

**ТАДЖИКСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**На правах рукописи**

УДК: 550.38:624.131.543:004.96 (575.3)

ББЛ 26.3 (Тадж.)

Ф - 12

**ФАЙЗУЛЛОЕВ ШОХНАВАЗ АБДУКОДИРОВИЧ**

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОПОЛЗНЕВЫХ ЯВЛЕНИЙ  
В РАЙОНЕ КАСКАДА ГЭС НА РЕКЕ ВАХШ**

Специальность 25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение  
и грунтоведение

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
геолого-минералогических наук

Научный руководитель  
кандидат геол.-мин. наук  
Оймухаммадзода И.С.

Душанбе-2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>3</b>
<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. ....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. К истории изученности оползней.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2. Стратиграфия .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3. Тектоника .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4. Сейсмичность.....</b>	<b>27</b>
<b>ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>30</b>
<b>ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ АКТИВИЗАЦИЮ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЙОНЕ КАСКАДА ГЭС НА РЕКЕ ВАХШ .....</b>	<b>47</b>
<b>ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА КАЧЕСТВО КАРТ ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОПОЛЗНЕЙ РАЙОНА КАСКАДА ГЭС НА РЕКЕ ВАХШ.....</b>	<b>67</b>
<b>ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОПОЛЗНЕЙ В РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1. Метод анализа иерархий при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш .....</b>	<b>81</b>
<b>5.2. Метод соотношения частотности при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш .....</b>	<b>91</b>
<b>5.3. Метод значения информативности при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш.....</b>	<b>97</b>
<b>5.4. Метод весомости признаков при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш .....</b>	<b>103</b>
<b>5.5. Валидация модели восприимчивости к возникновению оползней .....</b>	<b>111</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>113</b>
<b>Литература .....</b>	<b>116</b>

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ВАК - Высшая аттестационная комиссия

ГИС – Геоинформационная система

РТ – Реестр свидетельств о государственной регистрации

AUC – Площадь под кривой

ROC – Рабочая характеристика приёмника

SPI – Индекс мощности потока

TWI – Топографический индекс влажности

NDVI – Нормализованный вегетационный индекс

ГЭС – Гидроэлектрическая станция

УДК – Универсальный десятичный классификатор

ГР – Государственная регистрация

НАНТ – Национальная Академия Наук Таджикистана

ЦМР – Цифровая модель рельефа

USGS – Геологическая служба Соединённых Штатов

МАИ – Метод анализа иерархий

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Вахшский каскад ГЭС на реке Вахш включает в себе пять действующих, одну строящуюся и частично действующую и две спроектированных ГЭС. В районах строительства гидроэлектростанций экзогенные геологические процессы создают неблагоприятные условия для возведения сооружений. Среди них выделяются относительно большой распространённостью оползни, которые могут негативно повлиять на стабильность действующих и возводимых сооружений. Вопрос по обеспечению безопасности от стихийных бедствий, в особенности от оползней, района каскада ГЭС на реке Вахш является весьма актуальным. Для решения проблемы такого масштаба, прежде всего, необходимо выявить региональные закономерности оползневых явлений. В мировой практике для предотвращения негативных влияний от оползней используются современные методы решения задач, в частности, метод оценки восприимчивости к возникновению оползней с помощью ГИС-технологии. Этот метод даёт возможность оценить роль практически всех факторов, таких, как крутизна, кривизна и экспозиция склонов, высотная зональность, количество атмосферных осадков, сейсмическое воздействие, на распространение оползней.

При проведении работ в этом районе ранее была построена карта вероятности возникновения оползней в рыхлых горных отложениях под воздействием сейсмичности, которая учитывала среднюю кривизну склонов с крутизной склонов от 5 до 30<sup>0</sup>. Однако на закономерности развития оползней района работ могут влиять и другие весьма важные процессообразующие факторы. В частности, при использовании количественных методов и данных дистанционного зондирования нами установлена зависимость оползневых явлений от самих элементов или показателей факторов, что позволяет прогнозировать оползни с большей вероятностью.

В связи с этим исследование оползневых явлений с использованием более современных методов является актуальной задачей, поэтому необходимо проводить качественную и количественную оценку влияния факторов

оползнеобразования с использованием ГИС – технологии. Следует также учитывать данные дистанционного зондирования для построения и интерпретации процессообразующих факторов, прогнозирования вероятности возникновения оползней на основе выявленных весов показателей факторов. Целесообразно использовать и сравнить несколько методов для построения наиболее оптимальной карты восприимчивости.

**Связь исследования с программами (проектами), научной тематикой.**

Представленная работа проводилась в рамках научно-исследовательской работе по теме: «Создание новой карты сейсмической опасности территории Таджикистана» в лаборатории оценки сейсмической опасности Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ (УДК 550.34:551.78(575.3), № ГР №0116ТJ00576).

**Этапы исследования.** Достижение цели осуществлялось на трёх этапах. На первом этапе были созданы ГИС-геобазы данных и карта инвентаризации оползневых явлений. На втором этапе, в рамках полевых работ сотрудников Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, была сделана верификация карты инвентаризации непосредственно в поле. В третьем и заключительном этапе были проведены аналитические работы. Выявлены пространственные закономерности оползневых явлений, созданы карты восприимчивости к возникновению оползней и проведена валидация результатов исследования.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

**Целью исследования** является выявление пространственных закономерностей развития оползневых явлений и построение карт восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш.

**Объект исследования** – верхнее и среднее течения реки Вахш.

**Предмет исследования** – оползневые явления района каскада ГЭС на реке Вахш.

**Задачи исследования.** Для достижения цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Создать карту инвентаризации оползневых явлений на основе данных дистанционного зондирования и архивных ресурсов с верифицированием результатов дешифровки местности.
2. Создать ГИС-базы геологических, сейсмологических и всевозможных данных, связанных с оползневыми явлениями в районе каскада ГЭС на реке Вахш.
3. Выявить пространственные взаимоотношения процессо- образующих факторов с оползневыми явлениями района работ.
4. Провести оценку влияния пространственного разрешения цифровой модели рельефа на качество карт восприимчивости к возникновению оползней для выбора наиболее оптимальной цифровой модели рельефа.
5. Построить модели восприимчивости к возникновению оползней с использованием полуколичественных и количественных методов.
6. Сравнить модели восприимчивости к возникновению оползней с использованием ROC-кривой.

