклой формой, что способствует накоплению и перенапряжению вод в теле оползня. Имеется ярко выраженная депрессия в теле оползня, где, вероятно, происходят скопление влаги. Склон сложен древними рыхлыми и трещиноватыми обломочными породами, что способствует возникновению и развитию оползней. По состоянию склонов и наличию свежих борозд и ливневых выработок можно заключить, что оползень активен или полурасконсервирован. На теле оползня отсутствует выраженная растительность, что также говорит о недавней или продолжающейся активности. На правом фланге оползня прослеживается вторичный ручей или эрозионный овраг, усиливающий подмыв основания. Оползень представляет угрозу для подножия склона и долинной части, особенно в случае сильных осадков или землетрясений. Возможны повторные смещения, особенно по старой поверхности скольжения. Наличие рыхлых масс в теле и активизация оврагов делает оползень опасным для инфраструктурных объектов в долине.



**Рисунок 4.2.** - Структурно-денудационный оползень долины реки Гунт

Этот оползень является типичным примером склонового процесса долины реки Гунт, где сложное сочетание геологических, морфологических и климатических факторов создаёт условия для активного оползнеобразования.

Одним из характерных экзогенных процессов в пределах долины реки Гунт является формирование крупномасштабных оползневых комплексов, возникающих в результате взаимодействия тектонических, литолого-структурных и климато-гидрологических факторов (рис. 4.3). Оползневое образование характеризуется чётко выраженной морфологией: в верхней части фиксируются линии отрыва с развитыми тыловыми и боковыми разломами, что указывает на глубокую и структурно обусловленную зону сдвига. Его конфигурация — языковидная с радиальной системой трещиноватости и множественными вторичными смещениями, сформировавшими сложный микрорельеф. Поверхность тела характеризуется волнисто-бугристым строением, в рельефе различимы лобовые валы, типичные для процессов пластичного деформирования.

Оползневой материал аккумулярован в виде толщи разрушенных и перемешанных горных пород, в том числе с включениями крупноблочного материала. Нижняя часть тела частично внедряется в современную аккумулятивную равнину, изменяя гидрографическую сеть и формируя локальные подпертые участки.

Развитие физического и химического выветривания, характерное для высокогорных аридных условий Памира, способствует дополнительному ослаблению склонового материала. Периодическое насыщение водоносных слоёв, в том числе за счёт снеготаяния и локальных дождевых паводков, формирует гидродинамические условия, способствующие резкому снижению прочности и запуску оползневых процессов.

Морфоструктурные особенности тела оползня позволяют выделить его как сложный, многофазный комплекс. На его поверхности прослеживаются древние стабилизированные участки, перекрытые более молодыми блоками,

переместившимися по внутренним скользящим плоскостям. С учетом крупного объема перемещенного материала и протяженности, данное образование классифицируется как глубокий ротационный оползень с признаками ступенчатого и блокового смещения.

Возможно, его активизация была связана с тектонической активностью или повышенной увлажненностью склонов.



**Рисунок 4.3.** - Морфология древнего оползня в долине реки Гунт

Территория в подножии оползневого склона частично освоена населением. Отмечается наличие сельскохозяйственных угодий и жилых построек, расположенных в потенциальной зоне воздействия. Активизация тела в результате повторных осадков, сейсмических толчков или

дополнительной водной нагрузки представляет значительную угрозу как для объектов инфраструктуры, так и для жизни населения. Наличие древних смещений и сохраняющаяся неустойчивость подстилающих пород указывают на высокий уровень инженерно-геологического риска.

С учётом климатических изменений, тенденции повышения сезонных осадков и вероятной сейсмической активизации Памира, прогнозируемая устойчивость склонов в данном районе остаётся крайне низкой. Необходимы систематические наблюдения за деформационными процессами, гидрогеологическим режимом и параметрами устойчивости склоновых толщ для разработки эффективных мер стабилизации и территориального планирования.

В долине реки Гунд зафиксировано также сравнительно небольшой, но чётко выраженный оползневой комплекс (рис. 4.4). Несмотря на ограниченные размеры, данный оползень представляет интерес как пример локального склонового смещения, обусловленного литолого-гидрологическими особенностями и морфодинамическими процессами высокогорной зоны Памира. Оползневое тело имеет выраженную ложкообразную форму, характерную для ротационных смещений. В верхней части склона визуально прослеживается тыловая ниша, слегка вогнутая, с остатками зоны отрыва и начального накопления вод. Поверхность тела демонстрирует гладко-прогнутую геометрию, без резко выраженных гребней или ступеней, что указывает на относительно медленное и пластичное движение масс в пределах склонового профиля. Фронтальная часть характеризуется незначительными накоплениями смещенного материала, а также развитыми шлейфами осыпей и мелких обломков, частично стабилизированных растительным покровом. Вдоль всего тела прослеживаются линейные участки развития растительности, что указывает на каналы инфильтрации и разгрузки подповерхностных вод.

На левой боковой границе тела наблюдаются скальные выходы и устойчивые блоки, отделённые от оползневой массы явными

морфологическими границами. В нижней части склона зафиксирован небольшой ручей, играющий роль эрозионного и подмывающего фактора, способствующего локальной дестабилизации подошвы оползня.

Визуальные признаки свидетельствуют о стабилизированном состоянии тела оползня: активных трещин, свежих зон отрыва и фронтального натекания не зафиксировано. Частичное зарастание растительностью, отсутствие эрозионных борозд и нарушение структур почвенного покрова указывают на постактивную стадию. Однако наличие ручья и просачивающихся вод вблизи подошвы тела создаёт потенциальную угрозу повторной активизации, особенно в весенне-летний период. С учётом ограниченного объёма, данный оползень не представляет угрозу в региональном масштабе, однако может быть опасен при локальном освоении склонов — размещении хозяйственных объектов, проведении дорог или ирригационных каналов.



**Рисунок 4.4.** - Ротационный мелкомасштабный оползень на северном склоне долины реки Гунт

В условиях новой системы планирования освоения горных территорий, с целью содействия более эффективному землепользованию вопросы по пространственным закономерностям и районированию по степени восприимчивости к возникновению оползней приобретают важное значение.

Исследование закономерностей развития оползней и построение моделей их восприимчивости имеют особую значимость для территорий, где планируется возведение линейных инженерных сооружений. Проведение подобных работ позволяет оптимизировать затраты, направляя основные финансовые ресурсы на участки с наибольшей вероятностью возникновения оползней. В целом, карты регионального уровня служат инструментом для выделения зон, в пределах которых требуется более детальное обследование и проведение работ локального масштаба. Таким образом, экономическая эффективность инженерно-геологических работ зависит от такой современной модели.

В этом контексте специалистами группы геоинформационных технологий и дистанционного зондирования были исследованы закономерности развития оползней в бассейнах рек Вахш [68], Зеравшан [51] и Сурхоб [58]. На основе полученных данных построены модели восприимчивости к их возникновению. Результаты работ показали, что оползневые процессы проявляются в различных морфометрических условиях. Так, такие параметры, как экспозиция и крутизна склонов, а также высотная зональность, оказывают неодинаковое влияние на интенсивность и распространённость оползневых явлений.

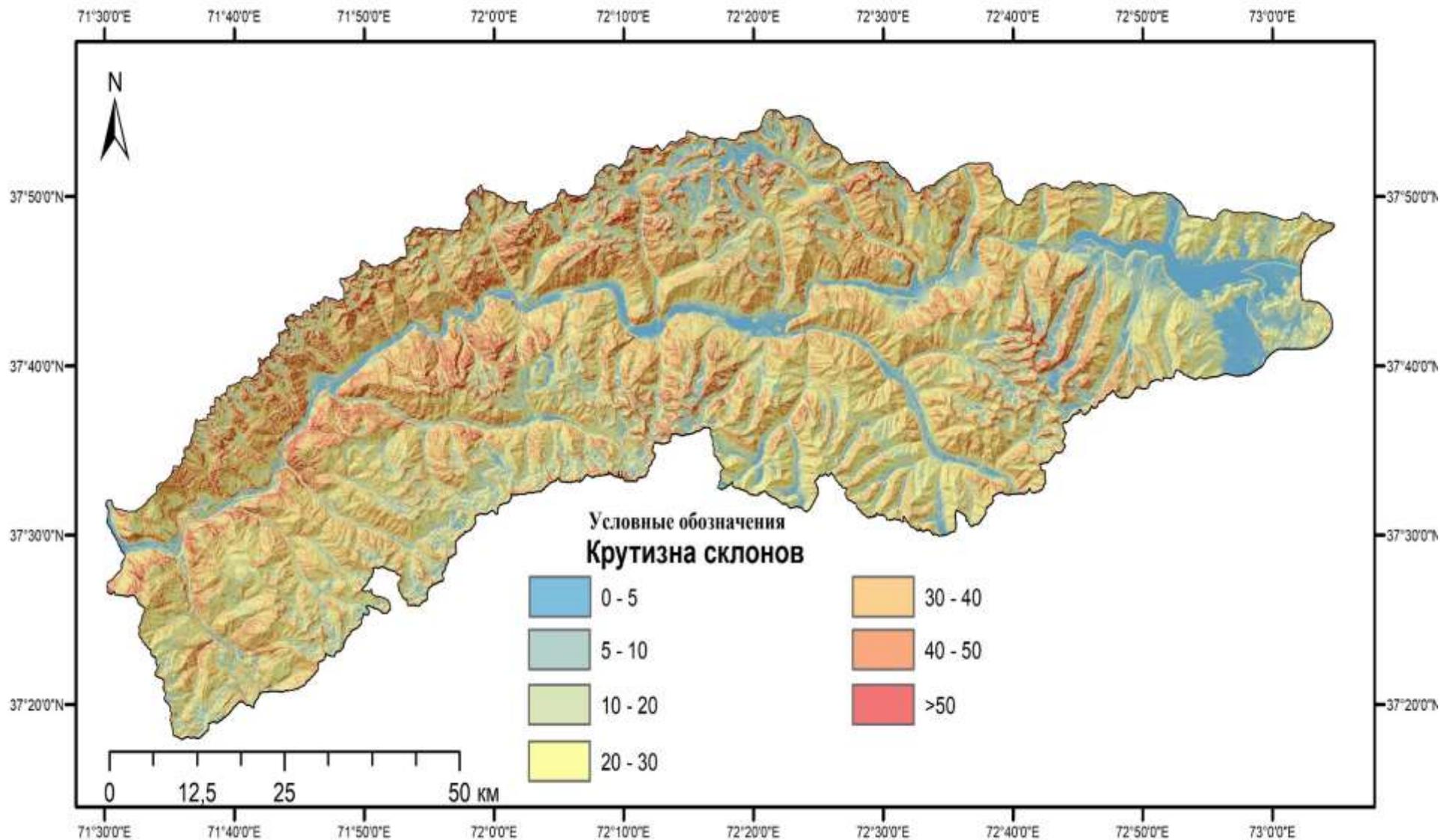
Другим основным положительным критерием использования модели восприимчивости к возникновению оползней является то, что практически все входные данные можно достать в открытом доступе. Несмотря на это, сбор данных является единственной проблемой данного моделирования. Таким образом, в данной работе анализируется лишь часть оползнеобразующих факторов, таких, как крутизна, экспозиция и кривизна склонов, высотная зональность и пиковое ускорение грунтов.

**Факторы оползнеобразования и их характеристики.** Всем известно, что крутизна склонов является основным фактором, создающим условия для возникновения оползней (рис. 4.5). Однако наибольшее значение имеет то, в каком показателе этого фактора развиты оползни. Для выявления зависимости развития оползней от крутизны склонов установлено, что большая часть оползней Памира приурочена к склонам с крутизной  $30-45^{\circ}$  [60-63, 102, 103]. Однако из-за недоступности выходных данных эти результаты невозможно учитывать в качестве входных материалов, что может привести к неправильной интерпретации других анализируемых факторов, которые имеют перспективный характер и будут использованы в качестве взвешенных данных для зонирования восприимчивости к возникновению оползней.

Помимо крутизны склонов, для развития оползней большое значение имеет экспозиция склонов (рис. 4.6). Влияние данного фактора на устойчивость склонов в последнее время вызывает большие споры среди исследователей. Серьёзного внимания заслуживают мнения ряда авторов, которые полностью убеждены в двояком влиянии этого фактора. Эти выводы сделаны на основе изучения ряда литературных данных и собственного статистического анализа [51, 64-66, 68].

Высокую корреляцию оползневых явлений со склонами с северной ориентацией авторы публикации связывают с малым попаданием солнечных лучей на поверхность этих склонов, вследствие чего на склонах с северной экспозицией по сравнению с другими влага накапливается больше, тем самым создаётся большая нагрузка на склон [51, 55-57, 96, 97].

Изучение влияния ориентации склонов на развитие оползней района каскада ГЭС на реке Вахш [68] позволило получить иные результаты. На рисунке 3 изображён график взаимосвязи оползневых явлений и показателей экспозиции склонов.



**Рисунок 4.5.** - Карта крутизны склонов долины реки Гунт

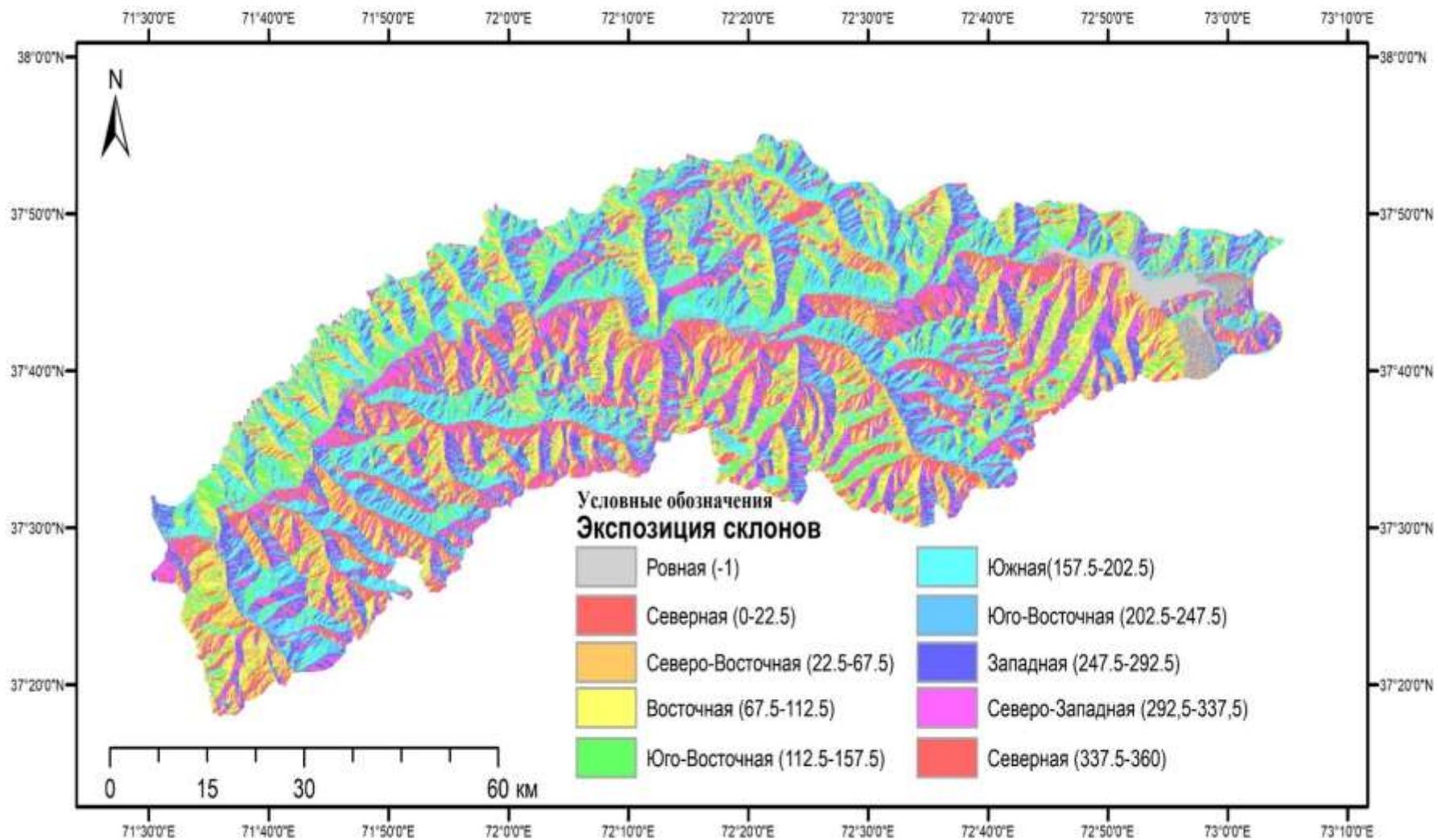


Рисунок 4.6. - Карта экспозиции склонов долины реки Гунт

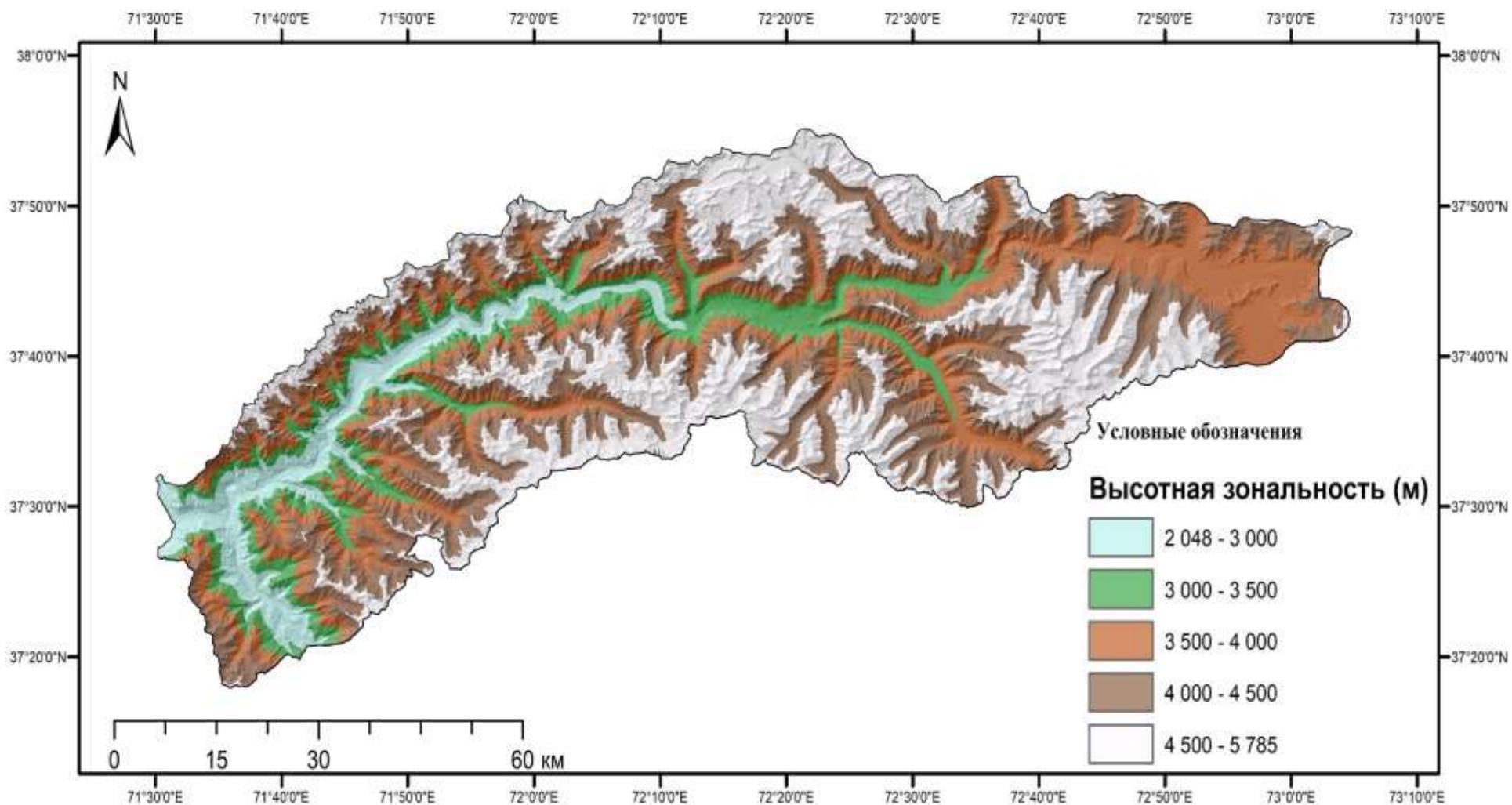
Приведённая на рисунке 4.7 кривая показывает, что оползни больше всего развиты на склонах с восточной и юго-восточной экспозицией. Таким образом, полученные данные приводят к иному выводу, поэтому проведение анализа влияния экспозиции склонов для бассейна реки Гунт является актуальной задачей.



**Рисунок 4.7.** - График зависимости соотношения частотности оползневых явлений от показателей экспозиции склонов [68]

Особый интерес для совершенствования карт восприимчивости к оползням представляет изучение развития этих процессов с учётом высотной зональности (рис. 4.8). Хотя количественные данные влияния данного фактора не приводятся, визуальный анализ карт восприимчивости к оползням каскада ГЭС на реке Вахш [68] и долины реки Сурхоб [58] позволил выявить чёткое сходство этих карт с картой высотной зональности.

Влияние высотной зональности можно характеризовать как посредственное, потому что с этим фактором тесную связь имеют растительность и количество атмосферных осадков. По утверждению большинства исследователей, эти два фактора имеют весьма существенное влияние на развитие оползней.



**Рисунок 4.8.** - Карта высотной зональности долины реки Гунт

Количественная характеристика влияния растительности на распространение оползней района каскада ГЭС на реке Вахш служит доказательством того, что данный фактор является одним из ведущих факторов оползнеобразования [68,73,75].