**Методы исследования:** Метод контролируемой классификации данных дистанционного зондирования, методы моделирования, включающие метод цифрового картирования и метод экспертной оценки.

**Область исследования.** Естествознание – науки о Земле.

**Достоверность диссертационных результатов подтверждаются следующим:** построенная карта инвентаризации оползневых явлений района работ, которая была создана с использованием программы Google Earth Pro и архивных данных, была затем верифицирована непосредственно в полевых условиях; результаты моделирования восприимчивости к возникновению оползней, проведённые при помощи ГИС-программы ArcGIS Desktop версии 10.6.1, были оценены с использованием ROC-анализа; публикациями основных результатов работы в рецензируемых изданиях ВАК при президенте РФ; обсуждением результатов диссертации на конференциях.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые проведена оценка влияния пространственного разрешения цифровой модели рельефа на качество карт восприимчивости к возникновению оползней с разрешениями 30 и 90 м.
2. Впервые были выявлены пространственные закономерности развития оползневых явлений в зависимости от основных факторов оползнеобразования (сейсмические воздействия, крутизна склонов, атмосферные осадки, высотная зональность, кривизна склонов, индекс NDVI, индекс мощности потока, топографический индекс влажности и экспозиции склонов).
3. Впервые построены модели восприимчивости к возникновению оползней с использованием четырёх разных количественных и полуколичественных методов.
4. Впервые проанализировано качество карт восприимчивости к возникновению оползней.

**Практическая значимость полученных результатов** состоит в их использовании при планировании строительства сооружений и самих методов оценки восприимчивости к возникновению оползней, что даёт возможность выявлять участки, предрасположенные к возникновению оползней.

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

1. Разрешения цифровой модели рельефа влияют не только на качество карт восприимчивости к возникновению оползней, но и на качество постобработки цифровой модели рельефа.
2. Зависимость развития оползневых явлений района каскада ГЭС на реке Вахш от сейсмических воздействий, крутизны склонов, атмосферных осадков, высотной зональности, кривизны склонов, индекса NDVI, индекса мощности потока, топографического индекса влажности и экспозиции склонов может быть выявлена с помощью полуколичественных и количественных методов анализа факторов оползнеобразования.
3. Прогнозирование оползней, особенно в рыхлых отложениях, которыми богат район работ, становится более доступным с помощью создания моделей восприимчивости к возникновению оползней. Построенные нами карты восприимчивости к возникновению оползней показывают более высокую результативность по сравнению с картой, созданной на основе экспертной оценки.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Соискатель самостоятельно оцифровал необходимые материалы в ГИС-базах данных района каскада ГЭС на реке Вахш, подготовил данные для проведения расчетов, выбора наиболее оптимального пространственного разрешения цифровой модели рельефа при создании моделей восприимчивости к возникновению оползней, провёл сравнение и верификацию моделей.

**Публикация результатов исследования.** Основные положения диссертации опубликованы в 11 печатных работах, из них 6 в изданиях, рецензируемых ВАК при Президенте РТ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации содержит 133 страницы компьютерного набора, 48 иллюстраций, 19 таблиц и включает 116 наименований библиографических источников.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

### 1.1.К истории изученности оползней

Вахшский каскад – крупнейший гидроузел Центральной Азии на реке Вахш, расположен в зоне контакта кристаллических пород южного Тянь-Шаня и северной части мезо-кайнозойских континентально-морских отложений Таджикской депрессии. В пределах каскада расположены пять действующих (Нурекская, Байпазинская, Сангтудинская ГЭС-1, Сангтудинская ГЭС-2, Головная) и одна строящаяся (Рогунская) гидроэлектростанция. Проектом предусмотрен ввод ещё двух объектов – Нурекской-2 и Шуробской гидроэлектростанций.

Систематическое изучение оползней района исследования, которые наносят значительный ущерб народному хозяйству, началось в 1969г. Наиболее подробная информация о закономерностях распространения, типизации и механизме формирования оползней Таджикистана приведена в работах В.И. Преснухина (1970-1975). В этих работах отображены результаты влияния климатических условий на развитие оползней, разработаны методы регионального инженерно-геологического прогнозирования оползневых явлений, установлено влияние основных природных факторов и крутизны склонов на развитие оползней и показана роль сейсмических воздействий в провоцировании оползневых явлений на различных территориях Таджикистана [19-21].

Большое внимание уделено формированию и развитию оползневых смещений, при которых наблюдается многократное изменение форм движения оползней, где имеют место переход пластической деформации в скольжение, скольжения в течение или обрушение. По форме движения пород оползневые деформации подразделены на 5 классов: течение, скольжение, обрушение, пластическая деформация и сложная. По механизму смещения пород выделены 9 типов оползней: поверхностные сплывы, оплывины, оползни потоки, оползни скольжения, оползни скола, оползни среза, оползни сдвига, оползни пластического течения и оползни сложного типа [25].

При детальном изучении установлено, что следует рассматривать каждый класс движений и тип оползневых деформаций как один из этапов развития и формирования современного рельефа под влиянием экзогенных сил. Типы оползневых деформаций, формы и характер развития, переходы из одного класса в другие классы и из одного типа смещений в другие типы, прежде всего, определялись по истории формирования рельефа и инженерно-геологическим условиям того или иного района, где в конечном итоге можно прогнозировать развитие оползневых деформаций [25].

В.И. Преснухиным и О.А. Романовым [22, 26] были изучены инженерно-геологические комплексы горных пород Таджикистана и связанные с ними экзогенные геологические явления. Установлено, что для развития экзогенных геологических процессов и явлений, в том числе оползней, весьма важную роль играет литолого-петрографический состав горных пород. Авторами составлена специальная мелкомасштабная инженерно-геологическая карта Таджикистана, где показаны закономерное распространение и развитие экзогенных геологических процессов. При инженерно-геологических исследованиях основное внимание уделено таким естественным факторам, как рельеф, геологическое строение, геоморфологические особенности, тектоника, гидрогеологические условия, литолого-петрографический состав пород и их физико-технические свойства, и физико-геологическим процессам. При этих исследованиях большое практическое значение имели сгруппированные в три класса (I - скальные и полускальные, II - несвязанные и III - связанные) инженерно-геологические комплексы горных пород в зависимости от их физических свойств.