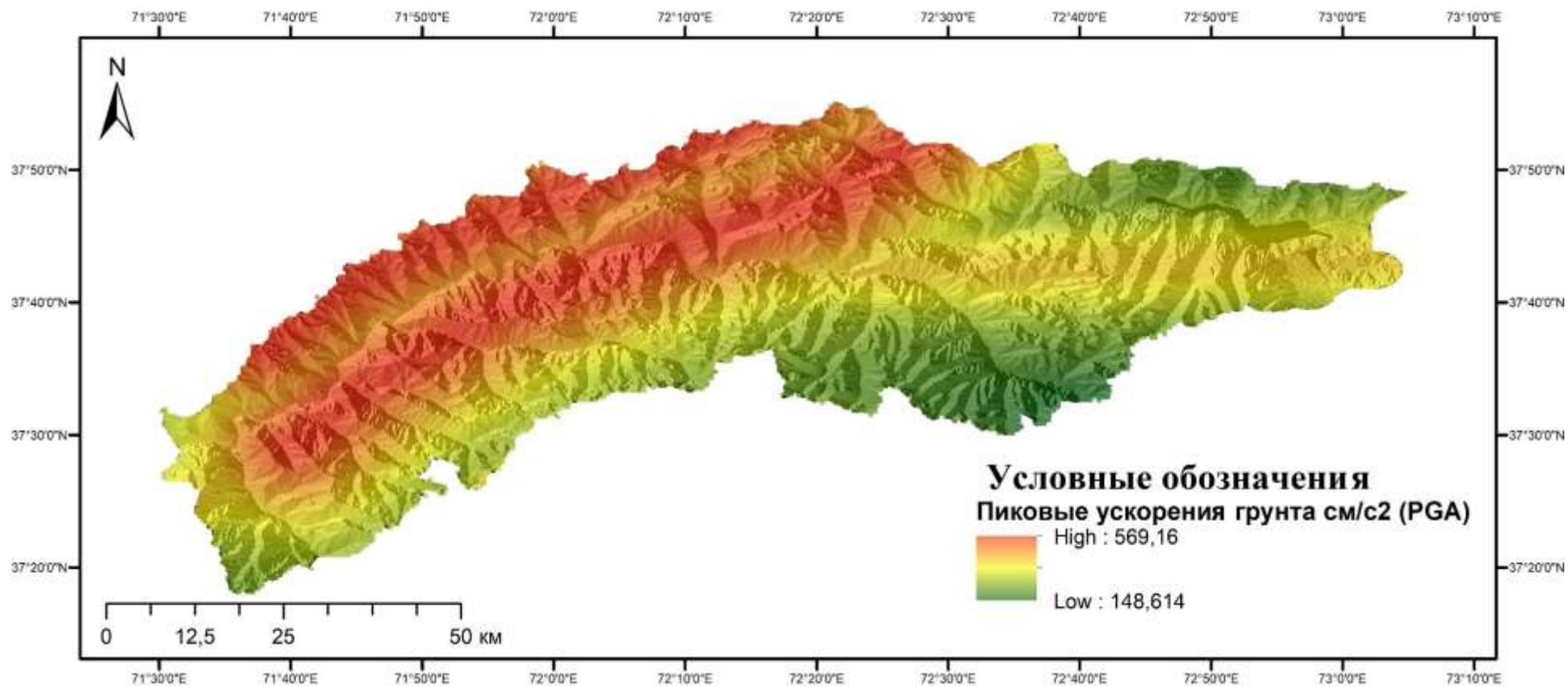
Большое значение при возникновении оползней в Таджикистане исследователи придают корреляции их с землетрясениями. Ранее охарактеризованные факторы (крутизна, экспозиция и кривизна склонов, высотная зональность и атмосферные осадки) в основном считают факторами, создающими условия для возникновения оползней. В отличие от этих факторов, землетрясения, как и атмосферные осадки, входят в состав факторов, активизирующих оползневой процесс (рис. 4.9). Примером этого служат Сарезкое (1911), Хаитское (1949) и Шароринское (1989) землетрясения.

Роль этого фактора в развитии оползней освещена в ряде работ [73, 76, 77], где приводятся количественные данные о влиянии землетрясений. В этих работах установлено, что благоприятной обстановкой для развития оползней являются пиксели с высоким показателем спектральных ускорений грунтов.

При создании модели восприимчивости к возникновению оползней используется и кривизна склонов (рис. 4.10). Интерпретация данных о взаимосвязи с показателями кривизны склонов показала, что во всех случаях склоны с выпуклой поверхностью имеют большие веса [55, 68, 72, 99, 100].

В весенние периоды в горных территориях Таджикистана наблюдается активизация экзогенных геологических процессов. В основном это связывают с большим количеством атмосферных осадков. К примеру, в мае 2021 года в районе Абдурахмони Джоми после обильного дождя из-за сползания лёссовых пород были разрушены 15 домов, и около 100 га земли выведены из культивации. Кроме этого, по всему миру каждый год под воздействием атмосферных осадков активизируются склоновые процессы, в результате которых гибнут люди, разрушаются дома и коммуникации. В связи с этим учёт количества атмосферных осадков при моделировании по степени

восприимчивости к возникновению оползней является обязательным (рис. 4.11).



**Рисунок 4.9.** - Карта сейсмической опасности долины реки Гунт в значениях пиковых ускорений грунта (PGA)

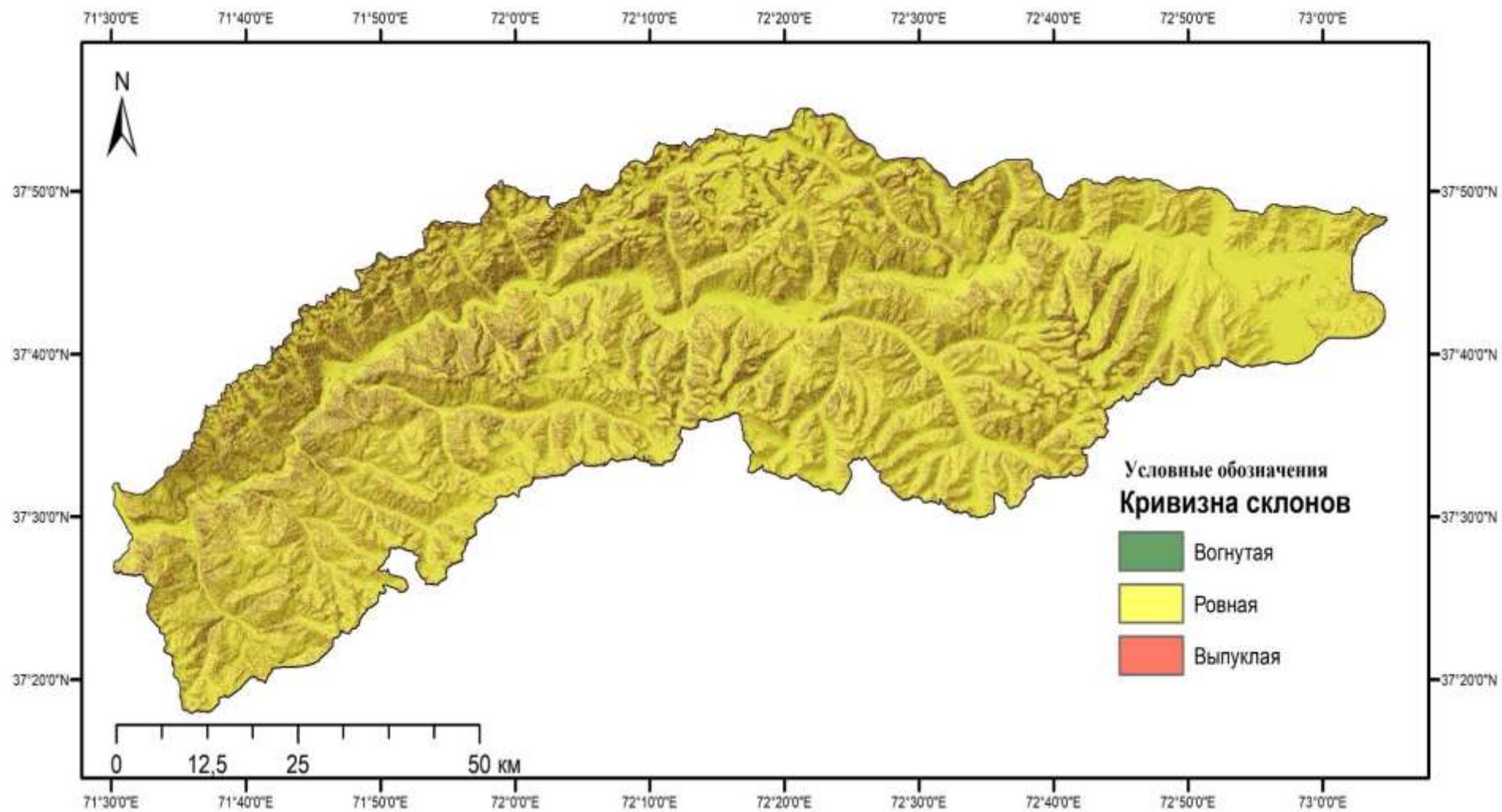


Рисунок 4.10. - Карта кривизны склонов долины реки Гунт

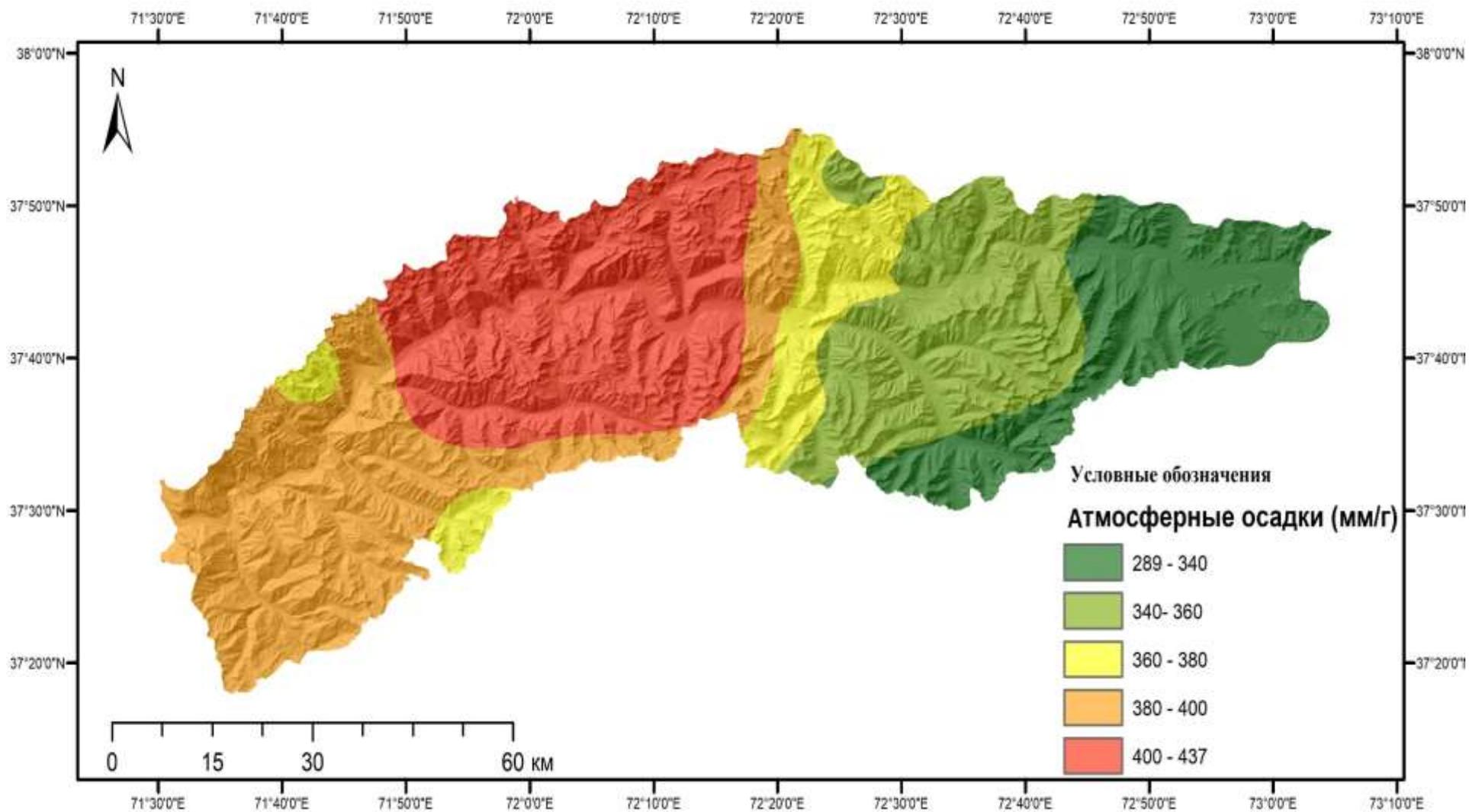


Рисунок 4.11. - Карта количества атмосферных осадков (мм/г) долины реки Гунт

## Результаты исследования

Моделирование восприимчивости к возникновению оползней и их закономерностей для долины реки Гунт основано на применении метода соотношения частотности. Расчет соотношения частотности проводился по формуле 1 [58].

$$FR_i = \frac{N_{cell}(S_i)/N_{cell}(N_i)}{\sum N_{cell}(S_i)/\sum N_{cell}(N_i)} \quad (1)$$

$FR_i$  – соотношения частотности;

$N_{cell}(S_i)$  – количество пикселей с оползнями в классе;

$N_{cell}(N_i)$  – количество пикселей в классе;

$\sum N_{cell}(S_i)$  – общее количество пикселей с оползнями на карте;

$\sum N_{cell}(N_i)$  – общее количество пикселей на карте.

Выявлено, что наибольшее влияние на развитие оползней долины реки Гунт оказывают склоны с крутизной 20-30° и 30-40°. В других показателях этого фактора коэффициент соотношения частотности ниже единицы, что показывает относительно меньшее влияние на развитие оползней этого экзодинамического процесса.

Высотная зональность района работ была создана с применением цифровой модели рельефа с разрешением 30м и разделена на пять классов. Среди показателей высотной зональности, класс 2048-3000м преобладает над другими показателями этого фактора. Таким образом, по мере повышения высотности наблюдается закономерное понижение соотношения частотности [95, 98, 114, 121, 122].

Согласно результатам данного анализа, по показателям соотношения частотности элементы экспозиции склонов располагаются следующим образом (по мере уменьшения коэффициента соотношения частотности): юго-западная, северная, южная, юго-восточная, западная, северо-восточная, восточная, северная и северо-западная экспозиции склонов (табл. 4.1).

**Таблица 4.1. - Результаты взвешивания факторов оползнеобразований**

Крутизна склона					
Класс	Ncell(N <sub>i</sub> )	∑Ncell(N <sub>i</sub> )	Ncell(S <sub>i</sub> )	∑Ncell(S <sub>i</sub> )	FR <sub>i</sub>
0-5	326033		7		0,02
5-10	422690		78		0,13
10-20	1089616		1216		0,78
20-30	1427522	5363835	2825	7666	1,38
30-40	1338109		2633		1,38
40-50	585173		748		0,89
>50	174692		159		0,64
Экспозиция склона					
Класс	Ncell(N <sub>i</sub> )	∑Ncell(N <sub>i</sub> )	Ncell(S <sub>i</sub> )	∑Ncell(S <sub>i</sub> )	FR <sub>i</sub>
Ровная	49179		0		0,00
Северная	685905		187		0,19
Северо- восточная	650060		671		0,72
Восточная	679277	5363835	619	7666	0,64
Юго-восточная	646452		1216		1,32
Южная	676628		1726		1,78
Юго-западная	674980		1863		1,93
Западная	662526		1225		1,29
Северо- западная	638828		159		0,17
Высотная зональность					
Класс	Ncell(N <sub>i</sub> )	∑Ncell(N <sub>i</sub> )	Ncell(S <sub>i</sub> )	∑Ncell(S <sub>i</sub> )	FR <sub>i</sub>
2048-3000	370560		4427		8,36
3000-3500	554436		1205		1,52
3500-4000	1176972	5363835	1596	7666	0,95
4000-4500	1564166		438		0,20

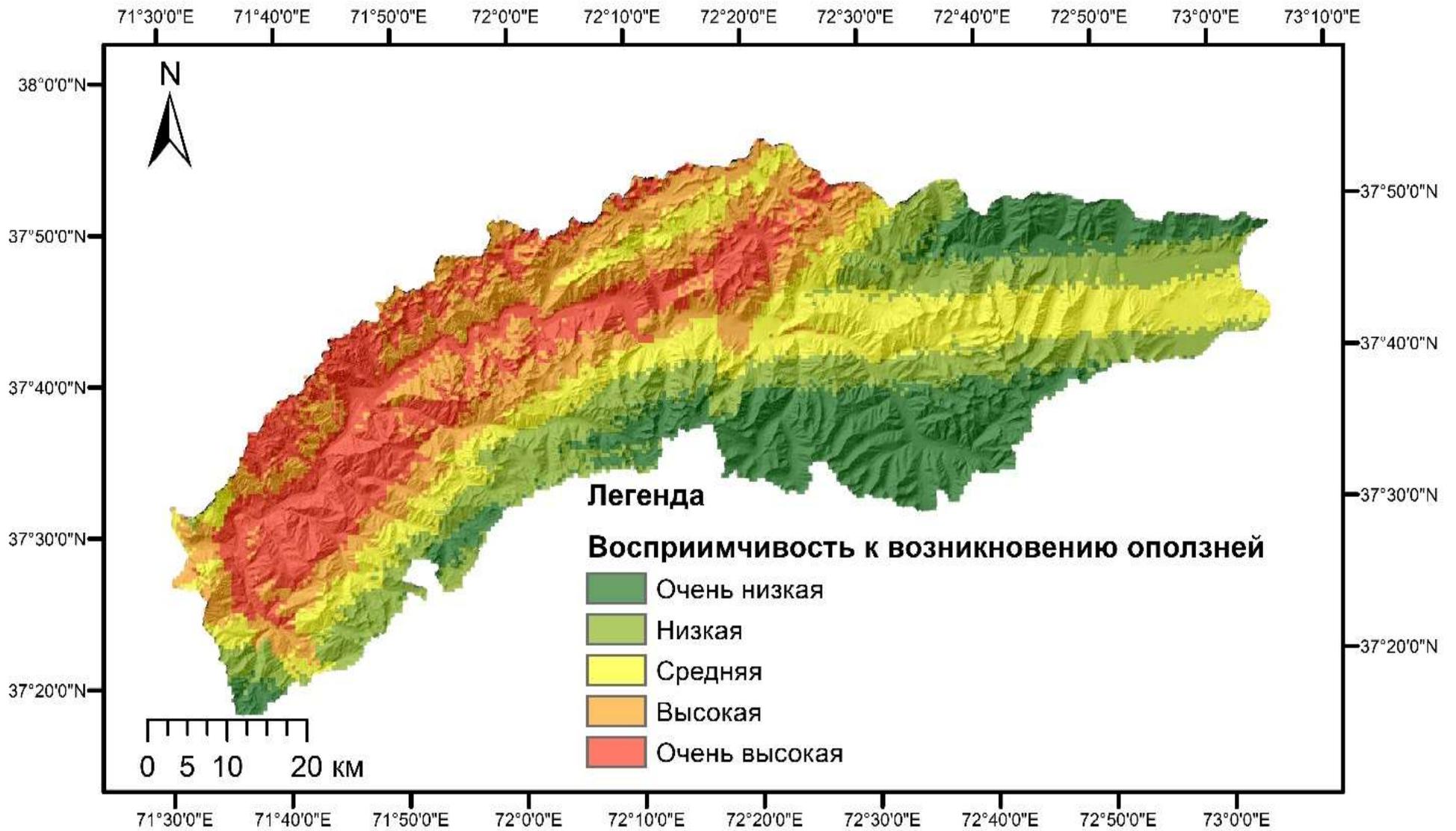
Продолжение таблица 4.1.					
4500-5785	1697701		0		0,00
Кривизна склона					
Класс	<b>Ncell(N<sub>i</sub>)</b>	<b>∑Ncell(N<sub>i</sub>)</b>	<b>Ncell(S<sub>i</sub>)</b>	<b>∑Ncell(S<sub>i</sub>)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
Вогнутая	449730		660		1,027
Ровная	4006127	5363833	5661	7666	0,989
Выпуклая	907976		1346		1,037
Количество атмосферных осадков мм/год					
Класс	<b>Ncell(N<sub>i</sub>)</b>	<b>∑Ncell(N<sub>i</sub>)</b>	<b>Ncell(S<sub>i</sub>)</b>	<b>∑Ncell(S<sub>i</sub>)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
289-340	899504		0		0,00
340-360	1027746		438		0,30
360-380	539513		313		0,41
380-400	1488934	5432651	6915	7666	3,29
400-437	1476954		0		0,00

На территории долины реки Гунт анализируемые оползни больше всего приурочены к показателю 380-400мм/г. Таким образом, показатель 360-380 занимает второе место по значимости. Надо отметить, что коэффициент соотношения частотности в показателе 380-400 намного превышает эти коэффициенты в других показателях карты количества атмосферных осадков.

Согласно выявленных коэффициентов соотношения частотности в показателях кривизны склонов, более уязвимыми, с небольшим преимуществом над вогнутой формой, являются склоны с выпуклой формой. Кроме этого, вогнутую форму склона некоторые исследователи, относительно её влияния на развитие оползней, связывают с атмосферными осадками, и это объясняется тем, что в таких формах склона атмосферные осадки накапливаются, и склоны становятся менее устойчивыми [22, 34, 41].

Ранее проведённые исследования по влиянию и роли сейсмичности на развитие оползней показывают, что сейсмичность можно ставить на первое место среди всех факторов. В связи с этим было принято решение не проводить анализ соотношения частотности для карты спектральных ускорений грунтов. Таким образом, просто сопоставляя карту с результатами суммирования всех ранее анализированных карт, была создана карта восприимчивости к возникновению оползней (рис. 4.12).

Карта восприимчивости к возникновению оползней разбита на пять классов: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая. Классы восприимчивости к возникновению оползней занимают почти одинаковые площади (табл. 4.2).



**Рисунок 4.12.** - Карта восприимчивости к возникновению оползней

Таким образом, карта привлекает к себе внимание тем, что периферию восточной части карты занимают зоны с очень низкой и низкой восприимчивостью, кроме центра этой части, где господствует средняя восприимчивость. Подобная восприимчивость наблюдается в юго-западной части карты. Возможными причинами очень низкой и низкой восприимчивости на периферийных частях карты могут быть низкая сейсмичность и суровые климатические условия, где, вероятно, развиты другие экзогенные геологические процессы.

**Таблица 4.2.** - Площадь классов карты восприимчивости к возникновению оползней

<b>Класс</b>	<b>Количество пикселей на классе</b>	<b>Площадь, %</b>
<b>Очень низкая</b>	3375	20,0
<b>Низкая</b>	3449	20,4
<b>Средняя</b>	3384	20,0
<b>Высокая</b>	3383	20,0
<b>Очень высокая</b>	3324	19,7

Классы с высокой и очень высокой восприимчивостью к возникновению оползней в основном локализованы в центральной части карты. Визуальное сравнение конечного результата моделирования, которым является карта восприимчивости, с картами крутизны склонов и сейсмической опасности долины реки Гунт в значениях пиковых ускорений грунта приводят к выводу, что основными причинами высокой и очень высокой восприимчивости в центральной части карты являются крутые склоны и высокая сейсмичность.

## Выводы по четвёртой главе

1. В настоящее время моделирование восприимчивости к оползневым процессам является одним из ключевых направлений в исследованиях, посвящённых экзогенным геологическим явлениям. Переход к применению таких моделей при планировании строительства линейных сооружений является основной целью, для достижения которой трудятся исследователи. Данная модель представляет собой систему взаимосвязанных факторов оползнеобразования, в которой все составные части факторов, интегрируясь, создают картину, показывающую зоны, наиболее предрасположенные к возникновению оползней. Основной сложностью при моделировании восприимчивости к возникновению оползней является недостаточность доступных данных. В число факторов, которые можно было бы учитывать, входят растительный покров, литология и мощность рыхлых пород. Однако из-за отсутствия открытых данных по некоторым из этих параметров исследование было ограничено использованием имеющихся материалов. Частичным решением данной проблемы является применение высотной зональности, поскольку растительный покров в значительной степени коррелирует с высотными поясами. Недостающие факторы могут быть добавлены в ходе детальных исследований.

2. Выявленные коэффициенты соотношения частотности в показателях факторов оползнеобразования при их не комплексном использовании имеют большое значение для прогноза перспективных зон возникновения оползней. Закономерности играют важную роль, так как веса показателей всех этих факторов показывают условия для развития оползней. Это означает, что оползни нужно ожидать в тех условиях, в которых они возникали ранее.