Кроме того, **Преснухиным В.И.** были выявлены чёткая зависимость оползневой активности от количества и распределения атмосферных осадков, закономерности сезонного проявления оползней и тесная связь времени проявления оползней с режимом подземных вод и характером распространения атмосферных осадков. Также составлена карта интенсивности развития оползневых явлений, которая при сопоставлении с неотектонической картой Таджикистана показала зависимость развития оползней от амплитуды новейших

поднятий. Установлено, что чем больше амплитуда новейших поднятий, тем выше оползневая поражённость [19]. Выявлена коррелятивность развития оползней с крутизной склонов для территории Гиссара-Алая, Таджикской депрессии и Памира [18] и показаны взаимосвязь между сейсмической активностью и активностью проявления оползневых процессов [23].

Выявлены не только закономерности распространения и развития оползней, но и проделана огромная работа по типизациям оползневых смещений Таджикистана [24].

На основе изучения оползней, развитых на территории Таджикистана, был сделан вывод, что условия их формирования и развития разнообразны.

Не смотря на многочисленные работы по изучению закономерностей распространения и развития оползневых явлений Таджикистана, этот вопрос все еще остаётся дискуссионным.

В работе Виниченко С.М. наиболее чётко даются характеристики и признаки выделения различных групп сейсмогенных и несейсмогенных оползней и обвалов, приведена региональная классификация сейсмогенных оползней и обвалов, установлены связь с известными землетрясениями, одновременность образования на больших площадях, связь с сейсморазрывными и сеймотектоническими дислокациями, необычно сложные механизмы смещения, объёмы площади и глубина захвата, дан региональный прогноз сейсмогенных оползней и обвалов, который важен для обоснования схем инженерной защиты территорий [8].

В период независимости Республики в основном сотрудниками ИГСС НАНТ были проведены более значимые научно исследовательские работы. Среди них выделяются работы А.В. Шварца, А.Р Ищук и Н.Р Ищука, чья научная деятельность связана в основном с районом каскада ГЭС на реке Вахш [6,27,28,30].

Была оценена [27] роль сейсмичности на проявления оползневых процессов в среднем и верхнем течении реки Вахш, построены графики отношения площадей оползней к площади зоны сейсмического ускорения.

При оценке устойчивости склонов при сильных землетрясениях в связи с обеспечением безопасности каскада ГЭС на реке Вахш [116] выявлены потенциально неустойчивые участки склонов с использованием метода дешифрования оползневых явлений с учётом данных космической съёмки, дана оценка вероятности проявления оползневых явлений при сейсмических воздействиях в районе каскада ГЭС на р. Вахш. Надо отметить, что кроме сейсмичности были использованы две дополнительных процессообразующих фактора – крутизна, где в расчет принимались только склоны с крутизной от  $5^{\circ}$  до  $30^{\circ}$ , и средняя кривизна склона.

Не смотря на проведенные работы, оползневые процессы в районе исследования время от времени дают о себе знать, недостаточно использованы современные подходы к решению задач, хотя такие попытки предпринимались ранее [116]. Важно установление и других факторов оползнеобразования, в том числе выявление пространственных взаимосвязей между оползневыми явлениями и процессообразующими факторами.

## **1.2.Стратиграфия**

**Вахшский каскад** — крупнейший комплекс гидроэлектростанций расположена в долине реки Вахш, длина которой 524км; она является правым притоком самой мощной реки Центральной Азии Амударьи. Он сосредоточен в зоне контакта южного Тянь-Шаня и северной части Таджикской депрессии, являющейся эпигерцинской альпийской субплатформой восточного фланга Туранской плиты (рис. 3.1.)

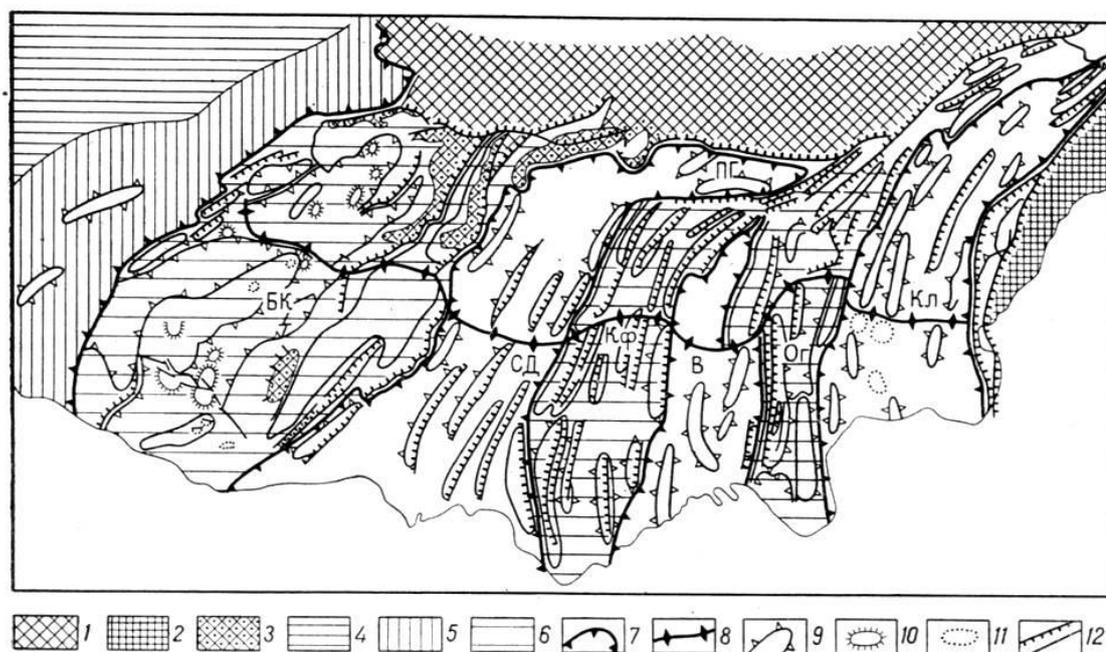


Рисунок 1.2.1. Тектоническая схема Таджикской депрессии

(по М. И. Варенцову и др. [2]):

1 – Тяньшаньская складчатая система; 2 – Памирская складчатая система; 3 – выходы на поверхность домезозойских пород в Байсун-Кугитангском антиклинорий; 4 – Туранская плита; 5 – Бешкентский прогиб; 6 – антиклинорийы Таджикской впадины; 7 – синклинийы Таджикской впадины; 8 – граница между северной и южной частями впадины; 9 – антиклинальные зоны; 10 – брахиантиклинальные поднятия и купола; 11 – соляные купола; 12 – разрывные нарушения: а – взбросо-надвиги, б – прочие разломы. БК – Байсун-Кугитангский антиклинорий, С – Сурхандарьинский синклиний, Кф – Кафирниганский антиклинорий, В – Вахшский синклиний, Ог – Обигармский антиклинорий, Кл – Кулябский синклиний, Пг – Предгиссарский прогиб

Вопросами геологического строения исследуемой территории в разные годы занимались С. Эдельштейн (1904-1906), А.В. Нечаев (1908), А. Крафт (1912), С.Н. Михайловский (1912), Р. Клебельсберг (1914), Д.В. Наливкин (1916, 1926), Н.А. Кудрявцев (1927), А.Р. Бурачек (1927-1934), П.К. Чихачев (1934), С.Н. Симак (1952), Б.М. Здорик (1932), А.С. Кобозев (1933), В.И. Попов (1932, 1933, 1935), М.Ф.Капельгородский (1935), Ю.А. Арапов (1936 г.), Н.И.Черняк (1937, 1944ф, 1950ф), П.И. Михайлицкий (1937), С.М.Киселев (1938ф), И.Е.Губин (1933, 1934, 1941, 1942, 1943, 1960), О.С. Вялов (1939), К.Овчинниковым, А.Т. Тарасенко

(1939-1947), В.И.Солуна (1942ф, 1953ф, 1956ф), С.А. Захаров (1950ф, 1958), Ю.А.Лихачев (1951), Н.Г.Власовым (1952, 1953ф), Л.В. Соколовой (1955ф), А.И. Филоновым, А.Н. Королем (1957ф) и ряд других исследователей.

Ниже приводится характеристика геологического строения исследуемой площади по материалам предыдущих геологов- исследователей.

В стратиграфическом отношении геологическое строение исследуемой территории разнообразно (рис. 3.1.1). Чехол состоит главным образом из осадочных пород палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов. Интрузивные образования представлены гранитами, гранодиоритами и кварцевыми диоритами верхне-каменноугольной системы ( $\gamma C_{2,3}$ ) и, возможно протерозоя (Pt?).

**Палеозой.** Палеозойские образования главным образом представлены отложениями трёх систем.

*Силурийская система.* Состоит из нескольких ярусов. Лландовери-венлок ( $S_{1ln+w}$ ), представлен сланцами, кварцитами, известняками, доломитами и эффузивами, мощность которых составляет 200м.

Породы занимают в основном южные склоны Гиссарского хребта и отроги Зеравшанского. Лудловский ярус связан с нижним отделом девонской системы и представлен известняками и доломитами мощностью до 140 м. Распространён в отрогах Зеравшанского хребта.

*Девонская и каменноугольная системы.* Состоят из объединённых среднего и верхнего отделов девонской системы и турнейского яруса (?) каменноугольной системы ( $D_{2+3}+C_{1t}$ ?). Представлены сланцами, яшмами, песчаниками, конгломератами, известняками, кислыми и средними эффузивами, мощность которых достигает 1000-1200м.