3. Согласно результатам исследования, идеальный склон для возникновения оползней — это склон с крутизной  $30-40^{\circ}$ , северной ориентации и выпуклой формы. Сочетание вышеизложенных морфометрических условий с атмосферными осадками в показателях 300-400 мм на высоте 2500-3000 м создаёт более благоприятные условия для развития оползней. Принимая во

внимание тот факт, что другие аналогичные работы показали, что с повышением сейсмичности количество оползней повышается, данная карта не была разбита на классы. После интеграции крутизны, экспозиции и кривизны склонов, высотной зональности и карты атмосферных осадков к ним в качестве сейсмического воздействия была добавлена карта спектральных ускорений грунтов.

## ГЛАВА V. ВЛИЯНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАЗВИТИЕ ОСЫПЕЙ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНД

Долина реки Гунд характеризуется широким развитием осыпных образований, формирование которых обусловлено в первую очередь интенсивным физическим выветриванием горных пород, крутыми склонами, сейсмичностью. Они являются доминирующим фактором рельефа образования данной территории. Основным источником осыпного материала служат интрузивные и метаморфические горные породы, широко распространённые в геологическом строении района. Изучая морфологию и структуры осыпей их можно разделить на свежие активные осыпи — это рыхлее, нестабильные обломочные материалы, пассивные или стабильные осыпи — это местами закреплённые растительностью, имеющие плотную структуру, где не наблюдаются следов современной активности и комплексные осыпные образования — это сочетающие элементы делювиальных отложений, обвалов и осыпей. Осыпи, расположенные у подножия крутых склонов в основном, выражаются в виде конусов выноса. В исследуемой территории осыпные тела часто имеют многоярусный характер формирования, это в первую очередь связано с повторными циклами гравитационного перераспределения отложений. Осыпной материал состоит из угловатых и слабо галтованных обломков. По гранулометрическому составу осыпи глыбово-обломочные (обломки более 0,5 м), среднеобломочные (обломки 5-50 см), мелкообломочные и щебнистые (мелкие и не окатанные). Осыпные образования данной территории приурочены в основном к крутым склонам, зонам тектонических разломов и в участках с интенсивной физической выветривания.

При полевых наблюдениях по долине реки Гунд визуально обследованы ряд оползней где установлены зональные характеристики и параметры их размещения.

Как видно на (рис.5.1) осыпь имеет хорошо выраженную конусообразную форму, которое образовалось у подножия крутого скального склона. Такой тип

осыпей характерно для высокогорных районов с активным физическим выветриванием. Оно делювиально-пролювиальное, которое происходило за счет гравитационного сползания коренных пород. Как видно в центральный желобе хорошо выражена зона активного выноса обломочного материала. Во фланговых участках рельеф относительно сглаженный, где осыпной материал менее подвижный. У подножия расположены кустарники указывающий на относительной стабильности нижней части осыпья. Наблюдения показали на умеренной активности осыпья. Осыпь расположено в зоне контакта активного скального разрушения. В настоящее время морфометрия данного осыпья указывает на умеренно активную фазу.



**Рисунок 5.1.** - Аккумулятивная осыпь с конусом выноса

На правом борту долины реки Гунт зафиксирован широкий осыпной комплекс, представленный серией глыбово -щебеночных шлейфов различной степени активности (рис. 5.2). Как видно склоны имеют крутизну  $30-40^{\circ}$ , по которым развиваются гравитационные потоки рыхлого осыпного материала. Осыпи представлены несортированными и угловатыми обломками различной величины, которые представлены гравийно-галечного материала до глыб.

Верхние части осыпей представлены материалом их многочисленных кулуаров и ложбин. Кулуары являются руслами временных водотоков, активизирующиеся при таянии снега и способствуют периодическому перемещению осыпного материала.

Изучая морфологические особенности этих осыпей, можно их классифицировать на кулуарные осыпи, формирующиеся в узких протяженных ложбинах в верхней части склонов, конусообразные осыпи, образующие веерообразные шлейфы у подножия кулуаров, которые часто перекрывают друг друга образуя комбинированные осыпные формы и лобовые осыпи, представляющие собой фронтальные скопления обломочного материала, и накапливаются у основания склонов.



**Рисунок 5.2.** - Широкий осыпной комплекс долины реки Гунт

Данный осыпной комплекс является результатом взаимодействия литолого-структурных и морфометрических факторов и их разноуровневость, различная степень активности, наличие зон аккумуляции и нестабильность некоторых участков указывают на высокую динамичность склоновых процессов.

Как видно на (рис. 5.3). горные породы обладают высокой прочностью, но подвержены интенсивному физическому выветриванию, где наблюдается активное разрушение склонов с образованием массивных осыпей.

В левой части этой площади отчётливо прослеживается осыпь с ярко выраженной вершиной выноса. Эта осыпь обладает языковидной формой и хорошо отсортированной структурой, где в верхней части преобладают крупнообломочные фракции, а в нижней — мелкие, гравийные и щебеночные. Такая морфология указывает на длительный процесс гравитационного накопления обломочного материала. Поверхность тела осыпи относительно ровная, слабо расчленённая, с незначительными следами локальных перемещений.



**Рисунок 5.3.** - Активное разрушение склонов с образованием массивных осыпей

В центральной части наблюдается более сложная осыпная структура. Здесь сосредоточено несколько перекрывающихся осыпей, сформировавшихся в результате повторяющихся циклов обрушений, выветривания и

гравитационного перемещения обломков. Поверхности этих осыпей неровные, с характерной слоистостью, отражающей неоднократную аккумуляцию материала в течение различных периодов. В этой зоне встречаются как глыбы и глыбисто-щебеночный материал, так и более мелкие элементы, частично переработанные временными водными потоками. Видны следы вторичного перераспределения материала.

Правее прослеживаются сравнительно молодые осыпи, сформированные в узких кулуарах и характеризующиеся треугольной формой тела. Они включают как мелкообломочные массы, так и отдельные глыбы диаметром до нескольких метров. Поверхности этих осыпей пересечены бороздами и промоинами, что указывает на эпизодическую подвижность материала, особенно в периоды снеготаяния или после сильных осадков. Верхние части склонов содержат нестабильные глыбы и обломки, расположенные хаотично, без сортировки. Подножие правого склона усеяно крупными глыбами, что повышает опасность для любых инженерных объектов, расположенных вблизи склонов.

Современное состояние осыпей указывает на неоднородную степень их активности. Одни тела стабилизированы и практически не изменяются, другие демонстрируют признаки продолжающегося движения. Активизация осыпей может происходить под воздействием сезонного снеготаяния или внезапных ливней. При этом возможны как локальные сходы обломков, так и образование мелких селевых потоков с включением осыпного материала. Наличие свежих глыб, отсутствие растительности на отдельных участках и хорошо выраженные промоины подтверждают активные экзогенные процессы в пределах этой территории.

Активно развивающиеся осыпные процессы также имеют широкое распространение по долине реки Гунт (рис. 5.4). Как видно на рисунке по типам они гравитационные осыпи-делювии, где обломочный материал имеет различный степен окатанности, линейные осыпи, имеющие форму языков и конусов выносов и веерные осыпи, которые формировались в результате

мульти фокусного разрушения материала. По морфологии осыпные тела имеют круто наклонённую форму, которые представлены веерообразными конусами. В центральной части видны слабо закрепленные осыпные русла в виде каналы выноса. Некоторые из осыпей имеют свежие следы активизации.

Обломочный материал представлено гравием, щебнем, и глыбами размером до 1-2м. В основании конусов отложения более мелкие, переносимых водными потоками.



**Рисунок 5.4.** - Активно развивающиеся осыпные процессы долины реки Гунт

Отчетливо прослеживается комплекс осыпей, развивавшихся на крутых и высоких бортах долины реки Гунт (рис. 5.5). Они представляют собой крупные аккумулятивные формы гравитационного происхождения, сформированные в результате длительного разрушения и деструкции коренных пород. На рассматриваемом участке имеются три основные осыпи, каждая из которых обладает своими уникальными морфологическими характеристиками.

Центральная осыпь является наиболее мощной по морфологии, где ее истоки расположено практически у гребня горного хребта. Она представляет

собой классический пример вытянутой клиновидной осыпи, развивающейся в условиях интенсивного физического выветривания. Осыпь протягивается вниз по склону, постепенно расширяясь к основанию, где формирует выраженный аккумулятивный конус выноса. Вдоль тела осыпи хорошо заметны линии стока обломков, что указывает на многократные волны осыпания и гравитационного перемещения. Морфология этой осыпи свидетельствует о её высокой активности в прошлом и о потенциальной угрозе повторной мобилизации материала в случае выпадения интенсивных атмосферных осадков или воздействия других триггеров.



**Рисунок 5.5.** - Панорамный вид осыпей на склонах долины

Левая осыпь, расположенная к востоку от центральной, развивается из узкого и глубокого кулуара. Эта осыпь носит преимущественно лопастной характер, с чётко очерченными границами, особенно в средней части, где сконцентрировано основное движение обломочного материала. Материалы осыпи тёмно-серого и бурого оттенков, что может свидетельствовать о преобладании в составе кристаллических пород. Поверхность осыпи пересечена продольными ложбинами и каналами, образованными как потоками

осыпающегося материала, так и временными водными струями. В нижней части этой осыпи прослеживается слабовыраженный аккумулятивный выступ, не столь развитый, как у центральной, но указывающий на регулярное поступление нового материала. Наличие рыхлого осыпного материала делает данную осыпь потенциально опасной в случае кратковременных осадков или сейсмического воздействия.

Правая осыпь, занимающая западную часть склона, где ее морфология указывает на полигенную природу происхождения. В пределах данной осыпи, произошло слияние нескольких мелких осыпных потоков, в результате чего сформировался широкий веерообразный массив. На всей поверхности осыпи наблюдаются разветвлённые русла, врезаемые временными потоками воды, указывающие на водную переработку осыпного материала. В нижней части осыпи отчётливо прослеживается конус выноса, переходящий в террасоподобную аккумулятивную форму, где местами, наблюдаются развитие растительности, что может быть признаком частичной стабилизации склонов.

В общем морфология осыпей свидетельствует о длительном и непрерывном воздействии гравитационных процессов, обусловленных крутизной склонов, интенсивным физическим выветриванием, а также возможным влиянием сезонных ливней и снеготаяния.

Следующий участок находится на правобережный склон долины реки Гунт, где интенсивно развиты осыпные процессы различной морфологии, генезиса и степени активности (рис. 5.6). Склон сложен метаморфическими и интрузивными породами, преимущественно трещиноватыми гнейсами и гранитами, обладающими высокой склонностью к физическому выветриванию и гравитационному разрушению. В пределах участка чётко прослеживаются несколько осыпей. Наиболее крупная и активная осыпь расположена в центральной части склона и представляет собой классический конус выноса, сформированный в результате длительного накопления обломочного материала. Форма осыпи симметричная, поверхность покрыта преимущественно мелко- и среднеобломочным материалом.

Отсутствие растительности и наличие свежих следов сходов обломков указывают на её современную активность. Угол откоса достигает 30–35°, нижняя часть осыпи плавно переходит в аккумулятивную террасу и непосредственно примыкает к пойме реки, что при определённых условиях может способствовать поступлению осыпного материала в русло. Слева от центральной осыпи располагается более древний и менее активный делювиальный шлейф, характеризующийся менее выраженной морфологией. В его составе наблюдается сортировка обломков: в верхней части преобладают мелкие фракции, тогда как внизу встречаются отдельные валуны и глыбы. Правая часть склона занята сложной по строению осыпной формацией, образованной чередующимися участками глыбового материала и мелкодисперсных делювиальных накоплений. Поверхность этой осыпи неравномерная, с тёмными полосами, вероятно, сформированными в результате поверхностного стока или схода небольших селевых потоков. Кроме основных осыпей, на всём протяжении склона наблюдаются мелкие делювиальные шлейфы, формирующиеся в узких жёлобах и ложбинах. Они являются активными каналами поступления свежего материала на тело осыпей.



**Рисунок 5.6.** - Интенсивное развитие осыпей долины реки Гунт

Типичная активная осыпь, развивающаяся на крутом правобережном склоне долины реки Гунт (рис. 5.7). Склон сложен массивными, светлоокрашенными породами, обладающими высокой трещиноватостью и механической хрупкостью, что обуславливает их интенсивное разрушение под воздействием процессов физического выветривания и гравитационного отделения обломков. Верхняя часть осыпи питается материалом, поступающим из слабо заросшего кулуара, прорезающего высокую скальную стенку. Визуально в верхней части осыпи различимы свежие светло-серые полосы – следы недавнего схода обломков, что указывает на её современную активность.



**Рисунок 5.7.** - Типичная активная осыпь долины реки Гунт

Осыпи образует хорошо выраженный и морфологически оформленный конус выноса, чья центральная ось ориентирована строго вниз по склону. В верхней части преобладают мелкофракционные и среднефракционные обломки, характеризующиеся плотным и равномерным распределением. Ниже по склону наблюдается заметное увеличение размера фрагментов, вплоть до крупных глыб.

Особое внимание заслуживает граница между телом осыпи и участком хозяйственного освоения в её подножии. Чётко прослеживается аккумулятивная терраса, на которой расположено небольшое традиционное

жилыё и участок орошаемого земледелия с посевами. Контакт осыпного тела с зоной антропогенной деятельности подчёркивает высокий уровень риска. В случае интенсивных осадков, схода лавин, землетрясения или внезапного обрушения в верхней части склона возможно поступление значительного объёма обломочного материала в зону жизнеобеспечения. Это делает данный участок одним из потенциально опасных, особенно с учётом того, что плотность и сортировка материала в теле осыпи указывает на возможность его подвижности даже при незначительном внешнем воздействии.

Наличие травяной и кустарниковой растительности у подножия указывает на частичную стабилизацию старых фрагментов осыпи, однако основная масса материала остаётся не закреплённой и подвижной.

Осыпь представляет собой классический пример активного гравитационного склона с конусом выноса. Она формируется в зоне сочленения высоких скальных обрывов с аккумулятивной долиной, подвержена современным морфодинамическим процессам.

Другой рассматриваемый участок правобережья долины реки Гунт (рис. 5.8). представляет собой яркий пример широкого развития осыпей, образующих сложный гравитационно-аккумулятивный склоновый комплекс. На этом участке можно выделить не менее семи отдельных осыпных шлейфов и тел, каждый из которых демонстрирует свою морфологию и степень активности.

В результате интенсивной тектонической активности и денудационных процессов породы находятся в сильно нарушенном состоянии, что способствует их механическому разрушению. Кроме того, высокая степень трещиноватости усиливает процессы выветривания. Эти условия формируют основу для развития крупномасштабных осыпей, которые растянуты от самых гребневых участков до подножия, где они переходят в аккумулятивную равнину — пойму реки Гунт.

Крайняя левая осыпь представляет собой широкий, равномерно вытянутый шлейф с хорошо выраженным апексом, расположенным под крутым

скальным выходом. Морфология тела симметричная, конусовидная, с регулярной текстурой. Состав осыпи — преимущественно средне- и крупнообломочные фракции, слабо сортированные. Поверхность тела выглядит сглаженной, что свидетельствует о стабилизации в нижней части. Следов недавних перемещений не наблюдается, однако в верхнем ярусе видны участки, где вероятны локальные камнепады.

Вторая и третья осыпи смещены восточнее и формируют парный морфогенетический блок, где тела осыпей частично перекрывают друг друга. Эта зона характеризуется интенсивным накоплением обломочного материала в кулуарных формах. Здесь наблюдаются свежие промоины и узкие борозды, указывающие на влияние временных водотоков. Визуально можно выделить веерообразные формы с расщеплёнными конусами выноса — признак полицикличности процесса.



**Рисунок 5.8.** - Комплекс осипей долины реки Гунт

Центральная часть участка занимает активная осыпь, где ее апекс расположен под остро выраженным кулуаром, где, вероятно, скапливаются и разрушаются блоки. Характерен мощный язык осыпного материала, в верхней

части которого наблюдаются мелкие обломки, а к нижней части происходит сортировка. Материал в апексе — это грубый щебень и глыбы, в основании — галечник и мелкие обломки. Язык тела выходит на террасированную часть поймы, где его границы чётко фиксируются благодаря смене цвета и текстуры почвы. Поверхность этой осыпи покрыта светлым рыхлым материалом без растительности, что указывает на её молодость и активность.

Далее, на восток, следуют ещё три осыпных тела, менее активных. Эти тела сформированы в результате разрушения менее крутых участков склонов. Их форма удлинённая, с широкой нижней частью, практически слившейся с соседними осыпями. Верхние границы выражены слабо, присутствует кустарниковая растительность, что говорит о давно завершившейся активной фазе их формирования.

Общая картина показывает, что осыпи в данном участке представляют собой сложную систему тел, различающихся по морфологии, активности и структуре. Можно выделить три морфогенетических типа осыпей: активные кулуарные, стабилизированные шлейфовые и перекрывающиеся сложные тела. Такое разнообразие объясняется сочетанием факторов: литологическим составом склонов, интенсивностью выветривания, направленностью и скоростью гравитационного перемещения, а также геоморфологической конфигурацией склонов.

Особый интерес представляет взаимодействие осыпей с равнинной частью - с поймой, где расположены населённые пункты и сельхозугодья. Зелёные поля в нижней части изображения частично накладываются на основания осыпей, что свидетельствует об освоении этих участков. Тем не менее, это несёт потенциальную опасность: в случае активизации камнепадов, особенно в условиях резкого снеготаяния или землетрясения, возможны обвалы, блокировка дорог, повреждение коммуникаций и угроза для жителей.

Таким образом, рассматриваемые осыпи правобережного склона долины реки Гунт на Памире являются ярким примером крупномасштабной гравитационной переработки склонов в условиях высокогорной тектонически

активной территории. Их морфология отражает как современную динамику экзогенных процессов, так и историю длительной эволюции склонового рельефа.

Для выявления основных закономерностей, все выделенные осыпи были внедрены в ГИС-формат. Ранее с применением ГИС-технологии и метода соотношения частотности были анализированы аналогичные факторы оползнеобразующих процессов (рис. 5.9).

Осыпи в долине реки Гунт имеют следующие закономерности: коэффициент соотношения частотности повышается по мере увеличения показателя крутизны склонов, и после показателя  $20-30^{\circ}$  данный коэффициент постепенно падает; наибольшую статистическую привязанность осыпи имеют к склонам с северной ориентацией; значительное количество осыпей развито на высоте 1500-2000м.

До появления ГИС одной из невыполнимых задач при изучении закономерностей оползневых явлений было представление этих данных в пространстве. Известны работы, в которых выявлены закономерности оползневых явлений, и даже на основе этих данных предложена карта вероятности возникновения оползней Таджикистана [107]. Однако в связи с ограниченностью пространственного анализа эта карта имеет недостаточную точность. Наши высказывания по поводу ранее проведённых работ никак не снижают их ценность. Каждая проведённая работа имеет своё теоретическое и практическое значение [51, 67, 73, 132].

Исследования, направленные на выявление пространственных закономерностей, сосредоточены на анализе распределения оползневых процессов в зависимости от ключевых факторов их формирования. По нашему мнению, к наиболее значимым параметрам относятся крутизна, экспозиция и кривизна склонов, высотная зональность, удалённость от водоразделов и количество осадков.

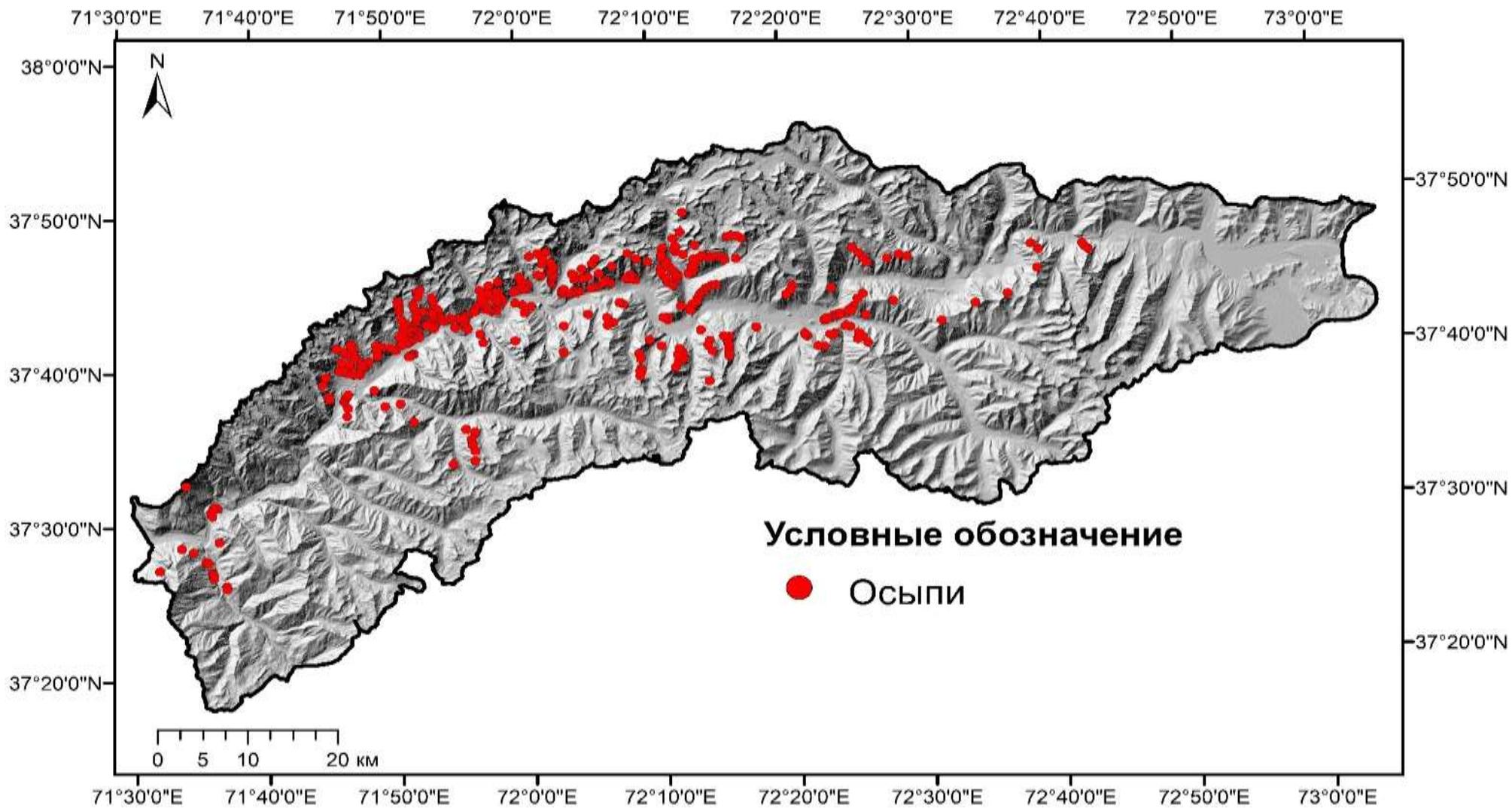


Рисунок 5.9. - Карта распространения осыпей по долине реки Гунт

При изучении пространственных закономерностей экзодинамических процессов особое значение имеет цифровая модель рельефа (ЦМР) [58, 73, 137-140, 145, 146].

**По результату корреляционного анализа крутизны склонов** обнаружено, что коэффициент соотношения частотности по классам этого фактора варьирует от 0,01 до 2,1. Подобно исследованиям оползневых процессов в районе каскада ГЭС на реке Вахш, а также в долинах рек Зарафшон, Обихингоу, Сурхоб и Гунт, наблюдается повышение корреляции с увеличением угла наклона склонов. Однако в отличие от указанных районов, в данном случае коэффициент корреляции не опускается ниже единицы. Коэффициент соотношения частотности достигает своего максимума на предпоследнем классе крутизны склона (табл. 5.1, рис. 5.10). Самый низкий коэффициент наблюдается по склонам с углом наклона до  $5^0$ , что не странно, так как при полевых исследованиях было замечено, что такие морфометрические условия более благоприятны для накопления материалов склоновых процессов.