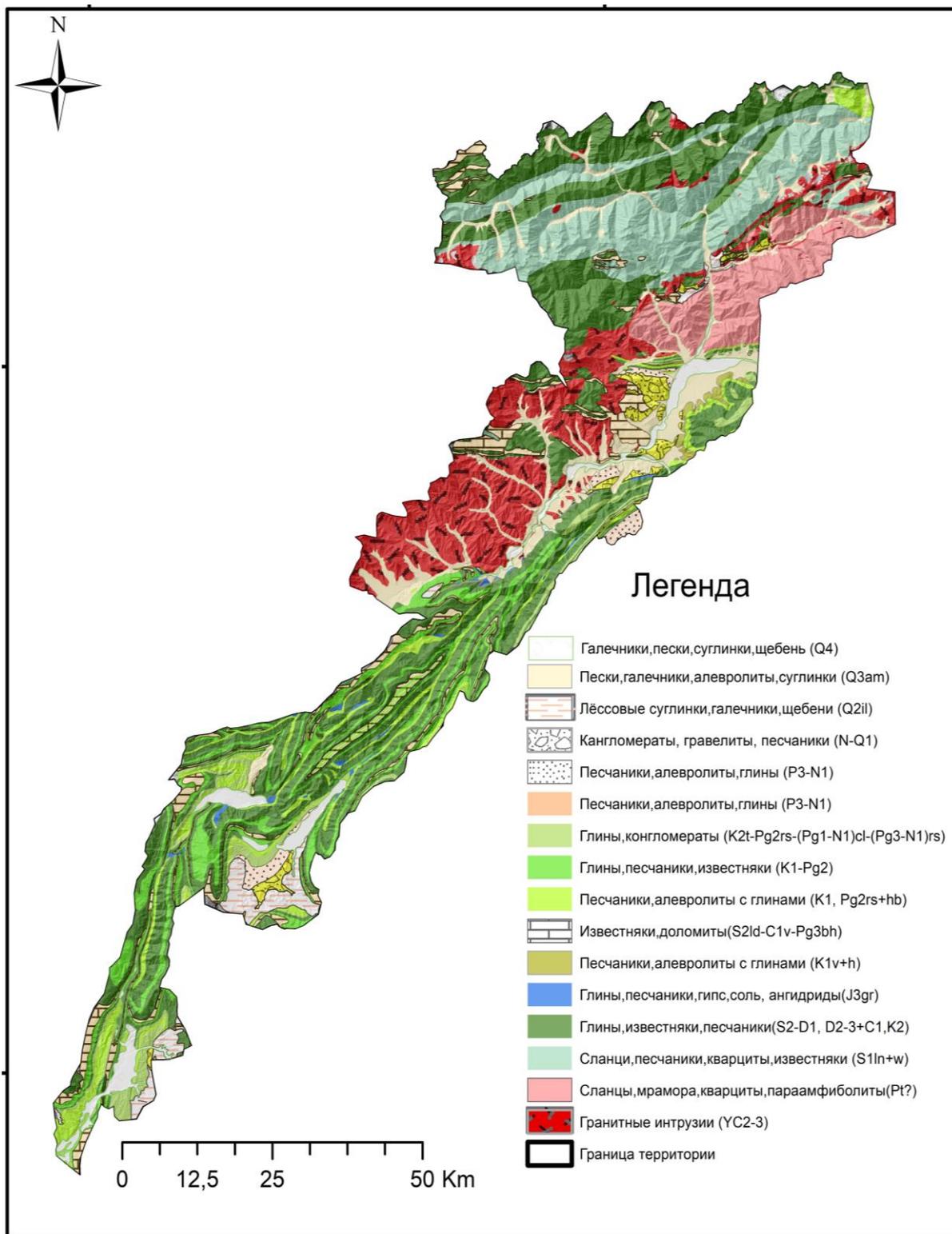


Рисунок 1.2.2. Геологическая карта среднего и верхнего течения долины реки Вахш (Ищук, 2015. На основе геологических карт СССР масштаба 1:200000)

**Мезозой.** Мезозойские отложения представлены породами юрской и меловой систем.

*Юрская система.* Отложения гаурдакской (рис. 1.2.2) свиты юрской системы мощностью 150-200м наблюдаются вдоль линий крупных разрывных нарушений и развиты в пределах хребтов Сурхку, Джангоу, Чимиджун и Вахш.



*Рисунок 1.2.3. Гипсы юрских отложений, Южный склон хр.Сурхку  
(Фото Оймухаммадоза И.С.и Файзуллоева Ш.А., 2021г.)*

Свита состоит из пачки кирпично-красных глин мощностью от 10м до 50 м и маломощных прослоев, линз и прожилка гипса. В нижней части разреза гаурдакской свиты, широким развитием пользуются гипсы.

*Меловая система.* Представлена нижним и верхним отделами. Отложения слагают часть исследуемой территории и представлены красноцветными континентальными, прибрежно-морскими и лагунными осадками (рис. 1.2.3.).

В нижнем отделе меловой системы выделены яванская и кызылташская свиты валанжинского и готеривского ярусов, обигармская свита барремского и аптского ярусов, каракузская, мингбатманская и лятобанская свиты альбского яруса.

Яванская свита (K<sub>1jv</sub>) подразделена на две подсвиты, нижняя мощностью от 30-65м до 240-338м представлена красно-бурыми глинами, алевролитами, красно-бурыми, буровато-серыми песчаниками, песчанистыми глинами и прослоями гипсов, а верхняя подсвита мощностью 80-100м сложена тёмно-бурыми глинами и алевролитами, тонкозернистыми песчаниками, зеленовато-серыми известковыми глинами, известняками и известковистыми песчаниками.



Рисунок 1.2.4 Обнажение меловых отложений в долине р. Вахш  
(Фото Оймухаммадоза И.С., ,2021г.)

Кызылташская свита ( $K_1kz$ ) мощностью 126-229м сложена красновато-бурыми песчаниками, алевролитами, доломитами и красно-бурыми глинами.

Массивные пласты обигармской свиты ( $K_1ob$ ), которая делится на две подсвиты, представлены алевролитами, зеленовато-серыми глинами, мергелями, известняками и красно-бурыми песчаниками. Общая мощность свиты варьирует в пределах 71- 284м.

Каракузская свита ( $K_1kr$ ) состоит из пачек бурых глин, алевролитов и светло-серых, светло-бурых песчаников. Мощность свиты составляет 110-220м.

Пласты мингбатманской свиты ( $K_1mn$ ) мощностью 119-218м сложены бурыми глинами, алевролитами, буровато красными и серыми песчаниками.

Лятобанская свита ( $K_{1lt}$ ) мощностью 180-240м представлена двумя подсвитами, которые включают зеленовато-серые, коричневые глины, серые мергели, доломиты, известняки, серые и красно-бурые песчаники, алевролиты, белые и розовые гипсы.

Верхнемеловые отложения представлены сеноманским, туронским, коньякским, сантонским, кампанским и маастрихтским ярусами.

Сеноманский ярус ( $K_{2cn}$ ), подразделяющийся на две части, представлен зеленовато-серыми и коричневыми глинами, серыми песчаниками и алевролитами, тёмно-серыми известняками с прослоями алевролитов, глин и песчаников. Мощность яруса составляет 170-260м.

Туронский ярус ( $K_{2t}$ ). Выделены нижний и верхний подярусы, общая мощность которых варьирует в пределах 170-220м. Толща туронских отложений представлена серыми глинами, известняками, мергелями и конкрециями карбонатных образований. Присутствуют также белые и розовые гипсы.

Отложения коньякского яруса ( $K_{2cn}$ ) мощностью 100-200м характеризуются переслаиванием известковистых глин зеленовато-серого цвета и серых органогенных известняков и мергелей.

Отложения сантонского яруса ( $K_{2s}$ ) делятся на две пачки, нижняя из которых представлена известняково-глинистыми (известняки, глины и мергели) морскими образованиями, а верхняя – зеленовато-серыми, малиновыми глинами и розовыми гипсами лагунного происхождения. Мощность яруса составляет 120-190м.

Кампанский ( $K_{2c}$ ) и маастрихтский ( $K_{2m}$ ) ярусы расчленены на две части и представлены отложениями известковисто-глинистого характера. В разрезе этих ярусов присутствуют зеленовато-серые глины с прослоями известняков, ракушечников и мергелей. Мощность этих отложений составляет 60-110м.