**Таблица 5.1.** - Результаты расчёта соотношения частотности по крутизне склонов

<b>Крутизна склонов (в градусах)</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>0-5</b>	326033	0,06	92	0,00	0,01
<b>5-10</b>	422690	0,08	492	0,00	0,06
<b>10-20</b>	1089616	0,20	6145	0,05	0,27
<b>20-30</b>	1427522	0,27	24199	0,22	0,81
<b>30-40</b>	1338109	0,25	50200	0,45	1,79
<b>40-50</b>	585173	0,11	25729	0,23	2,10
<b>&gt;50</b>	174692	0,03	5352	0,05	1,46

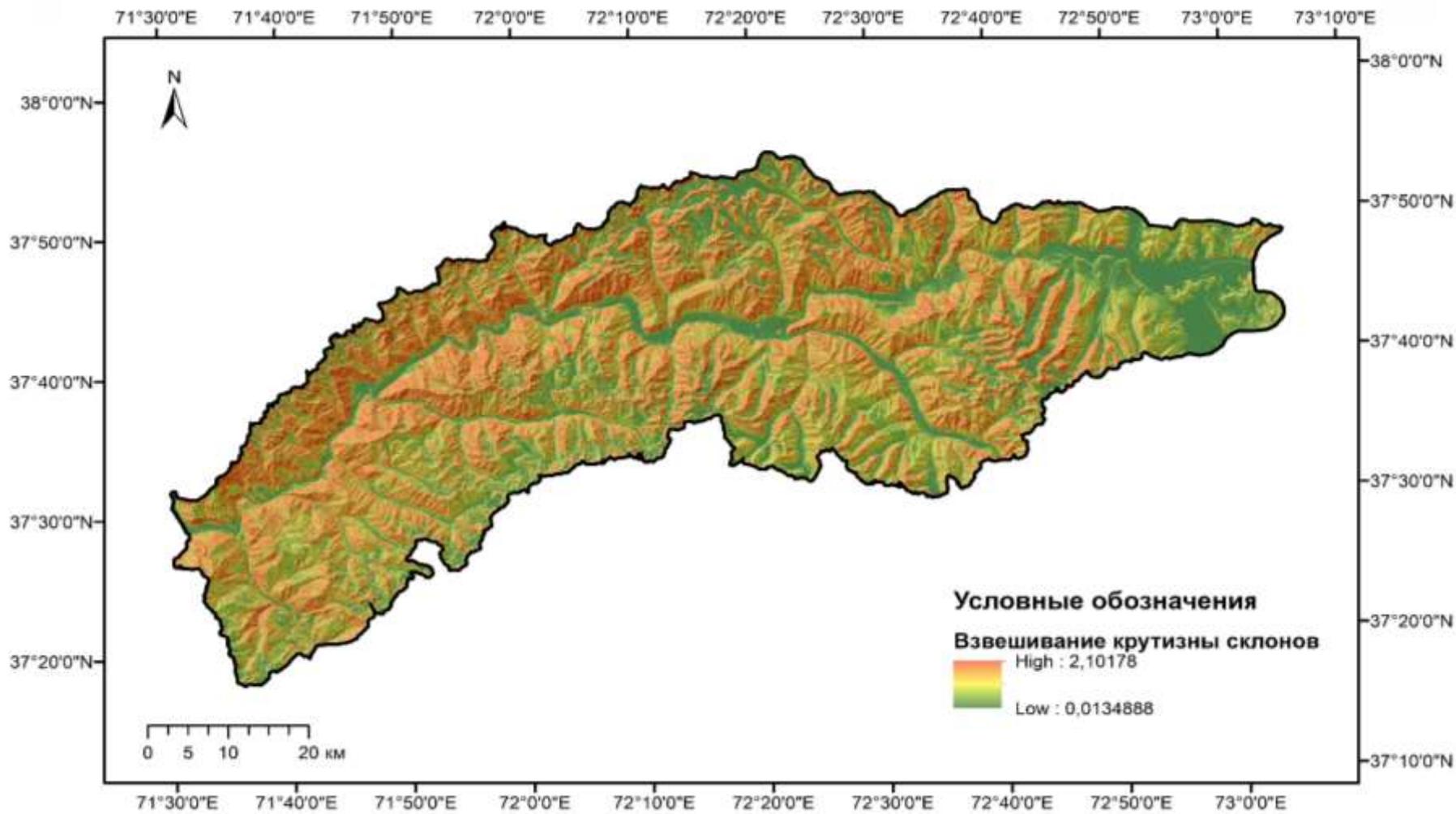


Рисунок 5.10. - Карта, показывающая результаты взвешивания крутизны склонов

**В классах экспозиций** склонов коэффициент соотношения частотности варьируется в пределах 0-1,36, причём максимальное значение приходится на склоны с северо-западной ориентацией. Второе по величине значение коэффициента соотношения частотности наблюдается для предпоследнего класса экспозиции склонов. Склоны, ориентированные на север, занимают третье место по этому показателю. Такой показатель экспозиции склонов, как северная, с одной стороны, благоприятствует сохранности влаги в почве, что в свою очередь является необходимо важным компонентом для растительности, а с другой – путём накопления чрезмерной влаги даёт склону дополнительную нагрузку. В связи с неоднозначностью взаимоотношений этого фактора с оползневыми явлениями результаты анализа интерпретируются везде по-разному.

Кроме отмеченных выше классов экспозиций склонов, также надо отметить южную ориентацию склонов, которая имеет 1,04 коэффициент соотношения частотности. По другим классам этого фактора коэффициент ниже единицы (табл. 5.2). Карта, составленная на основании приведённых расчётов, изображена на рисунке 5.11.

**Таблица 5.2.** - Результаты расчёта соотношения частотности по экспозиции склонов

<b>Экспозиция склонов</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b>∑Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b>∑Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>Ровная</b>	49179	0,01	1	0,00	0,00
<b>Северная</b>	685905	0,13	15886	0,14	1,11
<b>Северо-восточная</b>	650060	0,12	10988	0,10	0,81
<b>Восточная</b>	679277	0,13	8952	0,08	0,63
<b>Юго-восточная</b>	646452	0,12	13352	0,12	0,99
<b>Южная</b>	676628	0,13	14679	0,13	1,04
<b>Юго-западная</b>	674980	0,13	14569	0,13	1,03
<b>Западная</b>	662526	0,12	15548	0,14	1,12
<b>Северо-западная</b>	638828	0,12	18233	0,16	1,36

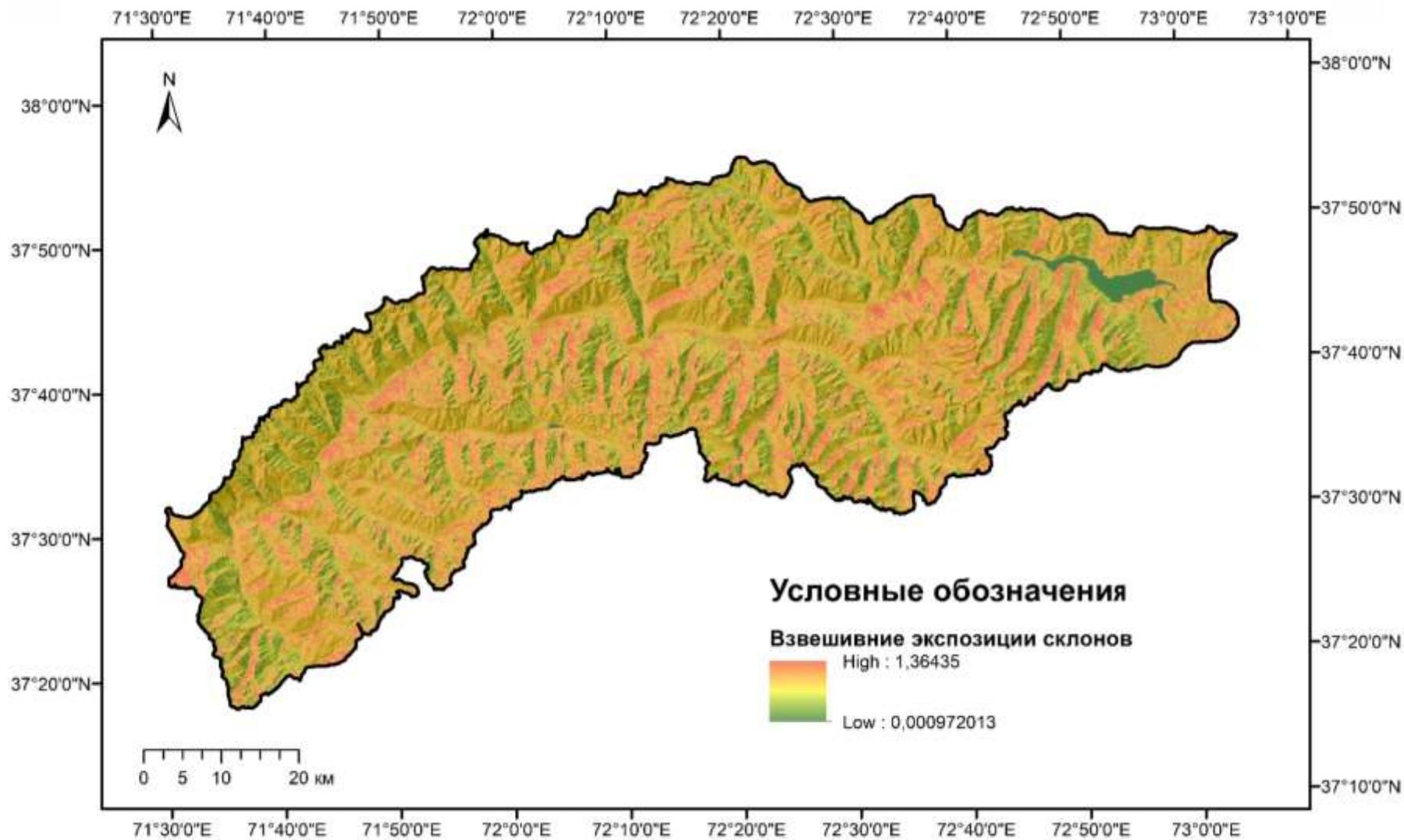


Рисунок 5.11. - Карта, показывающая результаты взвешивания экспозиции склонов

По результату анализа высотной зональности выявлено, что осыпи по классам этого фактора распределены также неравномерно. Согласно этим результатам, самый высокий коэффициент соотношения частотности отмечается на высотных отметках от 3500 до 4000 м. Заметный коэффициент 1,35 соотношения частотности также наблюдается на предпоследнем классе высотной зональности. В трёх остальных классах высотной зональности коэффициент соотношения частотности меняется следующим образом: первый класс - 0,37, второй класс - 0,8 и пятый класс - 0,62 (табл. 5.3).

**Таблица 5.3.** - Результаты расчёта соотношения частотности по высотной зональности

<b>Высотная зональность (м)</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b>∑Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b>∑Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>2048-3000</b>	370560	0,07	2838	0,03	0,37
<b>3000-3500</b>	554436	0,10	9330	0,08	0,80
<b>3500-4000</b>	1176972	0,22	33819	0,30	1,37
<b>4000-4500</b>	1564166	0,29	44207	0,39	1,35
<b>4500-5785</b>	1697701	0,32	22016	0,20	0,62

Результат взвешивания высотной зональности можно видеть на приведённой ниже карте (рис. 5.12).

**Кривизна склонов является**, пожалуй, фактором с наименьшими классами. В долине реки Гунт более наглядные корреляционные связи осыпей наблюдаются со склонами с вогнутой формой, с коэффициентом соотношения частотности, равным 1,747. Наименьшая связь осыпей наблюдается со склонами, которые имеют ровную поверхность. Значительный коэффициент соотношения частотности 1,327 обнаружен и у склонов с выпуклой формой (табл. 5.4).

**Таблица 5.4.** - Результаты расчёта соотношения частотности по кривизне склонов

<b>Кривизна склонов</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>Вогнутая</b>	449730	0,08	16433	0,15	1,747
<b>Ровная</b>	4006127	0,75	70578	0,63	0,842
<b>Выпуклая</b>	907976	0,17	25200	0,22	1,327

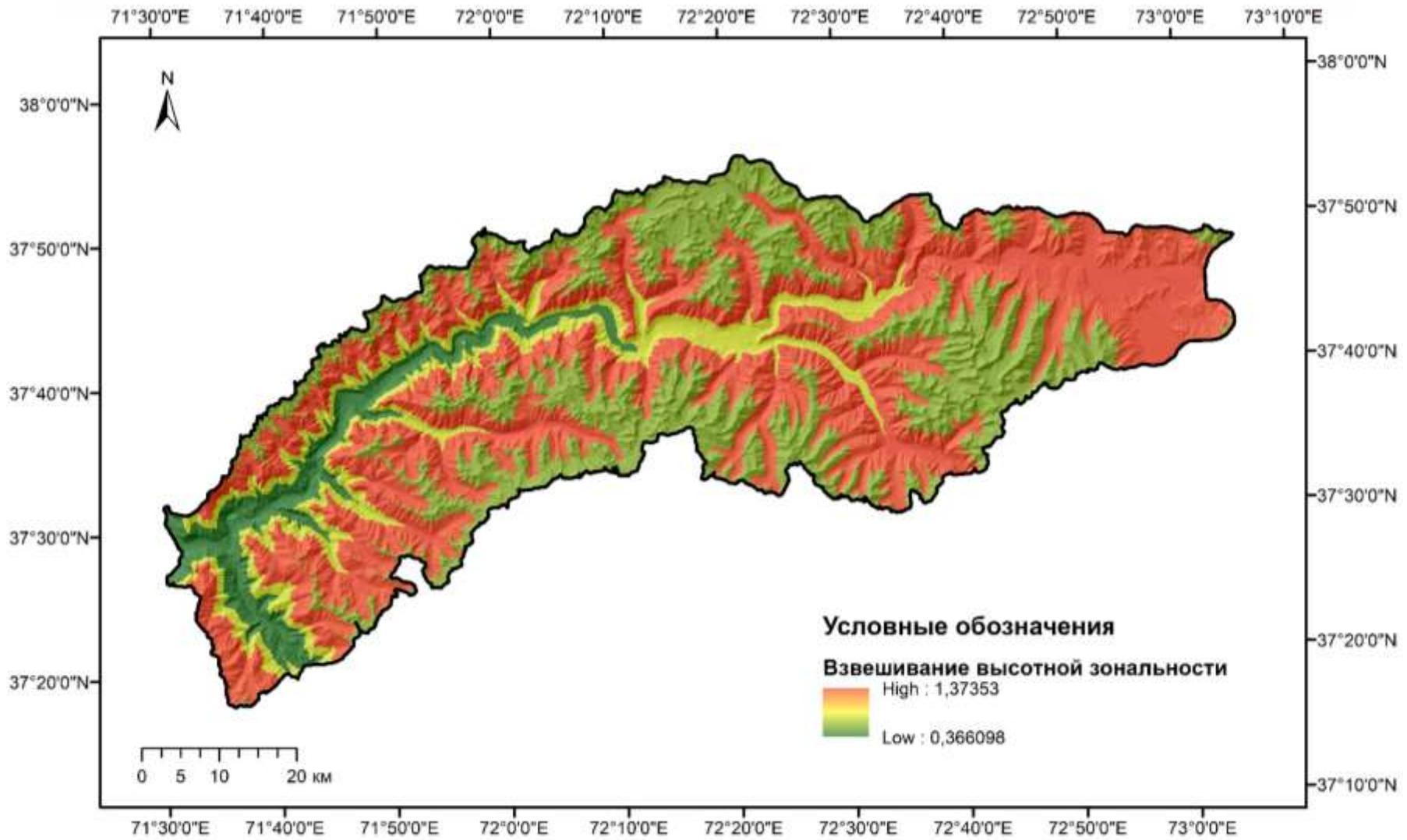
На основании расчёта соотношения частотности по кривизне склонов нами составлена карта (рис. 5.13).

**Распределение атмосферных осадков** по долине реки Гунт варьируется в пределах от 289 до 437 мм в год (согласно карты атмосферных осадков климата).

Несмотря на практически одинаковое количество атмосферных осадков, на исследуемой территории осыпи развиты по классам неравномерно. Последний класс карты атмосферных осадков, по результату наших анализов, можно характеризовать как самый основной показатель этого фактора, где коэффициент соотношения частотности равен 2,02 (рис. 5.14). Приуроченность склоновых процессов к зонам с наибольшим количеством атмосферных осадков уже давно не является секретом. Однако в нашей работе приведены количественные данные взаимоотношений, которые иллюстрируются в виде пространственных закономерностей, что является одним из элементов новизны. Остаются ещё два класса, которые привлекают к себе внимание в связи с коэффициентом соотношения частотности выше единицы, это второй и третий классы (табл. 5.5).

Таблица 5.5. Результаты расчёта соотношения частотности по  
атмосферные осадки

<b>Атмосферные осадки, мм/год</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>289-340</b>	899504	0,17	0	0,00	0,00
<b>340-360</b>	1027746	0,19	25413	0,23	1,20
<b>360-380</b>	539513	0,10	16402	0,15	1,47
<b>380-400</b>	1488934	0,27	8833	0,08	0,29
<b>400-437</b>	1476954	0,27	61593	0,55	2,02



**Рисунок 5.12.** - Карта, показывающая результаты взвешивания высотной зональности

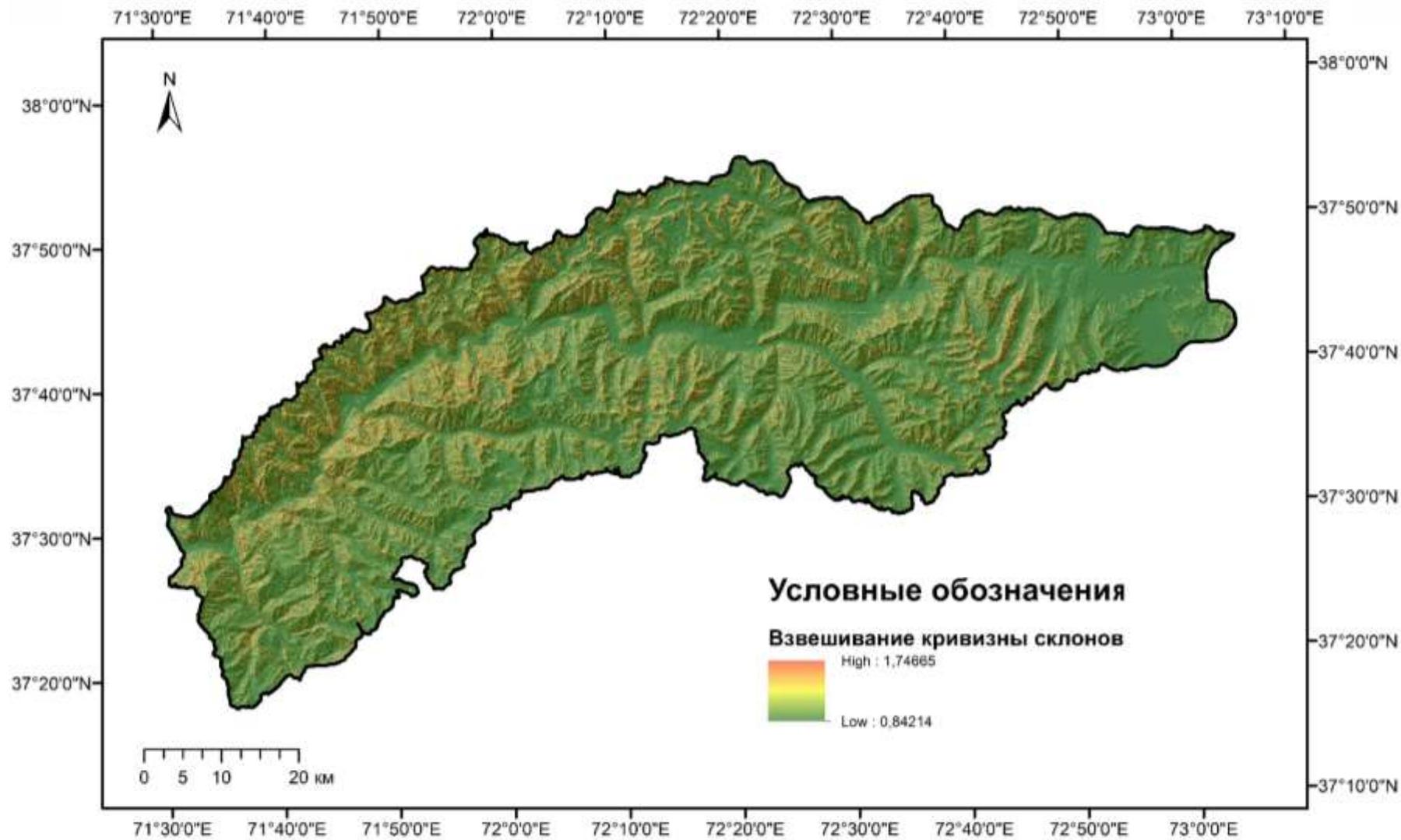
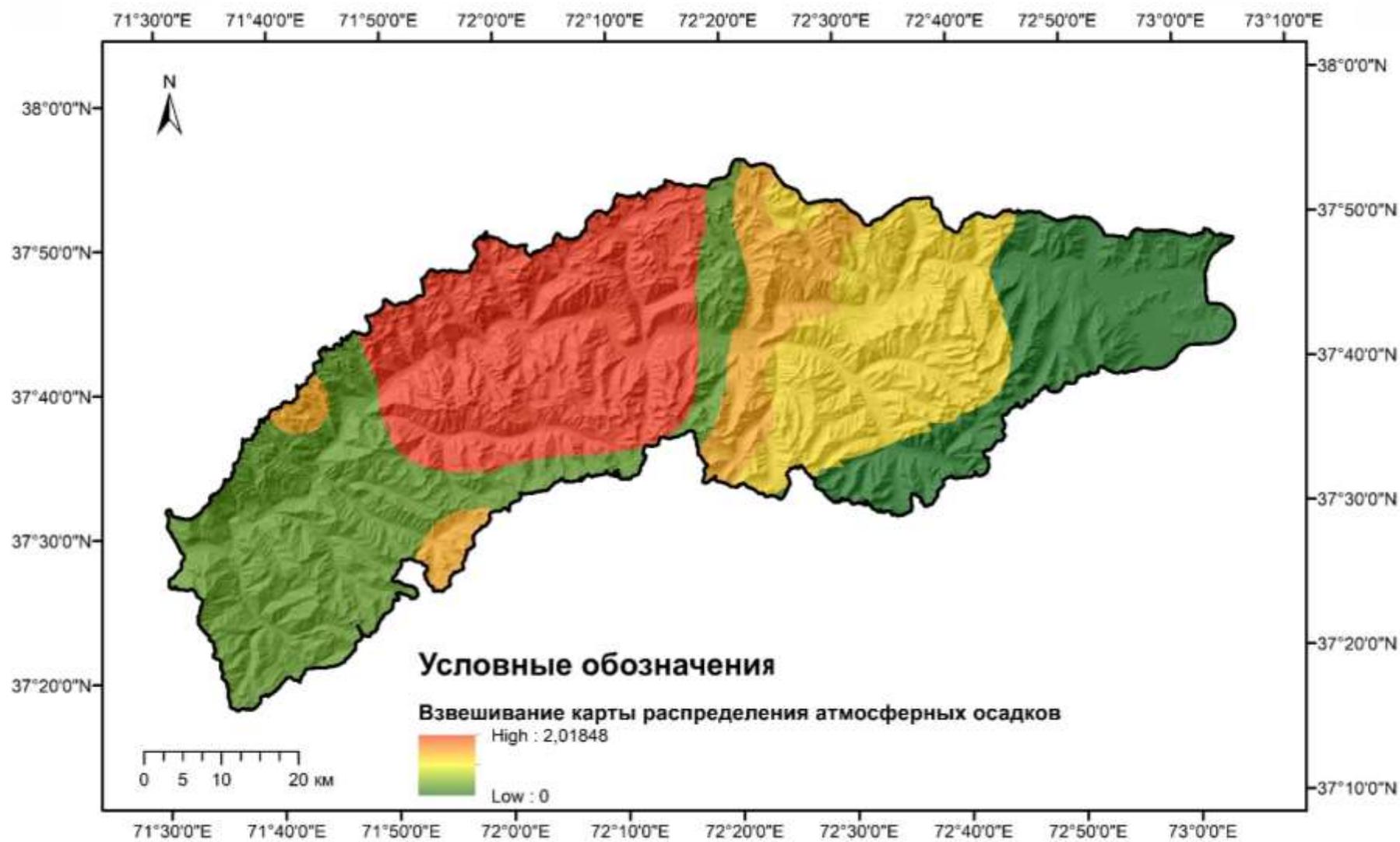


Рисунок 5.13. - Карта, показывающая результаты взвешивания кривизны склонов



**Рисунок 5.14.** - Карта, показывающая результаты взвешивания атмосферных осадков

Пред заключительный этап ознаменовывается созданием карты восприимчивости к возникновению осыпей (рис. 5.15). Созданная нами модель показывает, что зонами с очень высокой восприимчивостью к возникновению осыпей являются верхние части склонов, а в нижних частях склонов уже накапливаются сами материалы.

**Оценка точности модели.** После выявления пространственных закономерностей осыпей и создания модели остаётся только не решённым вопрос о точности модели. Данная процедура проводится с применением ROC анализа, после которой, согласно авторам некоторых публикаций [155, 159-161]. Модель приобретает юридическую силу для дальнейшего использования при решениях задач практического назначения в случае удовлетворительной прогностической способности или не будет рекомендована для дальнейшего использования в случаях неудовлетворительной прогностической способности, что мало вероятно (табл. 5.6).

Из таблицы 5.6 видно, что результат анализа точности модели оценивается пятью критериями. Отличную прогностическую способность модель приобретает, когда более 90% осыпных явлений попадают в зону с очень высокой восприимчивостью к возникновению осыпей.

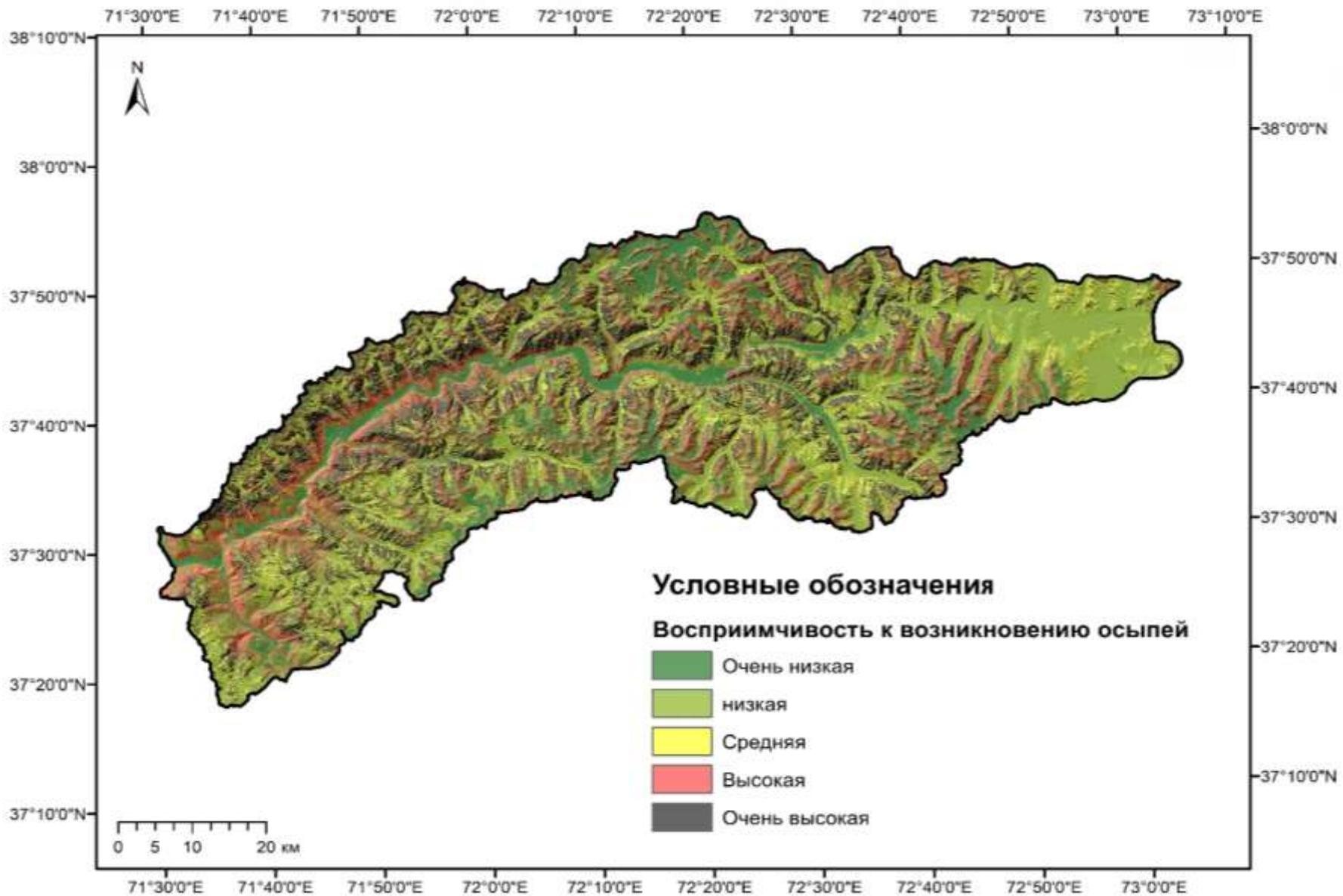
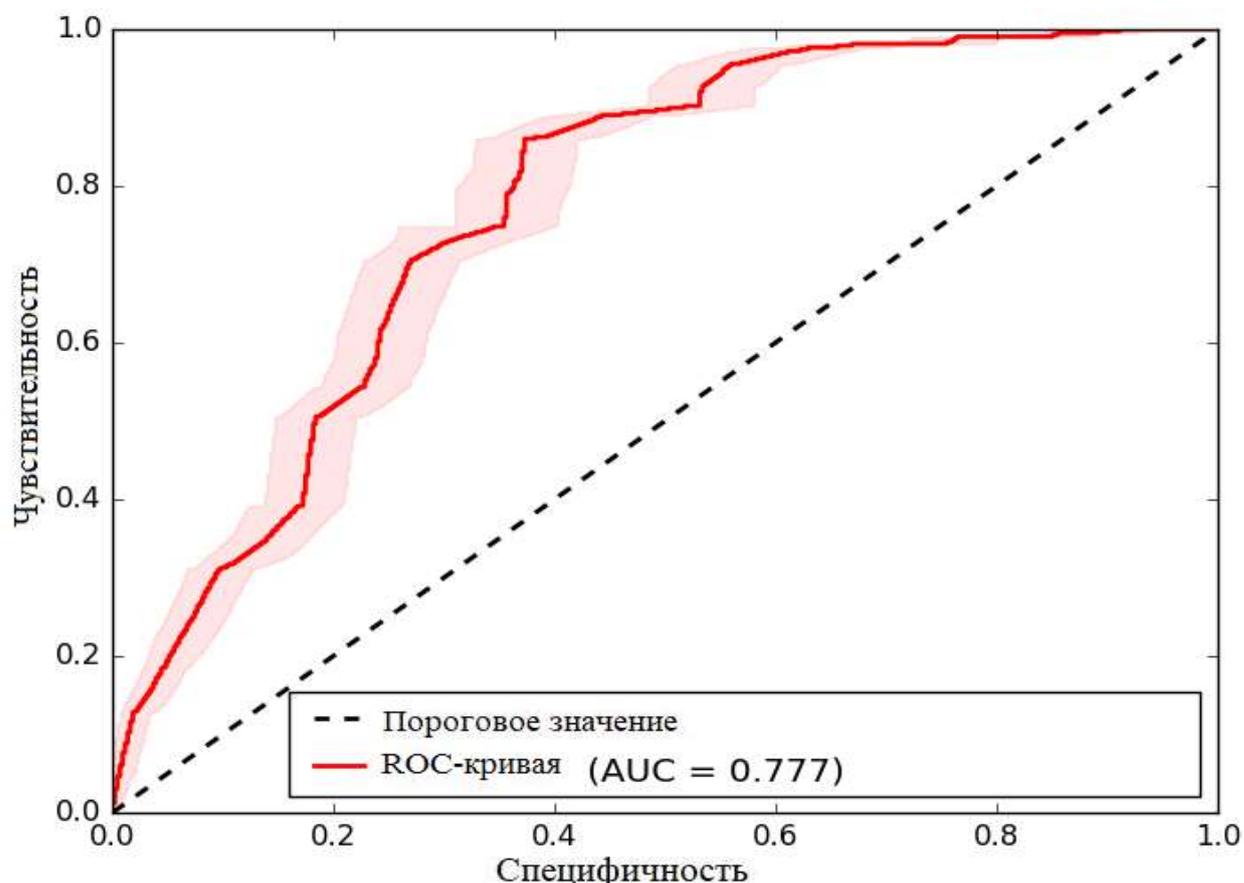


Рисунок 5.15. - Карта восприимчивости территории долины реки Гунт к возникновению осыпей

По анализам уже существующих работ, которые в основном направлены на моделирование восприимчивости к возникновению оползней, результат обычно имеет вышесреднюю прогностическую способность и мало где приобретает среднюю прогностическую способность. Для приобретения модели очень хорошего или отличного значения AUC данные для пространственного анализа должны быть подготовлены очень осторожно, чтобы при оценке точности модели избежать попадания анализируемых явлений в районах с очень низкой восприимчивостью и непопадания в зонах с очень высокой восприимчивостью, которые представляют две основные ошибки при создании модели.

Результат ROC-анализа (рис. 5.16) свидетельствует о хорошей прогностической способности созданной модели восприимчивости территорий к возникновению осыпей. Хорошее качество модели даёт нам право, без каких-либо сомнений, предложить результаты нашей работы к дальнейшему, практическому использованию.



**Рисунок 5.16.** - График, показывающий результат ROC-анализа

**Таблица 5.6.** - Статистические характеристики значения AUC

<b>Интервал AUC</b>	<b>Качество модели</b>
<b>0,9-1,0</b>	Отличное
<b>0,8-0,9</b>	Очень хорошее
<b>0,7-0,8</b>	Хорошее
<b>0,6-0,7</b>	Среднее
<b>0,5-0,6</b>	Неудовлетворительное

**Выводы по пятой главе:**

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к исследованию экзогенных геологических процессов. Особое внимание уделяется оползням, которые являются одними из наиболее подробно изученных видов таких явлений. Вместе с тем, помимо оползней, большое значение приобретает также изучение осыпей.

Изучение пространственных закономерностей осыпей играет важную роль для снижения риска в связи широким их развитием в долине реки Гунт. Статистический анализ факторов позволяет констатировать, что проявления осыпей приурочены к определённым морфометрическим и климатическим условиям. Наиболее ожидаемыми морфометрическими условиями для возникновения осыпей являются склоны с крутизной 40-50<sup>0</sup>, северо-западной ориентации и вогнутой формы. Склоны становятся более уязвимы в зонах с наибольшим количеством атмосферных осадков. Наиболее благоприятными условиями обладают и склоны, находящиеся на отметках от 3500 до 4000 м.

По созданной нами карте восприимчивости территории долины реки Гунт к возникновению осыпей, которая имеет хорошую прогностическую способность, видно, что на склонах изучаемой территории повсеместно можно ожидать процесс осыпания горных пород. Более того, хорошее значение AUC даёт полное право созданной модели быть использованной в практике инженерно-геологических изысканий.

## **ГЛАВА VI. ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ТЕРРИТОРИИ ДОЛИНЫ РЕКИ ГУНТ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ЛАВИН**

Склоновые процессы, особенно лавины, широко распространены в горах Таджикистана, где 93% территории составляют горы. Лавины возникают на крутых склонах в регионах с высоким уровнем снежных осадков. Около 75% территории Таджикистана занимают лавиноопасные зоны. Исследование лавинной опасности на территории страны ещё не завершено. Лавины могут образовываться в любых горных регионах с крутыми склонами и достаточным количеством снега, несмотря на то, что причины их формирования хорошо изучены [53, 116, 117]. Движение лавины зависит от свойств снега и от структуры снежного покрова. С увеличением хозяйственной деятельности в горных регионах человек все чаще сталкивается с явлением, с которым порой трудно бороться: количество зарегистрированных лавин продолжает расти с каждым годом. Из-за значительных запасов завального снега изменяется гидрологический режим рек, что приводит к возникновению внезапных катастрофических мощных селей. Освоение горных территорий продемонстрировало сложность борьбы со снежными обвалами. Огромная разрушительная сила лавин и воздушных волн, возникающих при их падении, в некоторых случаях привела к необходимости понижения уровня порталов существующих тоннелей, чтобы избежать лавиноопасной зоны [47, 48, 143, 144].

В горных регионах, в том числе в долине реки Гунт, лавины часто представляют угрозу для человеческой жизни и деятельности, и здесь лавины случаются довольно часто. Высота снежного покрова в зоне зарождения лавин достигает 1,5-2 метров. Во время сильных снегопадов в долине реки Гунт наблюдается большое количество лавин, что, безусловно, сказывается на экономике страны. Зимой во время обильных снегов лавины встречаются во всех горных склонах там, где может накапливаться снег, скользящие снежные лавины представляют значительную угрозу для автомобильных дорог. Эти

лавины могут повторяться в одних и тех же местах, однако предсказать точное время их возникновения остаётся сложной задачей, особенно там, где есть крутые склоны и обильные снежные осадки. Хотя учёные хорошо понимают факторы, способствующие их образованию, такие, как температура, тип снега и уклон, предсказать конкретный момент схода лавины всё ещё сложно. Внезапность лавин может привести к трагическим последствиям, включая потери человеческих жизней и разрушение инфраструктуры. Поэтому важно развивать системы предупреждения и проводить обучение людей, находящихся в таких регионах, чтобы минимизировать риски и повысить безопасность. Юго-западный Памир, в том числе долина реки Гунт, — это гористая местность, подверженная сейсмическим воздействиям, с крутыми склонами, разрушенной литологией и ледниками на высоких вершинах. Район работ является одним из самых уязвимых и ежегодно сталкивается с лавинами из-за различных факторов [54, 118].

С помощью программы Google Earth Pro были зафиксированы 83 лавины в этой долине. На территории долины реки Гунт определены зоны схода лавин площадного и лоткового типа. Сход лавин в основном происходит в феврале и апреле, причем наибольшую опасность представляют сухие лавины с волнами воздушного удара. Катастрофы, приводящие к гибели людей и наносящие значительный материальный ущерб, а также крайне сложные условия борьбы с обвалами, обуславливают необходимость теоретического исследования лавинообразования и определения признаков лавиноопасной ситуации. В технической литературе для дорожников вопрос лавин часто либо не рассматривается, либо обсуждается недостаточно подробно [155-158]. В зимний и весенний периоды наблюдаются лавины различных объемов. В последние годы на территории города было зафиксировано свыше 70 лавинных точек в более чем 15 различных местах.

Во время сильных снегопадов в долине реки Гунт происходят многочисленные лавинообразования, что существенно сказывается на

экономике города. 15 февраля 2023 года в Хороге произошёл сход лавины, в результате которого погибли 13 человек, а 30 получили ранения.

Для жителей города Хорога это стало шокирующим событием. В тот день было много снега, и хотя ожидали схода лавин, никто не предполагал, что это произойдет в такой разрушительной форме. Согласно анализу предыдущих данных, в 1945, 1969 и 2012 годах в этом районе были зафиксированы лавины, которые нанесли ущерб народному хозяйству.

Визуальное инженерно-геологическое исследование района, пострадавшего от схода лавины 15.02.23, выявило, что основным фактором её возникновения стал сильный снегопад. Он привёл к накоплению большого объёма снега на склонах рядом с горными вершинами региона, что снизило их устойчивость и в результате привело к сходу лавины (рис. 6.1).

Высота вершины склона, с которого произошёл сход лавины, достигает примерно 2800-3000 метров над уровнем моря, при этом уклон склонов в зоне отрыва лавины варьируется от 35 до 45 градусов, что является оптимальным для развития снежных лавин.

Расположение лавиноопасного участка находится в непосредственной близости от городской застройки, что создаёт повышенную опасность для населения и объектов инфраструктуры. Наличие данного геоморфологического фактора требует особого внимания к вопросам инженерной защиты и мониторинга данного района.

В преддверии схода лавины 15 февраля 2023 года наблюдались неблагоприятные метеорологические условия, способствовавшие накоплению и неустойчивости снежного покрова. За период 7–10 дней до схода отмечалось значительное выпадение осадков преимущественно в виде снега, что привело к резкому увеличению толщины снежного покрова на крутых склонах. Суммарное количество осадков за этот период превысило среднемесячную норму, что создало предпосылки для формирования избыточной массы снега.

Место схода лавины характеризуется сложной геологической структурой, включающей кристаллические и метаморфические породы, а также осыпные и

осадочный отложения, образовавшиеся вследствие разрушения горных пород и выноса материалов потоками и ледниками. Основная масса склонов сложена гранитами, гнейсами и сланцами с множеством трещин и зон разрушения, что снижает их устойчивость. Рельеф района характеризуется крутыми и обрывистыми склонами с углами наклона в зоне схода лавины от 35 до 45 градусов, что является критическим для формирования снежных лавин. Наличие многочисленных оврагов и осыпных конусов способствует локальному накоплению рыхлых пород и снега. Важным фактором является присутствие структурных нарушений — трещин, которые уменьшают прочность пород основания склонов и создают зоны слабости, по которым лавинные массы могут соскальзывать. Рыхлые осыпные отложения, расположенные у подножия склонов, дополнительно способствуют снижению сцепления снежного покрова с поверхностью, облегчая процесс срыва снега и льда.

Процесс образования лавины начался с интенсивного накопления снега на крутых склонах, где слои снега неоднородно оседали, формируя слабые прослойки внутри снежного покрова. Когда масса снега превысила критическую точку устойчивости, произошёл срыв снежного покрова в зоне с уклоном около 40°, с последующим стремительным сползанием массы вниз.

Лавина достигла окраин городской застройки Хорога, вызвав повреждения жилых домов, административных зданий и транспортных коммуникаций. Были частично разрушены дороги и линии электропередач, что затруднило работу служб экстренного реагирования (рис. 6.2).

Социально-экономические последствия включают эвакуацию жителей пострадавших кварталов, временную потерю жилых площадей, а также убытки для местного бюджета из-за восстановления инфраструктуры. Лавина создала угрозу жизни и здоровью населения, подчеркнув необходимость улучшения системы предупреждения и защиты.

Основными причинами схода лавины стали неблагоприятные климатические условия — интенсивный снегопад, резкие температурные

колебания и ветровая нагрузка, а также геологическая и морфологическая предрасположенность склонов к лавинообразованию.

Антропогенный фактор также сыграл важную роль: близость жилой застройки к лавиноопасным склонам и недостаток инженерных защитных сооружений повысили риск схода лавины.



**Рисунок 6.1.** - Сход лавины в городе Хорог 15 февраля 2023 года: общий вид лавинной трассы и устьевой зоны



**Рисунок 6.2.** - Последствия схода лавины в городе Хорог

Лавинообразование также наблюдались в прелюдах 1000-1500м к западу от г. Хорог. Как видно (рис. 6.3) на склоне видны длинные, узкие полосы, по которым сошёл снежный покров. Эти следы оголяют каменистую поверхность, что указывает на значительное количество снега, которое переместилось вниз по склону. Полосы имеют четкую направленность вниз по склону, что подтверждает, что лавина двигалась под действием силы тяжести, вероятно, с большой скоростью. Судя по длине и узкой форме следов, это плотная снежная лавина, которая сошла с крутых склонов горы. Такие лавины обычно образуются из-за перегрузки снежных слоев, когда верхние слои снега становятся слишком тяжелыми для нижних. По механизму образования лавины возникли в результате нарушения устойчивости снежного покрова на крутом склоне. Угол наклона, визуальное оцениваемый в диапазоне 30-45°, соответствует типичным условиям для лавинообразования. Основные факторы, способствующие образованию этих лавин в первую очередь, являются длительные снегопады, которые могут привести к образованию рыхлого снега, который затем может стать причиной лавин.

Склон горы сложен из трещиноватых скальных пород, что способствует накоплению снега в отдельных зонах и снижению сцепления снежных слоёв. Наличие камней и скал на поверхности может служить дополнительным фактором, способствующим срыву снежной массы, так как они могут создавать точки слабости в снеговом слое.

Лавинные следы протяжённые и охватывают значительную часть склона, что указывает на крупный сход снежной массы. Данная территория демонстрирует типичный пример лавинного процесса в долине реки Гунт, где сочетание крутых склонов, трещиноватого геологического основания и сезонных изменений температуры приводит к срыву снежных масс. Изучение таких лавинных следов имеет важное значение для оценки лавиноопасности и разработки мер по предотвращению связанных с ними природных катастроф.



**Рисунок 6.3** - Лавиноопасный участок долины реки Гунт

Для снижения ущерба от лавин проводятся исследования в различных областях. Широко применяются технологии дистанционного зондирования, цифровой анализ изображений и инструменты Географических информационных систем (ГИС) для обработки пространственных данных и оценки уязвимости к лавинам. Инвентаризация лавин является первым шагом к оценке уязвимости, предоставляя информацию о пространственном распределении, времени возникновения лавины в данной местности [141, 142, 149].

С применением ГИС и цифровой модели рельефа с разрешением 30м (DEM) были проанализированы кривизна склонов, крутизна склонов, экспозиция склонов, высотная зональность и атмосферные осадки [70, 73,151,152]. Изучая лавиноопасность, мы использовали современные методы. Для анализа существующих лавин и выявления факторов их образования были использованы данные дистанционного зондирования. В ходе работы выполнен корреляционный анализ данных в ГИС-пространстве с использованием метода коэффициента частотности.