**Кайнозой.** Представлен отложениями палеогена, неогена и четвертичной системы.

*Палеогеновая система.* Палеоценовые, эоценовые и олигоценовые отложения палеогеновой системы в основном представлены морскими, лагунными и лагунно-

континентальными образованиями, имеющими согласные контакты с породами меловой и четвертичной систем.

Акджарские слои ( $P_{1ak}$ ) палеоцена мощностью 80-170м состоят из серых песчаников, бурых доломитов и гипсов с прослоями известняков, доломитов, глин и мергелей.

Бухарские слои ( $P_{1bh}$ ) палеоцена представлены светло-серыми, буроватыми и желтоватыми известняками с прослоями серых глин и гипсов. Общая мощность бухарских слоев составляет 150-170м.

В пределах исследуемой площади эоцен характеризуется сузакскими, алайскими, туркестанскими, риштанскими, исфаринскими, ханабадскими и сумсарскими слоями.

Сузакские слои ( $P_{2sz}$ ) сложены толщей зеленовато-серых и серых глин с прослоями мергелей и глинисто-песчанистых известняков. В глинистые толще места встречается прослой углистых сланцев и фосфоритов. Мощность этих слоев изменяется от 25 до 77 м.

Алайские слои ( $P_{2al}$ ) сложены серыми, зеленовато-серыми плотными известковистыми глинами, темно-серыми мергелями с прослоями глинистых известняков. Мощность алайских слоев изменяется от 100 до 205 м.

Туркестанские слои ( $P_{2tr}$ ) включают серые, зеленовато-серые, часто известковистые глины с редкими прослоями известняков и мергелей. Местами наблюдаются прослойки песчаников и алевролитов. Мощность этих слоев достигает 80-100 м.

Риштанские слои ( $P_{2rs}$ ) сложены белыми сахаровидными гипсами, коричневыми и бурыми песчаниками, алевролитами и глинами. Иногда в риштанских слоях встречаются медистые песчаники. Мощность риштанских слоев изменяется от 120 до 182 м.

Исфаринские и ханабадские слои ( $P_{2is-hn}$ ) мощностью 50-115 м представлены зеленовато-серыми и серыми глинами с прослоями известняков, мергелей и песчаников.

Сумсарские слои ( $P_{2sm}$ ) сложены коричневыми, коричневато-бурыми глинами с редкими прослоями глинистых известняков и зеленовато-серых глин. Встречаются и тонкозернистые известковистые песчаники с прослоями бурых глин. Мощность этих слоев изменяется от 60 до 80 м.

Шурисайские слои ( $P_{3sr}$ ) олигоцен с общей мощностью 850-1100 м сложены пачкой переслаивающихся песчаников, алевролитов и глин с прослоями гипсов.

*Неогеновая система.* Отложения этой системы с хорошо обнаженными разрезами в основном выполняют мульды и крылья синклинальных складок.

Миоценовые осадки неогена подразделяются на больджуанскую ( $N_{1bl}$ ) и нерасчлененные хингоускую и тавильдаринскую свиты ( $N_{1hn+tv}$ ).

Больджуанская свита мощностью 500-600 м сложена толщей массивных кирпично-красных песчаников с прослоями глин и алевролитов. Встречаются и неяснослоистые, массивные алевролиты с редкими прослойками песчаников и глин.

Нерасчленённые хингоуская и тавильдаринская свиты сложены мощной толщей (100–1350 м) серых песчаников и красноцветных алевролитов с прослоями глин, и линз гравилатов и конгломератов.

*Четвертичная система.* Древние нижнеплейстоценовые осадки этой системы обнажены вдоль р.Обигарм и представлены суглинками, глинами и песчаниками с обломками коренных пород. Видимая мощность их достигает 50-70 м [116]. На склонах хребтов Сурхку, Санглак и западных склонах хребтов Гулизиндан и Вахш отложения среднеплейстоценового возраста представлены лёссовыми суглинками и реже галечниками мощностью от первых метров до 70-100 м. Фрагменты отложений позднеплейстоценового возраста сложены песками, галечниками, алевролитами и суглинками. Мощность этих отложений составляет 70-100 м. Именно в отложениях этого возраста наблюдаются основная масса оползневых явлений.

В современной долине р. Вахш голоценовые отложения выражены

аллювиальными галечниками мощностью до 150-200 м.

### 1.3. Тектоника

Тектоника района каскада ГЭС на реке Вахш интересна тем, что она расположена между двумя громадными структурами Южного Тянь-Шаня и Таджикской депрессии, в пределах которого находится западная часть Южного Тянь-Шаня, включающая в себя южный склон Каратегинского хребта и небольшой участок южного склона горного узла, находящегося на стыке Зеравшанского и Алайского хребтов [16].

В орографическом плане район работ осложнён большим количеством оврагов, холмов и хребтов. В северо-западной части район исследований разграничивается Зеравшанским хребтом. Западную часть района ограничивают водоразделы Сурхского и Каратауского хребтов. Хребты Вахшский, Сипоктау, Сарсаряк и Табакчи ограничивают район с востока. Высоты орографических элементов района каскада ГЭС на р. Вахш повышаются с юга на восток.

**Южный Тянь-Шань.** Несмотря на то, что герцинские структуры, слагающие область Южного Тянь-Шаня, завершили геосинклинальное развитие в конце палеозоя [17], простираения альпийских складок совпадают с простираением герцинских структур. Мезокайнозойские отложения в зонах контакта с надвинутыми палеозойскими блоками наблюдаются в виде складок. Размах области интенсивной деформации в Южном Тянь-Шане не превышает 2-3 км, в большинстве случаев – порядка сотен метров.

С запада на восток структурные элементы Каратегинского хребта главным образом представлены Иоским, Калаидаштским, Лигунским, Навабадским, Саридаштским, и Гижматским блоками [3]. Эти блоки имеют разную степень сохранности пород чехла мезо-кайнозоя. Форма блоков в плане вытянутая в северо-восточном направлении, и их выделяют хорошо выраженные в рельефе крутопадающие разрывы. За неоген-четвертичное время у вышеупомянутых блоков дифференцированное вздымание варьируется от 200 до 4500м [15].

В Южном Тянь-Шане взбросы являются основными разрывными нарушениями, которые в основном наблюдаются в зоне, протягивающейся по

южной границе области Южного Тянь-Шаня, формируя глубинный Гиссаро-Кокшалский разлом. Этот разлом протяжённостью 800 км развивался с палеозоя до наших дней. Принимая во внимание вышеизложенные признаки и высокую сейсмичность, Гиссаро-Кокшаалский разлом рассматривается как нарушение регионального масштаба.

Гиссаро-Кокшаалский разлом на территории Рогунской ГЭС наблюдается только у Нуробада и в устье сая Самсолык к западу от посёлка Субулак. Наличие этого регионального нарушения на отрезке Субулак-Нуробад характеризуется интенсивной трещиноватостью, дроблением палеозойских пород, наличием зеркал скольжения субширотной направленности с почти вертикальным падением.

К востоку от хр. Сурхку на контакте нижнемеловых красноцветных и гипсоносных соленосных образований юрского возраста с отложениями неогена наблюдается межзональный Илякско-Вахшский краевой разлом протяжённостью 500 км. Разлом практически задернован, так как он везде покрыт отложениями четверичного возраста, за исключением обнажённых пород глубоких саёв Ходжа-Алишо, Дарай-Намак, Яхч и Порча-Хошак.

Сложная тектоника района исследования, обуславливает раздробленность горных пород в особенности вблизи разломов, где наблюдаются линейная распространения оползней.

**Таджикская депрессия.** Площадь Таджикской депрессии осложнена сериями хребтов, гребней и гряд, которые имеют почти меридиональное направление в западной и юго-западной частях. Южная орографическая часть Таджикской депрессии состоит из невысоких гряд северного и северо-восточного направления. Структуры северо-восточной части Таджикской депрессии, соединяясь, формируют достаточно плотную горную территорию.

Фундамент структуры Таджикской депрессии состоит из консолидированных образований допалеозойского возраста и перекрыт осадочным чехлом мезокайнозоя. Первоначальные или истинные залегания

мезокайнозойских образований Таджикской депрессии нарушены из-за присутствия сложных разрывов.

Захаров. С. А., интерпретируя Таджикскую депрессию как макроструктурную единицу, разделяет ее на ряд крупных структурных единиц, которых в свою очередь рассматривает как антиклинории и синклинории [16]. Согласно данной схеме, всю площадь исследуемой территории занимает Вахшский антиклинорий. Эта крупная форма собирает воедино суперсерию параллельно сформировавшихся антиклинальных и синклинальных складок.

Антиклиналь Сурхку приурочена к северо-западной части исследуемой территории и ориентирована в субмеридиональном направлении. Шарнир структуры ныряет к югу, а ее дугообразная осевая плоскость местами оседает к северо-западу. По морфологии и степени дислоцированности антиклиналь подразделена на северную и южную.

Северное звено складки длиной 16 км срезано Илякско-Вахшским разломом и перекрыто породами четвертичных толщ. Оставшая часть антиклинали характеризуется асимметричным и сундучным типом складки. Углы падения пород  $10-12^{\circ}$  в сводовой части и  $40-50^{\circ}$  на крыльях. Огромное число крутопадающих ( $50-80^{\circ}$ ) разрывных нарушений делают свод и крылья складки очень сложными. Углы падения пород на крыльях обычно достигают  $10-40^{\circ}$ .

Южное звено антиклинали хорошо обнажено, и видны оба крыла. Гипсы верхней юры занимают свод антиклинали, а на крыльях расположены меловые осадки. Свод и крылья антиклинали в поперечном профиле показывают, что она является асимметричной остроугольного типа.

Вдоль северо-западного (8 км) и юго-восточного (5 км) крыльев антиклинали Сурхку меловые отложения имеют опрокинутые залегания. Угол падений пород  $40-85^{\circ}$ .

Кавдонский взброс и сброс Сурхку осложняют свод структуры.

Гашионская субмеридиональная синклиналь протяженностью почти в 45 км наблюдается вдоль юго-восточного склона хребта Сурхку. Осевая плоскость имеет северо-западное направление, а шарнир спускается к югу. Мульда и крыло

данной структуры видны из-под пород Ионахшской антиклинали. Отложения мела и палеогена в складке имеют нормальное залегание  $20-50^{\circ}$ . Опрокинутое залегание пород встречается на юге с углами падения пород  $40-85^{\circ}$ .

Северная часть синклинали имеет несколько взбросов и сбросов протяженностью 5-7 км с амплитудой смещения 50-20 м.

Ионахшская субмеридиональная антиклиналь протяженностью 40 км наблюдается вдоль восточной части склона хребта Сурхку. В строении складки принимают участие меловые и верхнеюрские гипсы.

Южная часть антиклинали протяженностью 8 км имеет гребневидно-асимметричную форму с более крутым крылом в восточной ее части. Шарнир складки имеет южное погружение (60-700). Породы залегают нормально с углами падения  $30-40^{\circ}$  в своде и  $50-80^{\circ}$  на крыльях антиклинали. В северной части структуры наблюдается ее восточное крыло. Опрокинутое залегание меловых толщ наблюдается в северной части к.Ионахш, где они падают под углом  $50-85^{\circ}$ .

Ионахшский взброс наблюдается в северной части района исследований вдоль Ионахшской антиклинали. В пределах кишлака Сафетдара структура соединяется с Тагекским взбросом. Верхнеюрские и нижнемеловые отложения восточного крыла Ионахшской антиклинали имеют западное направление и перекрывают восточное крыло Гашионской синклинали, которое сложено осадками эоцена.

Тегакская гомоклираль протяженностью 25 км прослеживается по длине восточной части хребта Сурхку и имеет субмеридиональное направление. В сводовом участке структуры встречаются верхнеюрские гипсы и меловые осадки. Тегакская гомоклираль обрамлена двумя структурами – Фарко-Джуругской синклиналью с юго-востока и Тегаским взбросом с северо-запада.