В результате основные задачи исследования были сформулированы как выявление пространственных закономерностей лавинных процессов на

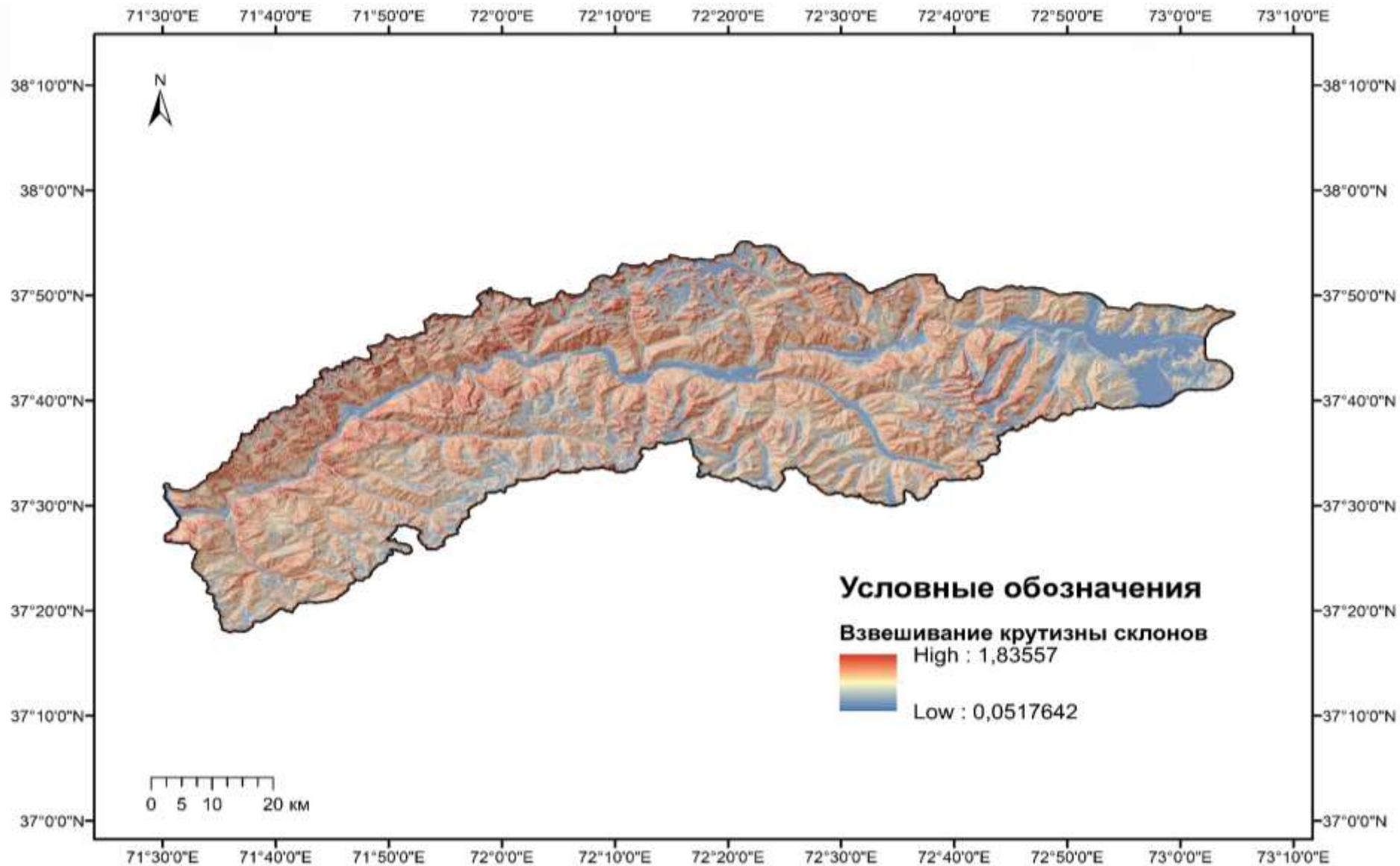
рассматриваемой территории и разработка моделей восприимчивости к их возникновению [73, 153, 154, 164]. Учитывая все важные факторы, в программе пространственного анализа ArcGIS Desktop 10.6.1 была разработана карта, отображающая восприимчивость к возникновению лавин (рис. 6.4).

**Факторы, способствующие возникновению лавин.** Создание карты восприимчивости к оползням предполагает формирование пространственной базы данных, из которой извлекаются ключевые факторы, способствующие их возникновению. В рамках данного исследования были определены следующие факторы, влияющие на возникновение лавин [73]: крутизна склонов, экспозиция склонов, высотная зональность и кривизна склонов.

**Результат анализа крутизны склонов.** Обнаружено, что коэффициент соотношения частотности по классам данного фактора колеблется в пределах от 0,05 до 1,84. Этот результат свидетельствует о том, что максимальная уязвимость для возникновения лавины наблюдается на склонах с углом до 50 градусов. Следует отметить, что значения 1,59, 1,41 и 1,11 также указывают на уязвимость классов. Судя по конечному результату взвешивания данного фактора, самыми вероятными зонами для возникновения лавин можно считать участки с углами наклона от 20 до 50 градусов (табл. 6.1 и рис. 6.4).

**Таблица 6.1.** - Результаты расчёта соотношения частотности по крутизне склонов

<b>Крутизна склонов (в градусах)</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b><math>\sum</math>Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b><math>\sum</math>Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>0-5</b>	326033	0,06	90	0,00	0,05
<b>5-10</b>	422690	0,08	328	0,01	0,15
<b>10-20</b>	1089616	0,20	3050	0,11	0,52
<b>20-30</b>	1427522	0,27	8428	0,29	1,11
<b>30-40</b>	1338109	0,25	10039	0,35	1,41
<b>40-50</b>	585173	0,11	4964	0,17	1,59
<b>&gt;50</b>	174692	0,03	1710	0,06	1,84



**Рисунок 6.4.-** Карта результатов взвешивания крутизны склонов

**Экспозиция склонов** в этом классе соотношения частотности изменяется в пределах от 0 до 1,58, при этом наибольшее значение наблюдается у склонов с северо-западной ориентацией. Поскольку значения, превышающие единицу, указывают на наиболее благоприятные участки для возникновения лавин, результаты по соотношению частотности распределяются следующим образом: северная экспозиция — с показателем 1,35, восточная — с показателем 1,22, северо-восточная ориентация — с показателем 1,16, а западная — с показателем 1,09. Это означает, что юго-западная, южная и юго-восточная ориентации не являются уязвимыми зонами для возникновения лавин (табл. 6.2, рис. 6.5).

**Таблица 6.2.** - Результаты расчёта соотношения частотности по экспозиции склонов.

<b>Экспозиция склонов</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b>∑Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b>∑Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>Ровная</b>	49179	0,01	1	0,00	0,00
<b>Северная</b>	685905	0,13	4925	0,17	1,35
<b>Северо-восточная</b>	650060	0,12	4025	0,14	1,16
<b>Восточная</b>	679277	0,13	4408	0,15	1,22
<b>Юго-восточная</b>	646452	0,12	3025	0,11	0,88
<b>Южная</b>	676628	0,13	921	0,03	0,26
<b>Юго-западная</b>	674980	0,13	2060	0,07	0,57
<b>Западная</b>	662526	0,12	3442	0,13	1,09
<b>Северо-западная</b>	638828	0,12	5396	0,19	1,58



Рисунок 6.5. - Карта результатов взвешивания экспозиции склонов

**Результат анализа высотной зональности.** Расчёты соотношения частотности высотной зональности показывают, что с увеличением высотных интервалов их количество сначала возрастает, достигая максимума до 8,01 в интервале 2048–3000 м, а затем резко снижается до 2,96 в интервале 3000–3500 м (табл. 6.3, рис. 6.6).

**Таблица 6.3.** - Результаты расчёта соотношения частотности по высотной зональности

<b>Высотная зональность (м)</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b><math>\Sigma</math>Ncell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>2048-3000</b>	370560	0,07	15829	0,55	8,01
<b>3000-3500</b>	554436	0,10	8767	0,31	2,96
<b>3500-4000</b>	1176972	0,22	2831	0,10	0,45
<b>4000-4500</b>	1564166	0,29	807	0,03	0,10
<b>4500-5785</b>	1697701	0,32	379	0,01	0,04

**Кривизна склонов.** При разработке модели восприимчивости к оползням учитывается также кривизна склонов. Анализ связи данных с показателями кривизны склонов показал, что в каждом случае склоны с вогнутой поверхностью имеют более высокие значения веса. Хотя в связи с тем, что склоны с выпуклой формой имеют значения соотношения частотности больше единицы, их также можно включить в состав уязвимых классов. Ровная поверхность склона, имея значения соотношения частотности меньше единицы, рассматривается как наиболее неподверженная лавинам. Однако, как показывают недавние происшествия, связанные с лавинами, ровные участки рельефа, где в основном и расположены все дома и сооружения, подвергаются риску больше всех, так как эти участки являются местами, где лавины осуществляют свою разрушительную деятельность (табл. 6.4, рис. 6.7).

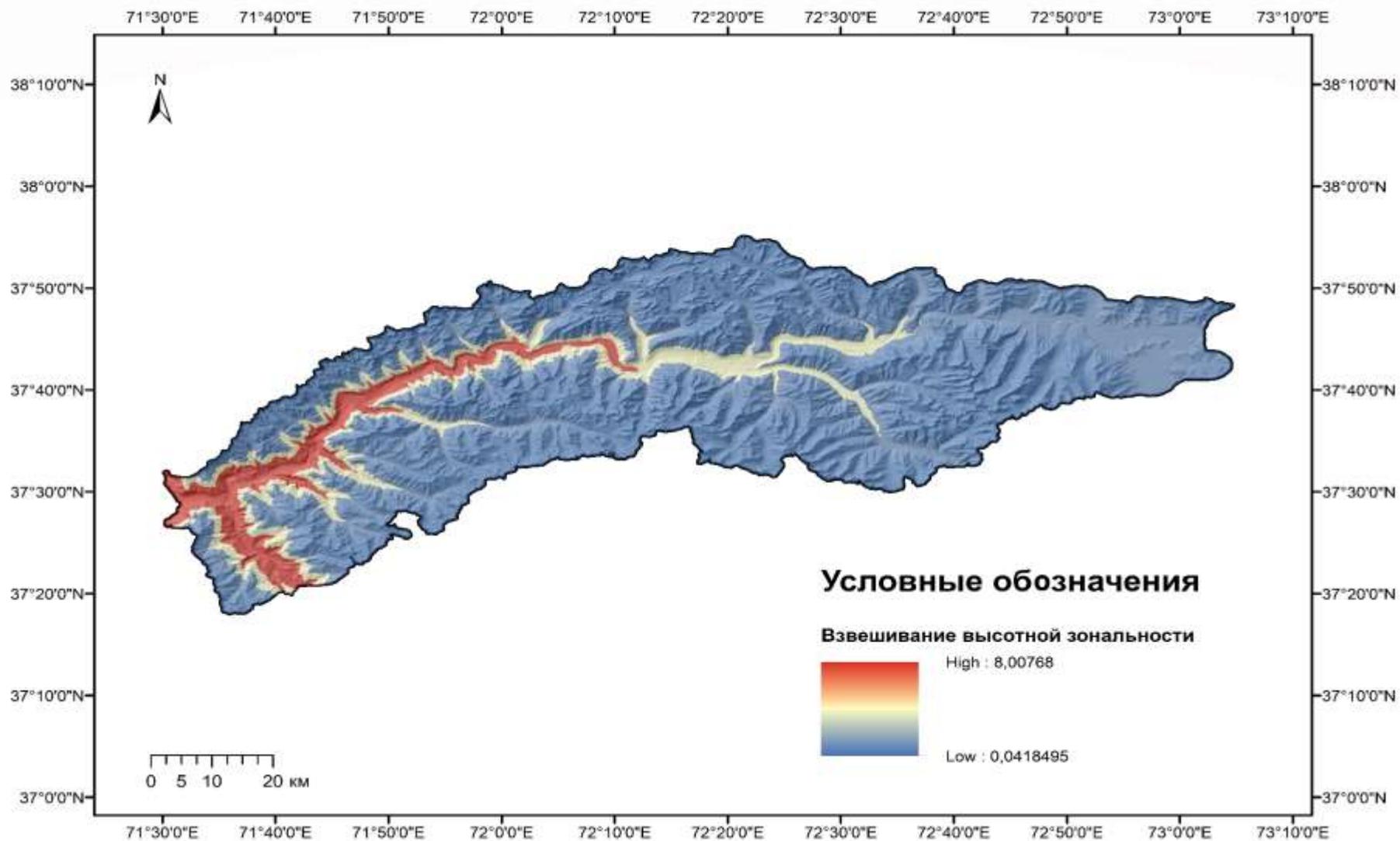
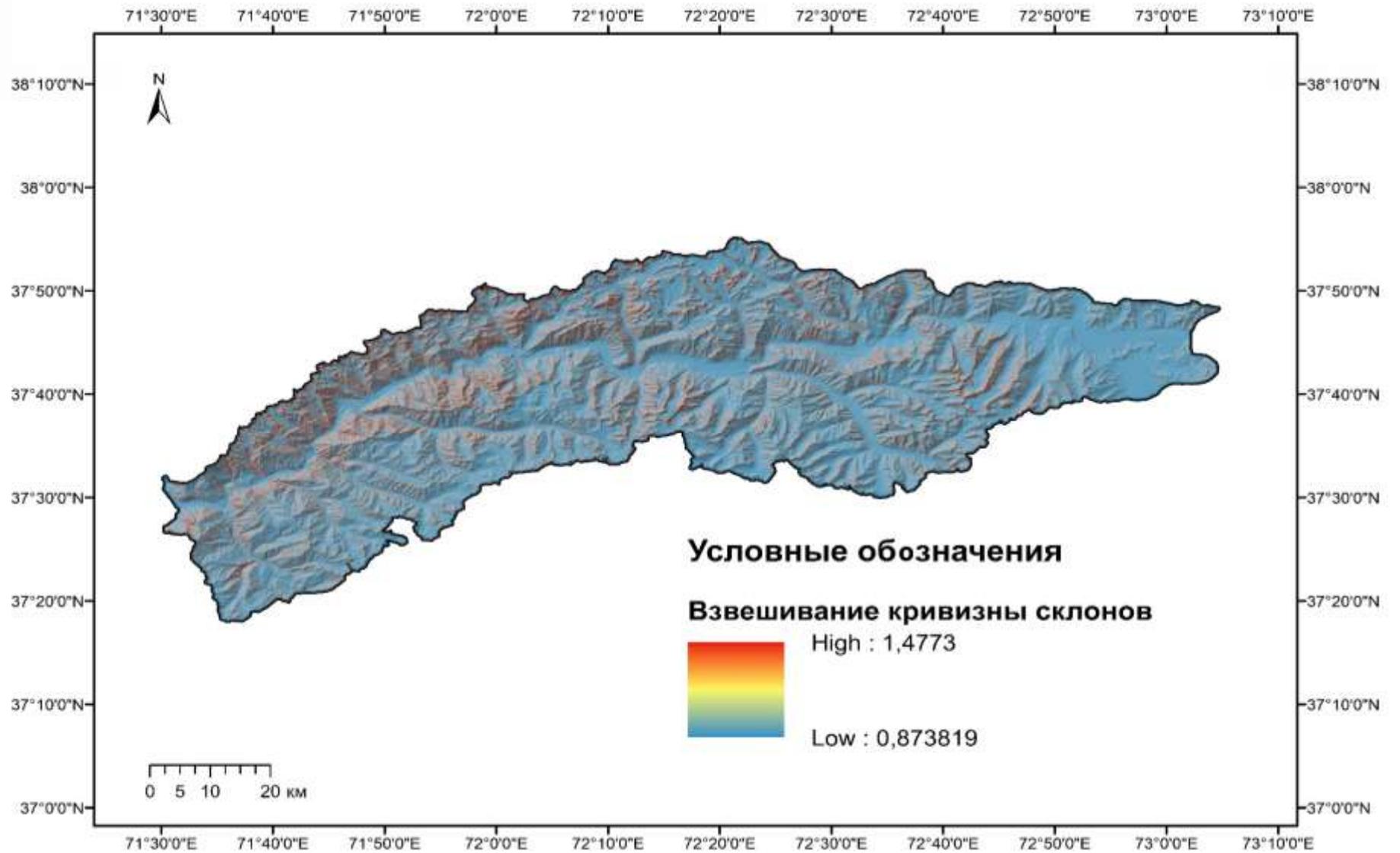


Рисунок 6.6. - Карта результатов взвешивания высотной зональности



**Рисунок 6.7.** - Карта результатов взвешивания кривизны склонов

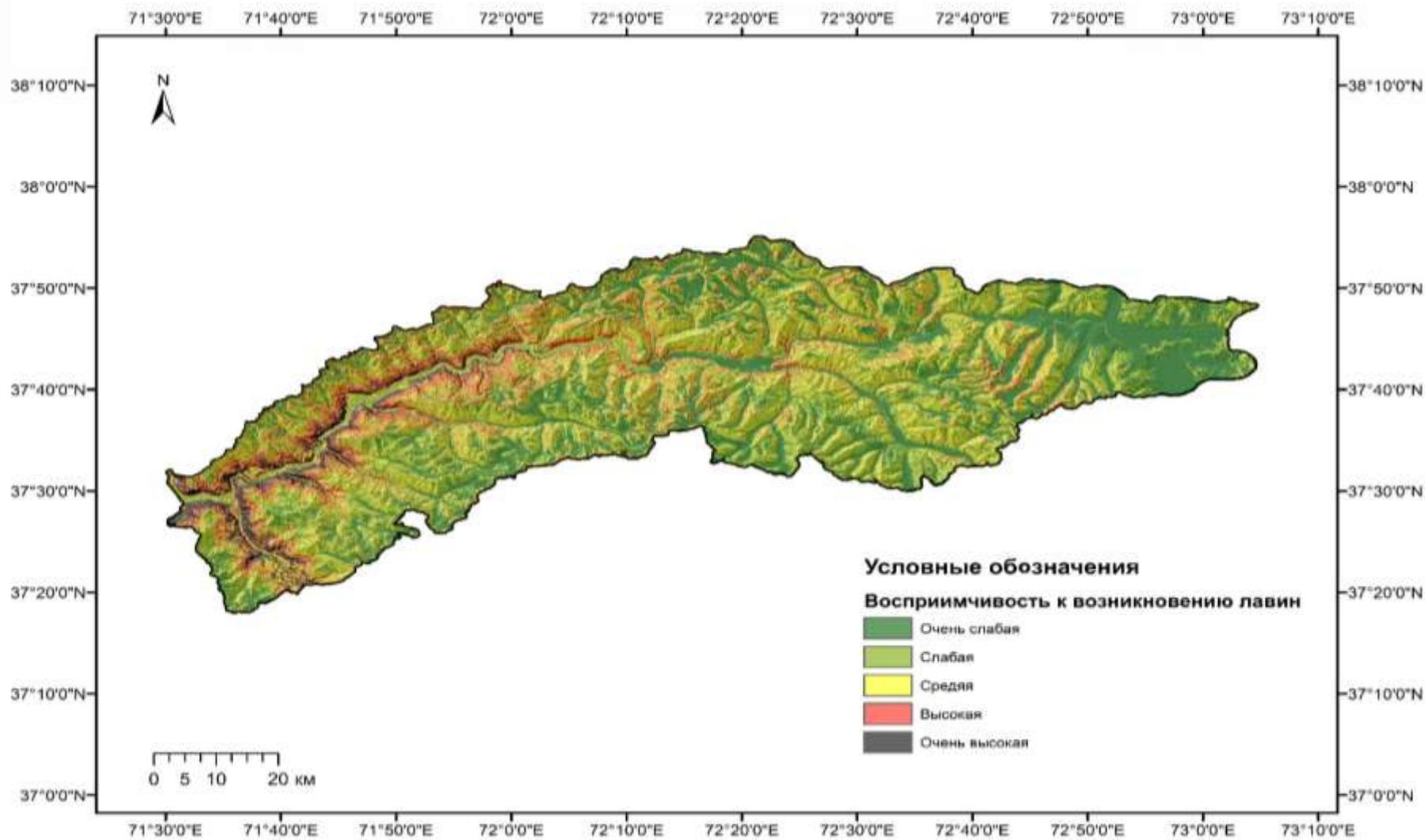


Рисунок 6.8. - Карта восприимчивости к возникновению лавин долины реки Гунт

**Таблица 6.4.** - Результаты расчёта соотношения частотности по кривизне  
склонов

<b>Кривизна склонов</b>					
<b>Класс</b>	<b>Ncell(Ni)</b>	<b>ΣNcell(Ni)</b>	<b>Ncell(Si)</b>	<b>ΣNcell(Si)</b>	<b>FR<sub>i</sub></b>
<b>Вогнутая</b>	449730	0,08	3543	0,12	1,477
<b>Ровная</b>	4006127	0,75	18668	0,65	0,874
<b>Выпуклая</b>	907976	0,17	6393	0,22	1,320

Для анализа существующих лавин и определения факторов их формирования использовались данные дистанционного зондирования. В ГИС-пространстве был проведён анализ факторов, влияющих на возникновение лавин, с применением метода соотношения частотности. Учитывая все значимые факторы, в программе пространственного анализа ArcGIS Desktop 10.6.1 была создана карта, отображающая восприимчивость к лавинным явлениям. На карте показано, что чёрный цвет соответствует очень высокой восприимчивости, что означает, что участки, отмеченные чёрным, являются наиболее подверженными лавинной опасности (рис. 6.8).

#### **Выводы по шестой главе**

В заключение можно сделать вывод, что лавины представляют собой серьёзную опасность для долины реки Гунт, способствуя разрушениям и унося жизни людей. Основными факторами, вызывающими лавины, являются крутизна склонов, экспозиция склонов, высотная зональность и кривизна склонов. Тем не менее, современные методы позволяют анализировать влияние этих факторов на возникновение лавин. Один из методов, использованных в данной работе, — это метод соотношения частотности. С помощью этого метода можно определить и создать карту восприимчивости к возникновению лавин.

По результатам анализа, участки долины реки Гунт с углом крутизны склонов от 20 до 50 градусов оказались наиболее уязвимыми для возникновения лавин. Также высокое соотношение частотности лавинообразования наблюдается на склонах с северо–западной экспозицией, на высотах от 2048 до 3000 м, и на участках с вогнутой кривизной.

В горных регионах рекомендуется использовать метод соотношения частотности, этот метод позволяет определить восприимчивость к возникновению лавин и является полезным инструментом для выявления мест их образования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Модели восприимчивости территории долины реки Гунт к возникновению анализированных экзодинамических процессов являются результатами интегрирования всех взвешенных факторов. Для получения максимально точных результатов моделирования, в процесс надо включить самые необходимые факторы. Подобными факторами при изучении экзогенных геологических процессов для района исследования оказались атмосферные осадки, крутизна склонов, высотная зональность, кривизна склонов и пиковое ускорение грунтов. Все анализируемые факторы охватывают климатические, морфометрические и геологические условия. Таким образом, наши результаты позволили смоделировать картину восприимчивости на весьма высоком уровне точности [2-А], [5-А], [6-А].
2. Для повышения точности результатов взвешивания нами применён метод коэффициента частотности. Этот подход ранее успешно использовался при исследовании территории каскада ГЭС на реке Вахш. Учитывая положительные результаты его применения, данный метод был выбран для решения задач, поставленных в данной диссертационной работе [1-А].
3. Выбор пространственного разрешения цифровой модели рельефа (ЦМР), используемой для построения морфометрических факторов оползнеобразования, не был случайным. Перед его определением был проведён анализ ряда научных исследований, в которых рассматривалось влияние разрешения ЦМР на качество результатов. По итогам этого анализа было установлено, что разрешение 30 м является оптимальным для условий изучаемой территории [3-А], [4-А], [5-А].
4. Климатические, морфометрические и геологические условия долины реки Гунт способствуют развитию экзодинамических процессов, которые сопровождаются человеческими жертвами и значительным материальным ущербом. Практически каждый год местные жители данного региона

испытывают трудности в продвижении автомобилей разрушаются линии электропередач [2-А].

5. Все созданные модели показывают очень хорошую картину будущих зон возникновения оползней, осыпей и лавин. При анализе прогностической способности модели восприимчивости к возникновению осыпей долины реки Гунт более 77% осыпей совпали с зонами с очень высокой и высокой восприимчивостью [2-А], [6-А].

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

Опираясь на итоги исследования, представляем следующие рекомендации:

1. В связи с тем, что дороги, проходящие по долине реки Гунт, являются стратегически важными линейными сооружениями для Республики Таджикистан, созданные модели восприимчивости к возникновению анализируемых экзогенных геологических процессов имеют большое значение для снижения степени риска. В зонах с высокой и очень высокой восприимчивостью рекомендуется проводить некоторые пассивные мероприятия. В особенности показана посадка деревьев на склонах, предрасположенных к возникновению оползней, осыпей и лавин.

2. В данной работе для прогноза лавин впервые использован статистический метод соотношения частотности, который показал приемлемый результат для практического применения модели восприимчивости территории долины реки Гунт к возникновению лавин. В связи с этим полученный результат даёт нам полное право использовать данный метод для определения наиболее восприимчивых зон к лавинам и рекомендовать его для других лавиноопасных районов Республики.

3. Для участков с высокой и очень высокой восприимчивостью к рассматриваемым георискам рекомендуется использовать детерминистические методы, что позволит затем разработать комплекс эффективных мероприятий по предотвращению этих явлений.

4. Особое внимание следует обращать на склоны с высокой и очень высокой восприимчивостью к осыпным процессам, поскольку реализация активных мероприятий по их стабилизации связана с значительными финансовыми затратами.

5. В связи с этим, жителям данного региона следует строить свои дома как можно дальше от склонов. Там, где неизбежно возведение построек таких, как линейные сооружения (дороги и линии электропередачи), рекомендуется

возведение галерей и выравнивание крутых склонов, в особенности тех, по которым проходят разломы, делая склон более предрасположенным к образованию осыпей.

## ЛИТЕРАТУРА

### Монографии, учебники, учебные пособия:

1. Архипов, И.В. Особенности истории развития Памира в альпийское время и его современная тектоническая структура / И.В. Архипов // В кн. Тектоника Памира и Тянь-Шаня. М., Наука, 1964. 167 с.
2. Ананьев В.П. Инженерная геология: Учебное пособие / В.П. Ананьев., В.И. Коробкин // – М. Издательство Высшая школа, 1973. с.215-224.
3. Ачилов Г.Ш., Сейсмичные зоны Памира. Геология и геофизика Таджикистана / Г.Ш. Ачилов, А.М. Бабаев, К.М. Мирзоев, Р.С. Михайлов // Душанбе: Дониш, 1985, №1. с. 117-138.
4. Бабаев А.М. Сейсмическое районирование Таджикистана / А.М. Бабаев, Г.В. Кошлаков, Мирзоев К.М. // Изд. Дониш, Душанбе, 1978. 69с.
5. Бабаев А.М. Новейший тектогенез зоны сочленения Гиссаро-Алая и Таджикской депрессии / А.М. Бабаев // Душанбе 1975, 256с.
6. Бархатов Б.П. Тектоника Памира. Геология и геофизика Таджикистана / Б.П. Бархатов // Душанбе. Изд. ЛГУ, 1963,
7. Буртман В.С. О природе складчатых дуг Памира и Тянь-Шаня (по палеомагнитным данным). / В.С. Буртман, Г.З. Гурарий // Геотектоника, №2, 1973, 1962, с.56-67.
8. Boyd D.S. Physical basis of remote sensing. / D.S. Boyd // School of Earth Sciences and Geography, Kingston University, U.K. p.8.
9. Вялов О.С. О взаимоотношении Памира и Алая. / О.С. Вялов // Изв. Тадж. Фил. АН СССР, 1943, №2. 163с.
10. Варенцов М.И. Тектоника и нефтегазоносность Таджикской впадины: Учебное пособие / М.И. Варенцов, З.И. Алешина, Г.Е. Корниенко // М. Наука, 1977, 108с.
11. Виниченко С.М. Сейсмогенные оползни и обвали зоны сочленения южного Тянь-Шаня и Памира и их инженерно-геологическое значения / С.М.

- Виниченко // Диссертация на соискания ученой степени кандидата геолого-минералогических наук/ С.М. Виниченко – Москва, 1989. 319с.
12. Иванов Д.Л. Памирские экспедиции / Д.Л. Иванов // Изд. Русск. Геог. О-ва, т.20.вып 3. 1883, с.252-268.
  13. Губин И.Е. Геологическая граница между Памиром и Алаем / И.Е. Губин // Госгеолиздат. 1940, 458с.
  14. Губин И.Е. Памир и сопредельные страны. / И.Е. Губин // Изв. Тадж. фил. АН СССР, 1943, №2. 287с.
  15. Губин И.Е. закономерности сейсмических проявлений на территории Таджикистана / И.Е. Губин // М. изд. АН СССР, 1960, 463с.
  16. Геология СССР, Том 24, 1959. 736с.
  17. Гималайский и альпийский орогенез. М. Недра, 1964. 167с.
  18. Дронов В.И. Структурно-фациальные подзоны Центрального и Юго-Восточного Памира / Дронов В.И. //В кн.: Тектоника Памира и Тянь-Шаня. М., Наука, 1964, 225с.
  19. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов: учебник / Е.П. Емельянова – М.: Издательство «недра». Москва 1972, 312с.
  20. Захаров С.А. Развитие тектонических представлений в Таджикистане и гипотеза зонного тектогенеза / Захаров С.А.// Душанбе, Дониш, 1970, 277с.
  21. Захаров С.А. О тектоническом развитии западной части Центральной Азии (области Памирского скручивания). / Захаров С.А., Ачилов Г.Ш., Бельский В.А.// В кн.: Гималайский и альпийский орогенез. Междунар. геол. конгресс. XXII сессия. Докл. сов. геологов. Проблема 11. М., 1964. Недра. 108с.
  22. Ищук А.Р, Шварц А.В, Ищук Н.Р, Ильясова З.Г. Сейсмическая опасность и прогноз возникновения оползней при землетрясениях для горных районов Таджикистана: монография/ А.Р. Ищук, А.В. Шварц, Н.Р. Ищук, З.Г. Ильясова – Душанбе, 2013, 5с.
  23. Иванов И.П. Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика / Иванов И.П. // Санкт-Петербург. Наука 2001, 416с.

24. Klebelsberg R. 1922. Beitrage zur Geologie Westturkestans / Klebelsberg R. // (Ergebnisse der Expedition des deutschen und osterreichischen Alpenvereins im Jahre 1913) Innsbruck. p.448.
25. Клуников С.И. Проблемы тектоники Памира / Клуников С.И. // Изв. Тадж. Фил. АН СССР, 1943, №2. с.384-386.
26. Кухтиков М.М. О так называемой геологической границе между Памиром и Алаем-Тянь-Шанем / Кухтиков М.М. // Уч. Зап. ТГУ, т. 6, тр. Фак-естеств. Наук, вып. 1, 1955. с.5-12.
27. Кухтиков М.М. Краевые разломы Памира и Дарваза. /Кухтиков М.М. // Уч. Зап. Тадж. Ун-та, т. 12, фак-естеств. Наук. Вып. 2. 1956, с.3-16.
28. Кухтиков М.М. Краевые долгоживущие разломы Памира / Кухтиков М.М., Винниченко Г.П. // Душанбе: Дониш, 1977, с.167.
29. Lucas L.F. Principles of remote sensing. / Lucas L.F., Janssen, G.C., Huurneman, W.H., Bakker V.H.G., Gorte J.A., Horn L.L.F., Janssen C.P. Anupma P. Colin V., Reeves J.C., Weir T.W. // An introductory textbook series 2. 2001 ИТС. p.410.
30. Мушкетов Д.И. О связи Тянь-Шаня с памиро-Алаем. Матер. / Мушкетов Д.И. // по общей и прикл. Геол., вып. 10. 1919, с.256.
31. Мушкетов Д.И. Сейсмическое районирование Средней Азии. Тр. / Мушкетов Д.И. // Сейсмического института АН СССР, №34, вып 2, 1933, с.310.
32. Муратов М.В. О тектоническом положении Памира в системе складчатых горных сооружений Юго-Западной и Центральной Азии. / Муратов М.В., Архипов И.В. // Бюлл. МОИП, Отд. Геол., №4, с.167.
33. Наливкин Д.В. Предварительный отчет о поездке летом 1915г / Наливкин Д.В. // в Горную Бухару и на Западный Памир. Изв. Русск. Геогр. О-ва,., т.52, вып. 3. 1916, с.43-49.
34. Оползни и сели в двух томах. Том 1. Центр международных проектов ГКНТ. Москва 1984, с. 351.
35. Попов В.И. История депрессий и поднятий Западного Тянь-Шаня / Попов В.И. // 1938, с.548.

36. Петрушевский Б.А. Палеогеография и тектоника Афганистана и Таджикистана / Петрушевский Б.А. // Тр. Инта геол. Наук АН СССР, №8. 1940, с.72.
37. Преснухин В.И. О классификации оползневых деформаций в Таджикистане / Преснухин В.И., Рейман В.М., Марков А.Б.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология», -Душанбе, 1975, с. 239-253.
38. Преснухин В.И. Влияние основных природных факторов на развитие оползней в Таджикистане / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология», Душанбе. 1975, с.209-223.
39. Преснухин В.И. Инженерно-геологические комплексы горных пород Таджикистана и связанные с ними экзогенные геологические явления / Преснухин В.И., Романов О.А. // Сб. «гидрогеология и инженерная геология», - Душанбе, 1975, с.184-190.
40. Пейве А.В. Тектоника Памиро - Гималайского сектора Азии / Пейве А.В., Буртман В.С., Руженцев С.В., Суворов А.И. // В кн.:
41. Pimento E. Shallow landslide susceptibility modelling and validation / Pimento E. // A thesis submitted in partial fulfilment for the degree of Master in Geographical Information Science/ E. Pimento. 2010, p. 119.
42. Сеницын В.М. Общая схема тектоники Восточной Азии / Сеницын В.М.// Бюлл. МОИП, отд. геол., 1955. т. 30, вып. 2. 1955, с.51-65.
43. Сеницын В.М. Тектоническая природа цуги Куэнь-Луня / Сеницын В.М. // Докл. АН СССР, т. 106, № 5. 1956, с.167.
44. Сеницын В.М. Северо-Памирский краевой разлом (о северной геологической границе Памира). / Сеницын В.М. // Уч. Зап. Ленингр. Ун-та, № 268, сер. Геол. Наук, вып. 10, 1959, с.101.
45. Собалева О.В., Кучай. О.А. Механизм очагов землетрясений и сейсмическая деформация земной коры Памира. Геология и геофизика Таджикистана Душанбе. Изд. Дониш, №1. 1985, с.117-138.
46. Сквалецкий Е.Н. Инженерно-геологическое условия / Сквалецкий Е.Н.//

47. Саидов.М.С. Опасные природные явления в Таджикистане / Саидов.М.С, Ищук Н.Р. // Душанбе, 2018, с.35.
48. Гидрогеология СССР, т. 41 (Таджикская ССР). М, Недра,1972. –Стр. 472.
49. Таджикской депрессии: учебник / Бабаев А.М. Душанбе: Дониш 1975. с.151.
50. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. /Токарева О.С. // Учебное пособие. Издательство Томского национального университета, 2010, с. 147.

#### **Статьи и доклады:**

51. Байгенов Д.Ф. Влияния крутизны и экспозиции склонов на распространения оползневых явлений долины реки Зеравшан / Байгенов Д.Ф., Файзуллоев Ш.А., Рахимбекова М.Р.// Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии, гидрологии и разработки месторождений полезных ископаемых Таджикистана и сопредельных территорий», посвящённой 80-летию со дня рождения заслуженного работника Таджикистана, доктора технических наук, профессора, академика инженерной академии республики Таджикистан Комилова Одины Комиловича 25-го февраля 2022, с.214-219.
52. Ёкубов Ш.А Исследования зон возможного развития экзогенных геологических процессов при сейсмических явлениях на территории Лахшского района в Таджикистане / Ёкубов Ш.А., Муродкулов Ш.Я., Олимов Б.К., Сафаров М.С., Файзуллоев Ш.А.// Наука и инновация, таджикский национальный университет серия геологических и технических наук. - №1. 2020, с.101-107.
53. Кучай В.К. О статистическом отборе критериев оползневого прогнозирования Таджикистана / Кучай В.К.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология Таджикистана», Душанбе, 1971, с.100-108.

54. К.К Марков. Лавины возникновение и защита от них под редакцией доктора географических наук профессора. Москва-1949, с.140.
55. Леонова, А. В. Оценка оползневых процессов на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий. / Леонова, А. В. Строкова, Л. А. Никитенков, А. Н. // Вестник ВГУ. Серия: Геология, (1), -Москва, 2021, с.94-103. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3341>
56. Лысков Л.М. Возраст рельефа и четвертичная тектоника Северного и Центрального Таджикистана. / Лысков Л.М. // Сб.: Тектоника Тянь-Шаня и Памира. -М.: Наука.1983, с.149-155.
57. Лысков Л.М. Геоморфология и новейшая тектоника района Верхнего Вахша. / Лысков Л.М. // В кн.: Неотектоника и сейсмоструктура Таджикистана. - Душанбе: Дониш,1969, с.62-96.
58. Mukhammadzoda S., Application of Frequency Ratio Method for Landslide Susceptibility Mapping in the Surkhob Valley, Tajikistan. / Mukhammadzoda S., Shohnavaz F., Ilhomjon O., Zhang G. // Journal of Geoscience and Environment Protection, **9**. – 2021, p.168-189. doi: [10.4236/gep.2021.912011](https://doi.org/10.4236/gep.2021.912011).
59. Поршняков Г.С. Этапы формирования тектонических структур различных сегментов герцинид Южного Тянь-Шаня / Поршняков Г.С. // Тектоника Тянь-Шаня и Памира.: Душанбе. Наука 1983, с. 66-73.
60. Преснухин В.И. Влияние крутизны склонов на развитие оползней в Таджикистане / Преснухин В.И. // Сб. «гидрогеология и инженерная геология». Душанбе, 1975, с.224-228.
61. Преснухин В.И. К методике регионального инженерно-геологического прогнозирования оползневых явлений на примере Таджикистана. / Преснухин В.И. // Сб. «гидрогеология и инженерная геология Таджикистана», -Душанбе, 1971, с.87-99.
62. Преснухин В.И. Современные оползневые процессы Юго-Западного Таджикистана / Преснухин В.И. Крейденков Г.П. Распонин В.А. // Сб. «гидрогеология и инженерная геология Таджикистана», -Душанбе, 1971, с.94-99.

63. Преснухин В.И. Особенности развития оползневых явлений в различных инженерно-геологических комплексах горных пород Таджикистана / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология» Душанбе 1972, с.169-177.
64. Преснухин В.И. Роль сейсмических воздействий при оползневых явлениях / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология» Душанбе 1972, с.239-253.
65. Преснухин В.И. Типы оползней Таджикистана. Проблемы инженерной геологии Таджикистана. / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология» -Душанбе 1972. -Стр / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология» -Душанбе 1972. -Стр. / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология» -Душанбе 1972. -Стр. 147-154.
66. Практические пособие по прогнозированию лавинной опасности. Ленинград Гидрометеоздат 1979 с-199.
67. Файзуллоев Ш.А. Прогноз возникновения неглубоких оползней района каскада ГЭС на реке Вахш / Файзуллоев Ш.А., Байгенов Д.Ф., Аламов Б.А., Олимов. Б.К., Ёкубов Ш.А. // Наука и инновация, таджикский национальный университет серия геологических и технических наук. №2. 2020, с.38-43.
68. Файзуллоев Ш.А. Оценка точности классификации данных дистанционного зондирования в ГИС-технологии на примере района каскада ГЭС на реке Вахш / Файзуллоев Ш.А. // Известия Академии наук Таджикистана. - №1 (178). 2020, с.96-103.
69. Файзуллоев Ш.А. Моделирование восприимчивости к возникновению оползней методом соотношения частотности в Лахшском районе / Файзуллоев Ш.А. // Труды института геологии сейсмостойкого строительства и сейсмологии выпуск 4. 2021, с.226-233.
70. Файзуллоев Ш.А. Проблема выбора пространственного разрешения цифровой модели рельефа при моделированиях восприимчивости к возникновению оползням / Файзуллоев Ш.А. // Наука и инновация, таджикский национальный университет серия геологических и технических наук. №3. 2020, с.34-43.

71. Файзуллоев Ш.А. Оползневая восприимчивость территории Таджикистана / Файзуллоев Ш.А., Оймухаммадзода И.С. // Доклады национальной академии наук Таджикистана, Том 67, №1-2. 2024, с. 88-94.
72. Файзуллоев Ш.А. Корреляционный анализ некоторых факторов оползнеобразования среднего и верхнего течения р.Вахш. Труды института геологии сейсмостойкого строительства и сейсмологии выпуск 4. 2021, с.234-243.
73. Файзуллоев Ш.А. Зонирования территории долины реки Гунт по степени восприимчивости к возникновению оползней / Рахимбекова М.Р., Файзуллоев Ш.А. // Известия, НАНТ: серия физико-математических, химических, геологических и технических наук, №2(191), 2023, с.64-75.
74. Шварц А.В. Влияние сейсмичности на проявления оползневых процессов в среднем и верхнем течении реки Вахш / Шварц А.В.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Выпуск 1. -Душанбе 2018, с.99-109.
75. Шварц А.В. Влияние сейсмичности на проявления оползневых процессов в среднем и верхнем течении реки Вахш. / Шварц А.В.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Выпуск 1. -Душанбе 2018, с.99-109.
76. Шварц А.В. Оценка дальности смещения Байпазинского оползня при сейсмическом воздействии. / Шварц А.В.// Труды международной конференции, посвящённой шестидесятилетию со дня Хаитского землетрясения 1949 года. -Душанбе, 2009, с.231-235.
77. Шварц А.В. Оползни и сели среднего и верхнего течения р.Вахш / Шварц А.В., Ишук Н.Р. // Геологическая корреляция и геодинамика складчатых областей. -Душанбе, 2015, с.163-175.
78. Шварц А.В. Строения и динамика Кукутальского оползня / Шварц А.В., Ишук Н.Р.// Геология и вопросы сейсмичности территории Таджикистана. - Душанбе, 2013, с.170-186.

79. H. Peitzsch., Jordy H., Daniel B.F. Terrain parameters of glide snow avalanches and a simple spatial glide snow avalanche model Erich, Cold Regions Science and Technology / H. Peitzsch., Jordy H., Daniel B.F. // 120 2015, p.237-250.

**80. Электронные источники [Электронный ресурс]**

81. Abul Hasanat M. Bayesian belief network learning algorithms for modeling contextual relationships in natural imagery: A comparative study. / Abul Hasanat M., Ramachandram D., Mandava R.// *Artif. Intell. Rev.* 34 291–308. DOI 10.1007/s10462-010-9176-8

82. Achour, Y. Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine. / Achour, Y., Boumezbeur, A., Hadji, R.// Algeria. *Arab J Geosci* **10**, 194 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2980-6>

83. Achu, A. L. Spatial modelling of shallow landslide susceptibility: a study from the southern Western Ghats region of Kerala, India / Achu, A. L., Aju, C. D., Reghunath, R. // *Annals of GIS*, 26(2), (2020) 113–131. doi:10.1080/19475683.2020.1758207

84. Afungang, R. N. Assessing the spatial probability of landslides using GIS and informative value model in the Bamenda highlands. / Afungang, R. N., de Meneses B., Carlos V., Nkwemoh C. A.// *Arabian Journal of Geosciences*, 10(17), (2017). 384–. doi:10.1007/s12517-017-3155-1

85. Ahmed, B. Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*. / Ahmed, B.// (2014). 12(6), 1077–1095. doi:10.1007/s10346-014-0521-x

86. Ali, S. Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China–Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan. / Ali, S., Biermanns, P., Haider, R., Reicherter, K.// *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (2019). 19(5), 999–1022. doi:10.5194/nhess-19-999-2019

87. Ansah R.H. Analytic Hierarchy Process Decision Making Algorithm / Ansah R.H., Sorooshian S., Mustafa S.B. // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. ISSN 0973-1768 Volume 11, Number 4 (2015), pp. 2403-2410.
88. Arifianti, Y. Comparative Study among Bivariate Statistical Models in Landslide Susceptibility Map / Arifianti, Y. Agustin, F., Muslim, D. // *Indonesian Journal on Geoscience*, 7 (1), 2020. p.51-63. DOI: 10.17014/ijog.7.1.51-63
89. Basharat, M. Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. / Basharat, M., Shah, H. R., Hameed, N.// *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), (2016). 292–. doi:10.1007/s12517-016-2308-y
90. Bogoliubova A. Accuracy assessment of automatic image processing for land cover classification of ST. Petersburg protected. / Bogoliubova A., Tymków P.// *National Mineral Resources University and Wrocław University of Environmental and Life Science. Geodesia et Descriptio Terrarum* 13 (1-2) 2014, 5-22.
91. Bourenane, H. GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). / Bourenane, H., Bouhadad, Y., Guettouche, M. S., Braham, M.// *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), (2014). p.337–355. doi:10.1007/s10064-014-0616-6
92. Cama, M. Exploring relationships between grid cell size and accuracy for debris-flow susceptibility models: a test in the Giampileri catchment (Sicily, Italy) / Cama, M., Conoscenti, C., Lombardo, L., Rotigliano, E. // *Environmental Earth Sciences*, 75(3), (2016) 238–. doi:10.1007/s12665-015-5047-6
93. Cao Y. Landslide susceptibility assessment using the Weight of Evidence method: A case study in Xunyang area, China. /Cao Y., Wei X., Fan W., Nan Y., Xiong W., Zhang S. // (2021) *PLoS ONE* 16(1): e0245668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245668>
94. Celtek S. The Effect of Aspect on Landslide and Its Relationship with Other Parameters / Celtek S // (2021). [Online First], IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.99389. Available from: <https://www.intechopen.com/online-first/78441>.

95. Chen, W. Landslide susceptibility mapping based on GIS and information value model for the Chencang District of Baoji, China / Chen, W., Li, W., Hou, E. // *Arab J Geosci* **7**, 4499–4511 (2014). <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1369-z>
96. Chen Z. Landslide susceptibility mapping using statistical bivariate models and their hybrid with normalized spatial-correlated scale index and weighted calibrated landslide potential model. / Chen Z., Song, D., Juliev, M., Pourghasemi, H. R. // *Environmental Earth Sciences*, 80(8). (2021). doi:10.1007/s12665-021-09603-9
97. Chen, Z.. The influence of DEM spatial resolution on landslide susceptibility mapping in the Baxie River basin, NW China / Chen, Z., Ye, F., Fu, W. // *Nat Hazards* **101**, 853–877 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03899-9>
98. Claessens L. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. / Claessens L., Heuvelink G, B, M., Schoorl J,M., Veldkamp A. // *30(4)*, 461–477. (2005). doi:10.1002/esp.1155
99. Dahal, R. K. Landslide hazard mapping in GIS. / Dahal, R. K. // *Journal of Nepal Geological Society*, 53, 63–91. (2017). <https://doi.org/10.3126/jngs.v53i0.23808>.
100. Dou J. Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata, Japan / Dou J., Dieu T.B., Ali P., Yunus, Kun J., Song X., Revhaug I, Huan X., Zhongfan Z. // – *PLOS ONE* | DOI: 10.1371/journal.pone.0133262 July 27, 2015, pp.1-29
101. El Jazouli, A. GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). / El Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R. // *Geoenviron Disasters* **6**, 3 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>
102. Eastman, J.R. *Guide to GIS and Image Processing* / Eastman, J.R. // 14, 239-247. Clark University Manual, USA (2003).
103. El-Fengour. Landslides susceptibility modelling using Multivariate Logistic Regression Model in the Sahla Watershed in Northern Morocco / El-Fengour, A., El-Motaki H., El-Bouzidi A. // *Sociedade & Natureza*, v. 33, 1 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-59124>

104. Farooq, S. Landslide susceptibility mapping using information value method in Jhelum Valley of the Himalayas. / Farooq, S., Akram, M. S. // *Arabian Journal of Geosciences*, 14(10). (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07147-7>
105. Foody G.M. Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment. \ Foody G.M.\\ *Remote Sensing of Environment* 80. Pp. 185-201, (2001).
106. Getachew, N. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia / Getachew, N., Meten, M.// *Geoenviron Disasters* 8, 6 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z>
107. Ghimire, G. Landslide Distribution and Processes in the Hills of Central Nepal: Geomorphic and Statistical Approach to Susceptibility Assessment. / Ghimire, G., Timalsina, N. // *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 276-302. (2020). <https://doi.org/10.4236/gep.2020.812017>
108. Gholami, M. Landslide prediction capability by comparison of frequency ratio, fuzzy gamma and landslide index method / Gholami, M., Ghachkanlu, E.N., Khosravi, K.// *J Earth Syst Sci* 128, 42 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12040-018-1047-8>
109. Golovko, D. Evaluation of Remote-Sensing-Based Landslide Inventories for Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan / Golovko, D., Roessner, S., Behling, R., Wetzel, H.-U., Kleinschmit, B. // *Remote Sensing*, 9(9), 943. (2017). doi:10.3390/rs9090943
110. Hadmoko, D. S. Application of a semiquantitative and GIS-based statistical model to landslide susceptibility zonation in Kayangan Catchment, Java, Indonesia / Hadmoko, D. S., Lavigne, F., Samodra, G // *Natural Hazards*, 87(1), 437–468. (2017). doi:10.1007/s11069-017-2772-z.
111. Hamburger, M.W. Velocity structure and seismicity of the Garm region, Central Asia / Hamburger, M.W., Swanson, W.A., Popandopulo, G.A., // *Geophys. J. Int.* 115, 497–511. (1993). <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb01202.x>
112. Huang, F. Landslide susceptibility mapping based on self-organizing-map network and extreme learning machine. / Huang, F., Yin, K., Huang, J., Gui, L., Wang, P.// *Engineering Geology*, 223, 11–22. (2017). doi: 10.1016/j.enggeo.2017.04.013

113. Hussain, S. PS-InSAR based validated landslide susceptibility modelling: a case study of Ghizer valley, Northern Pakistan / Hussain, S., Hongxing, S., Ali, M., Ali, M.// *Geocarto International*, 1–22. (2021). doi:10.1080/10106049.2020.1870165
114. Ischuk, A. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy. / Ischuk, A., Bendick, R., Rybin, A., Molnar, P., Khan, S.F., Kuzikov, S., Mohadjer, S., Saydullaev, U., Ilyasova, Z., Schelochkov, G., Zubovich, A. V.// *J. Geophys. Res. Solid Earth* 118, 2408–2416. (2013). <https://doi.org/10.1002/jgrb.50185>
115. Kaur, H. Knowledge-driven method: a tool for landslide susceptibility zonation (LSZ). / Kaur, H., Gupta, S., Parkash, S., Thapa, R.// *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1–15. (2018). doi:10.1080/24749508.2018.1558024
116. Kim, J.-C., Lee, S., Jung, H.-S., Lee, S. Landslide susceptibility mapping using random forest and boosted tree models in Pyeong-Chang, Korea. / Kim, J.-C., Lee, S., Jung, H.-S., Lee, S.// *Geocarto International*, 33(9), 1000–1015. (2017). doi:10.1080/10106049.2017.1323964
117. Koulakov, I. A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region. / Koulakov, I., Sobolev, S. V. // *Geophys. J. Int.* 164, 425–440. (2006).<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02841.x>
118. Kufner, S.K. Seismotectonics of the Tajik Basin and Surrounding Mountain Ranges. / Kufner, S.K., Schurr, B., Ratschbacher, L., Murodkulov, S., Abdulhameed, S., Ischuk, A., Metzger, S., Kakar, N. // *Tectonics*. (2018). <https://doi.org/10.1029/2017TC004812>
119. Kufner, S.K. Deep India meets deep Asia: Lithospheric indentation, delamination and break-off under Pamir and Hindu Kush (Central Asia)./ Kufner, S.K., Schurr, B., Sippl, C., Yuan, X., Ratschbacher, L., Akbar, A. M., Ischuk, A., Murodkulov, S., Schneider, F., Mechie, J., Tilmann, F.// *Earth Planet. Sci. Lett.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.046>
120. Lee, S. The effect of spatial resolution on the accuracy of landslide susceptibility mapping: a case study in Boun, Korea. / Lee, S., Choi, J., Woo, I.// *Geosci J* 8, 51 (2004). <https://doi.org/10.1007/BF02910278>

121. Liu, Y. A comparative evaluation of machine learning algorithms and an improved optimal model for landslide susceptibility: a case study. / Liu, Y., Xu, P., Cao, C., Shan, B., Zhu, K., Ma, Q., Yin, H.// *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1973–2001. (2021). doi:10.1080/19475705.2021.1955018
122. Luo, L. From scenario-based seismic hazard to scenario-based landslide hazard: rewinding to the past via statistical simulations. / Luo, L., Lombardo, L., van Westen, C.// *Stoch Environ Res Risk Assess* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01959>
123. Luo, X. Mine landslide susceptibility assessment using IVM, ANN and SVM models considering the contribution of affecting factors / Luo, X., Lin, F., Zhu, S., Yu, M., Zhang, Z., Meng, L., Peng, J. // *PLOS ONE*, 14(4), e0215134. (2019). doi: 10.1371/journal.pone.0215134
124. Mahalingam, R. Evaluation of the influence of source and spatial resolution of DEMs on derivative products used in landslide mapping / Mahalingam, R., Olsen, M, J. // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1–21. (2015). doi:10.1080/19475705.2015.1115431
125. Mandal, S. Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Frequency Ratio (FR) Model in Assessing Landslide Susceptibility and Risk / Mandal, S., Maiti, R. // *Semi-Quantitative Approaches for Landslide Assessment and Prediction*, 191–226. (2014). doi:10.1007/978-981-287-146-6\_7
126. Meena, S. Impact of Spatial Resolution of Digital Elevation Model on Landslide Susceptibility Mapping: A case Study in Kullu Valley, Himalayas / Meena, S., Gudiyangada, T. // *Geosciences (Switzerland)*. (2019). 9. 10.3390/geosciences9080360
127. Meten, M. Effect of Landslide Factor Combinations on the Prediction Accuracy of Landslide Susceptibility Maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia / Meten, M., Prakash.B., Yatabe, R. // *Geoenvironmental Disasters*, 2(1), 9–. (2015). doi:10.1186/s40677-015-0016-7
128. Metzger, S. Dense GNSS Profiles Across the Northwestern Tip of the India-Asia Collision Zone: Triggered Slip and Westward Flow of the Peter the First Range,

- Pamir, Into the Tajik Depression. / Metzger, S., Ischuk, A., Deng, Z., Ratschbacher, L., Perry, M., Kufner, S.K., Bendick, R., Moreno, M.// *Tectonics* 39. (2020). <https://doi.org/10.1029/2019TC005797>
129. Mohd H. Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. / Mohd H. Pakhriazad H.Z, Shahrin M.F.// *GEOGRAFIA OnlineTM Malaysian Journal of Society and Space* 5 issue 1 (1 - 10) © 2009, ISSN 2180-2491.
130. Moradi M. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping by AHP Method, A Case Study, Dena City, Iran / Moradi M., Bazyar M.H., Mohammadi Z. // *Basic. Appl. Sci. Res.*, 2(7)6715-6723. 2012.
131. Nicu, I. C. Application of analytic hierarchy process, frequency ratio, and statistical index to landslide susceptibility: an approach to endangered cultural heritage. / Nicu, I. C.// *Environmental Earth Sciences*, 77(3). (2018). doi:10.1007/s12665-018-7261-5
132. Oh, H.-J., Lee, S., Hong, S.M. Landslide Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio Technique with Iterative Random Sampling. / Oh, H.-J., Lee, S., Hong, S.M.// *Journal of Sensors*, 2017, 1–21. (2017). doi:10.1155/2017/3730913
133. Park, I. Spatial prediction of landslide susceptibility using a decision tree approach: a case study of the Pyeongchang area, Korea / Park, I., Lee, S. // *International Journal of Remote Sensing*, 35(16),60896112. (2014). doi:10.1080/01431161.2014.943326
134. Paudel, U. Multi-Resolution Landslide Susceptibility Analysis Using a DEM and Random Forest / Paudel, U., Oguchi, T., Hayakawa, Y. // *International Journal of Geosciences*, 7, 726-743. (2016). <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2016.75056>
135. Pham, B. T. Landslide susceptibility assessment in the Uttarakhand area (India) using GIS: a comparison study of prediction capability of naïve bayes, multilayer perceptron neural networks, and functional trees methods / Pham, B. T., Tien Bui, D., Pourghasemi, H. R., Indra, P., Dholakia, M. B. // *Theoretical and Applied Climatology*, 128(1-2), 255–273. (2015). doi:10.1007/s00704-015-1702-9

136. Pisano, L. Variations in the susceptibility to landslides, as a consequence of land cover changes: A look to the past, and another towards the future / Pisano, L., Zumpano, V., Malek, Ž., Roskopf, C. M., Parise, M. // *Science of The Total Environment*, 601-602, 1147–1159. (2017). doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.2
137. Plantanakulchai M. Evaluation of alternatives in transportation planning using multi-stakeholders multi-objectives AHP modeling / Plantanakulchai M., Saengkhae N. // *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.4, October, 2003.
138. Pokharel, B. Landslide susceptibility in Rasuwa District of central Nepal after the 2015 Gorkha Earthquake / Pokharel, B., Thapa, P. B. // *Journal of Nepal Geological Society*, 59, 79–88. (2019). doi:10.3126/jngs. v59i0.24992
139. Pourghasemi, H. R. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? / Pourghasemi, H. R., Rahmati, O. // *CATENA*, 162, 177–192. (2018). doi: 10.1016/j.catena.2017.11.022
140. Qiu, H., Regmi, A. D., Cui, P., Hu, S., Wang, Y., & He, Y. (2017). Slope aspect effects of loess slides and its spatial differentiation in different geomorphologic types. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(15). doi:10.1007/s12517-017-3135-5
141. Rasyid, A. R., Bhandary, N. P., Yatabe, R. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia / Rasyid, A. R., Bhandary, N. P., Yatabe, R. // *Geoenvironmental Disasters*, 3(1). (2016). doi:10.1186/s40677-016-0053-x
142. Riaz, M. T. A Data-Driven Approach to Landslide-Susceptibility Mapping in Mountainous Terrain: Case Study from the Northwest Himalayas, Pakistan / Riaz, M. T., Basharat, M., Hameed, N., Shafique, M., Luo, J. A // *Natural Hazards Review*, 19(4), 05018007. (2018). doi:10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000302
143. Saha, S. Prediction of landslide susceptibility in Rudraprayag, India using novel ensemble of conditional probability and boosted regression tree-based on cross-validation method / Saha, S., Arabameri, A., Saha, A., Blaschke, T., Ngo, P. T. T.,

Nhu, V. H., Band, S. S. // *Science of The Total Environment*, 764, 142928. (2021). doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.1429

144. Saleem, N. Parameters Derived from and/or Used with Digital Elevation Models (DEMs) for Landslide Susceptibility Mapping and Landslide Risk Assessment: A Review / Saleem, N., Huq, M. E., Twumasi, N. Y. D., Javed, A., Sajjad, A. // *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(12), 545. (2019). doi:10.3390/ijgi8120545

145. San, B. T. An evaluation of SVM using polygon-based random sampling in landslide susceptibility mapping: The Candir catchment area (western Antalya, Turkey) / San, B. T. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 399–412. (2014). doi: 10.1016/j.jag.2013.09.010

146. Saravanan, S. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio technique – A case study of NH67 road corridor in the Nilgiris district, Tamilnadu, India / Saravanan, S., Istijono, B., Jennifer, J. J., Abijith, D., Sivaranjani, S. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 708(1), 012017. (2021). doi:10.1088/1755-1315/708/1/012017

147. Sbroglia R.M. Mapping susceptible landslide areas using geotechnical homogeneous zones with different DEM resolutions in Ribeirão Baú basin, Ilhota/SC/Brazil / Sbroglia R.M, Reginatto GMP, Higashi R.A.R, Guimarães R.F. // *Landslides*. (2018). doi:10.1007/s10346-018-1052-7

148. Schlögel, R., Marchesini, I., Alvioli, M., Reichenbach, P., Rossi, M., Malet, J.-P. Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models / Schlögel, R., Marchesini, I., Alvioli, M., Reichenbach, P., Rossi, M., Malet, J.-P. // *Geomorphology*, S0169555X16306651. (2017). doi: 10.1016/j.geomorph.2017.10.018

149. Schneider, F.M. Seismic imaging of subducting continental lower crust beneath the Pamir. *Earth Planet* / Schneider, F.M., Yuan, X., Schurr, B., Mechie, J., Sippl, C., Haberland, C., Minaev, V., Oimahmadov, I., Gadoev, M., Radjabov, N., Abdybachaev, U., Orunbaev, S., Negmatullaev, S. // *Sci. Lett.* 375, 101–112. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.015>

150. Shano, L. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review / Shano, L., Raghuvanshi, T.K., Meten, M. // *Geoenviron Disasters* **7**, 18 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>
151. Shrestha, S. Assessment of co-seismic landslide susceptibility using LR and ANCOVA in Barpak region, Nepal / Shrestha, S., Kang, T.-S., Choi, J. C. // *Journal of Earth System Science*, 127(3). (2018). doi:10.1007/s12040-018-0936-1
152. Silalahi, F. E. S. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia / Silalahi, F. E. S., Pamela, Arifianti, Y., Hidayat, F. // *Geoscience Letters*, 6(1). (2019). doi:10.1186/s40562-019-0140-4
153. Sippl, C. Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data / Sippl, C., Schurr, B., Yuan, X., Mechie, J., Schneider, F.M., Gadoev, M., Orunbaev, S., Oimahmadov, I., Haberland, C., Abdybachaev, U., Minaev, V., Negmatullaev, S., Radjabov, N., // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. (2013). <https://doi.org/10.1002/jgrb.50128>
154. Swetha, T. V. Landslides susceptibility assessment by analytical network process: a case study for Kuttiyadi river basin (Western Ghats, southern India) / Swetha, T. V., Gopinath, G. // *SN Applied Sciences*, 2(11). (2020). doi:10.1007/s42452-020-03574-5
155. Sophia S. Rwanga, J. Ndambuki M. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS / Sophia S. Rwanga, J. Ndambuki M. // *International Journal of Geosciences*, 2017, 8, 611-622.
156. Sergey A. Petrov, Valery M. Abramov Лавина в Хороге (15.02.2023) Петров С.А., Валерий М.А. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
157. Tian, Y. Effects of raster resolution on landslide susceptibility mapping: A case study of Shenzhen / Tian, Y., Xiao, C., Liu, Y. // *Sci. China Ser. E-Technol. Sci.* **51**, 188–198 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11431-008-6009-y>
158. Trigila, A. Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy) / Trigila A., Iadanza, C., Esposito, C., Scarascia-Mugnozza, G. // *Geomorphology*. (2015). doi: 10.1016/j.geomorph.2015.06.001

159. Wang, Y. Comparison of Random Forest Model and Frequency Ratio Model for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Yunyang County (Chongqing, China) / Wang, Y., Sun, Deliang W., Haijia, Z., Hong, Z. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4206– (2020). doi:10.3390/ijerph17124206
160. Wu S. Modeling the effects of elevation data resolution on the performance of topography-based watershed runoff simulation / Wu S., Jonathan L., Huang G.H. // 22(9), 1250–1260. (2007). doi: 10.1016/j.envsoft.2006.08.001
161. Wubalem, A. Modeling of Landslide susceptibility in a part of Abay Basin, northwestern Ethiopia. *Open Geosciences*, 12(1), 1440–1467. (2020). doi:10.1515/geo-2020-0206
162. Van Westen. C.J. Geographic Information Systems for Slope Instability Hazard Zonation / Van Westen. C.J. // Part 2: GIS exercises. Technical Report · January 1993. University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation.
163. Yang P. (What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results? / Yang P. Ames Daniel P., Fonseca, A., Anderson D., Shrestha R., Glenn Nancy F., Cao Y. // *Environmental Modelling & Software*, 58(), 48–57. 2014). doi: 10.1016/j.envsoft.2014.04.005
164. Yang X. Incorporating Landslide Spatial Information and Correlated Features among Conditioning Factors for Landslide Susceptibility Mapping. / Yang X., Liu R., Yang M., Chen J., Liu T., Yang Y., Wang Y. // *Remote Sensing*, 13(11), 2166. (2021). doi:10.3390/rs13112166
165. Yaning Y. GIS-based earthquake-triggered-landslide susceptibility mapping with an integrated weighted index model in Jiuzhaigou region of Sichuan Province, China. / Yaning Y., Zhijie Z., Wanchang Z., Qi X., Cai D., Qilun L. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1973–1988, 2019.
166. Yin C. Susceptibility mapping and zoning of highway landslide disasters in China / Yin C., Li H., Che F., Li Y., Hu Z., Liu D. // *PLOS ONE*, 15(9), e0235780. (2020). doi: 10.1371/journal.pone.02357

## ПЕРЕЧЕНЬ

### НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**І. Статьи, опубликованные в рецензируемых и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Президенте Республики Таджикистан журналах:**

**[1-А] Рахимбекова М.Р.** Роль инвентаризации оползневых явлений при моделировании восприимчивости к оползням. [Текст] / Файзуллоев Ш.А., Нарзиев Дж. М., Байгенов Д.Ф., Рахимбекова М.Р., Окилшоев Х.С.// Наука и инновация, таджикский национальный университет серия геологических и технических наук. - 2020. - №4. - С. 30-35.

**[2-А] Рахимбекова М.Р.,** Зонирования территории долины реки Гунт по степени восприимчивости к возникновению оползней. [Текст] / Рахимбекова М.Р., Файзуллоев Ш.А. // Известия, НАНТ: серия физико-математических, химических, геологических и технических наук, 2023, №2(191), с. 64-75.

**[3-А] Рахимбекова М.Р.** Степень восприимчивости склонов долины реки Обихингоу к возникновению оползней. [Текст] / Аламов Б.А., Файзуллоев Ш.А., Байгенов Д.Ф., Рахимбекова М.Р., Шарифов У.А. // Известия, НАНТ: серия физико-математических, химических, геологических и технических наук, №4(193), 2023, с.136-146.

**[4-А] Рахимбекова М.Р.** Оценка восприимчивости к возникновению оползней долины реки Зеравшан методом анализа иерархий. [Текст] / Байгенов Д.Ф., Файзуллоев Ш.А., Аламов Б.А., Рахимбекова М.Р. // Вестник филиала Московского Государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. Том 1, № 1(37) 2024, с. 98-109.

**[5-А] Рахимбекова М.Р.** Оценка прогностической способности модели восприимчивости к возникновению оползней. [Текст] / Рахимбекова М.Р. // Наука и инновация, таджикский национальный университет серия геологических и технических наук. - №4. 2024, с. 87-94.

[6-А] Рахимбекова М.Р. Влияние морфометрических и климатических условий на развитие осыпей долины реки Гунт. [Текст] / Рахимбекова М.Р., Оймухаммадзода И.С., Файзуллоев Ш.А. // Доклады национальной Академии наук Таджикистана. том 67, №7-8. 2024, с.387-399.

**II. Научные статьи, опубликованные в сборниках и других научно-практических изданиях:**

[7-А] Рахимбекова М.Р. Влияния крутизны и экспозиции склонов на распространения оползневых явлений долины реки Зеравшан. [Текст] / Байгенов Д.Ф., Файзуллоев Ш.А., Рахимбекова М.Р.// Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии, гидрологии и разработки месторождений полезных ископаемых Таджикистана и сопредельных территорий», посвящённой 80-летию со дня рождения заслуженного работника Таджикистана, доктора технических наук, профессора, академика инженерной академии республики Таджикистан Комилова Одины Комиловича 25-го февраля 2022, с.214-219.

[8-А] Раҳимбекова М.Р. Нафт ва газ: асрори пайдоиш. [Текст] / С.Р. Мавлонӣ., Ф.А. Раҳимов., М.Р. Раҳимбекова. // Маводи конфронси ҷумҳуриявии илмӣ-амалӣ бахшида ба рӯзи “Геология тоик” 7,9 декабри соли 2024. Душанбе-2024. Стр. 9-14.

[9-А] Раҳимбекова М.Р. Южный кум: геологическое строение и нефтегазоносность. [Текст] / С.Р. Мавлонӣ., Ф.А. Раҳимов., М.Р. Раҳимбекова. // Материалы международной научно-практической конференции XIV Ломоносовские чтения « Роль филиала московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе в раз витии науки и образования» (22-23 ноября 2024г.) часть 2. Естественные науки. Стр.340-345.

[10-А]Рахимбекова М.Р. Западная Фергана: современное состояние и перспективы развития нефтегазоносный. [Текст] / Ф.А. Рахимов., М.Р. Рахимбекова., С.Р. Мавлони. // O‘zbekiston respublikasi tog‘-kon sanoati va geologiya vazirligi geologiya fanlari universiteti “h.m. Abdullayev nomidagi geologiya va geofizika instituti” davlat muassasasi. “O‘zbekiston respublikasining

barqaror rivojlanishida geologik muammolarning fundamental, amaliy va innovatsion yechimlari” Respublika ilmiy-amaliy anjuman. Toshkent 2024-yil 7-8 noyabr. Стр.310-313.

[11-A] Рахимбекова М.Р. Сравнительная геохимическая оценка перспектив сумсарской нефтегазоносной структуры западной и центральной части Ферганской впадины. [Текст] / М.Р. Рахимбекова., Ф.А. Рахимов., С.Р. Мавлони. // O‘zbekiston respublikasi tog‘-kon sanoati va geologiya vazirligi geologiya fanlari universiteti “h.m. Abdullayev nomidagi geologiya va geofizika instituti” davlat muassasasi. “O‘zbekiston respublikasining barqaror rivojlanishida geologik muammolarning fundamental, amaliy va innovatsion yechimlari” Respublika ilmiy-amaliy anjuman. Toshkent 2024-yil 7-8 noyabr. 307-310.

[12-A] Rahimbekova M.R. Use of frequency ratio method and GIS for landslide susceptibility modeling: a case study in the South-Western part of Tajikistan. SH.A. Faizulloev., B.A. Alamov., M.R. Rahimbekova. Natural Hazart and Climate Change Conference. Szeged, 21-23 May 2025. p.24.