Тегакский взброс протяженностью 25 км отмечается в меловых отложениях по своду гомоклинали и сочленяется со сбросом Сурхку.

Фарко-Джуругская синклираль наблюдается в юго-восточной части склона хребта Сурхку.

Отложения риштанских слоев структуры. Крылья синклинали состоят из

полного разреза меловых отложений. Северо-западное крыло структуры имеет опрокинутое залегание пород с углами падения 60-80°. Породы юго-восточного крыла имеют нормальные залегания с углом падения 50-85°.

Джангоуская антиклиналь длиной 40 км имеет субмеридиональное направление. В строении складки принимают участие меловые толщи и гипсы верхней юры. Северный край антиклинали протяжённостью около 25 км осложнен разрывными нарушениями. Южная часть структуры хорошо выражена и размыта до яванской свиты. Шарнир складки падает (до 50°) в южном направлении. Породы, составляющие складку, имеют угол падения не более 20°.

Шалипаинская синклиналь протяжённостью 70 км имеет субмеридиональное направление. В её строении принимают участие Сарыкомарский и Гулизинданский взбросы и Вахшский надвиг.

В северном краю в районах к.к. Хонко, Туриоб, Бутион и Тагобикала синклинальная структура протяжённостью 28 км сложена породами палеогена и неогена. Она имеет сильно сжатую, узкую, асимметричную форму и опрокинута в северо-западном направлении. Мульда складки состоит из красноцветных песчаников бальджуанской свиты, а крылья сложены толщами палеогена с азимутом падения юго-восточного направления под углами 50-85°. Южная часть синклинали протяжённостью 42 км занимает значительно большую часть структуры. Шарнир структуры падает ровно в южном направлении.

Шалипаинская синклиналь на исследуемой территории образует асимметричную и чуть падающую к северо-западному направлению складку. Большая часть пород восточного крыла структуры имеет опрокинутое залегание. Угол падения большинства пород на крыльях синклинали равняется 50-70°.

Вахшский надвиг является границей Яхсуйского синклинория и Вахшского антиклинория. Структура протяжённостью 42 км имеет субмеридиональное направление. Поверхность структуры падает в восточном направлении под углом 35-60°, и амплитуда минимального смещения превосходит 3 км. Значительная часть осадков синклинали приурочена к левобережью р. Вахш.

Гулизинданский взброс является границей между Шалипаинской

синклиналью и антиклиналью. Затухание Гулизинданского взброса от Вахшского надвига осуществляется в осадках палеогена в пределах кишлака Шалипая и наблюдается к югу вдоль восточного крыла синклинали. Он протягивается на расстояние около 15 км. Гулизинданский разлом имеет пологую форму у поверхности ( $25-30^{\circ}$ ) и круто падающую на глубине ( $75-80^{\circ}$ ). Эта разрывная структура формировалась в ходе всего тектонического этапа. Размах вертикального смещения верхнеюрских и неогеновых пород, которые имеют контакт со взбросом, составляет 2500-3000 м [115].

Породы мела и палеогена Сангалакской антиклинали вдоль южного крыла складки имеют нормальное залегание с падением к югу под углами  $10-35^{\circ}$  в сводовой части и  $40-55^{\circ}$  – на крыле. Антиклиналь меняет своё направление южнее кишлака Кароташ с широтного на меридиональное и потом к югу. Крылья и свод структуры обнажены повсеместно с максимальным поднятием свода до 400м, она характеризуется как остроугольная и асимметричная складка. В своде структуры встречаются верхнеюрские породы соленосного состава, прорывающие осадки нижнего мела. Разрыв имеет восточное падение под углом  $70^{\circ}$ . Западное крыло структуры слагают породы мелового и палеогенового возрастов. Породы в большинстве случаев имеют восточное падение под углами  $20-40^{\circ}$ .

Гулизинданскую антиклиналь занимают хребты Сипоктау в северной части и Зимистон в южной. Шарнир складки имеет частое изгибание, уклонно ныряя к югу. Осевая плоскость антиклинали отпускается к западному направлению и обладает формой крутой дуги. В северной части этой антиклинальной структуры встречаются альбские верхнемеловые и палеогеновые породы. Верхнемеловые породы имеют нормальное западное падение под углами  $30-45^{\circ}$ . Палеогеновые породы больше всего встречаются в опрокинутом залегании, с углами падения пластов  $40-60^{\circ}$ .

Вдоль левого борта р. Вахш свое место занимает Яхакский разлом, который имеет северо-восточное направление. В пределах Нурабадского района разлом

придвигается к правому борту долины, меняя свою ориентацию. Породы палеозойского и неогенового возрастов контактируют по Яхакскому разлому. Обрыв левого борта долины реки Вахш ниже устья правого притока – р. Оби-Чушон, а также меж оврагами Яхч и Миондара значителен как участок выхода обнажений сместителя нарушений. В первом из вышеупомянутых участков граниты палеозойского возраста надвинуты на конгломераты неогенового возраста. В зоне контакта граниты измельчены и превращены в милонитизированную породу. В измельченных гранитах попадаются галька, изредка линзы и конгломераты. Сместитель Яхакского разлома имеет северо-западное падение под углом  $60^{\circ}$ . Мощность дробления гранитных пород в районе сая Ходжа-Алишо превосходит 50 м. По всей видимости, Яхакский разлом сформировался в новейшее время, и предполагается, что он является составной частью Гиссарококшаалского разлома.

#### **1.4. Сейсмичность**

Геодезические данные глубинного сейсмического зондирования под Памиром и Гиндукушем, которые рассматриваются как зона столкновения движущейся на север Индийской и на юг Азиатской плит, свидетельствуют о том, что процесс деформации в пределах Таджикской депрессии все ещё продолжается. Из-за высокой сейсмичности Таджикская депрессия привлекает к себе внимание многих исследователей [64, 68, 102]. Анализ каталога землетрясений [67, 68, 98, 102] свидетельствует, что сейсмичность в основном проявляется активно вдоль надвиговой системы Памира на севере и хребта Петра Первого на северо-западе, с глубиной менее 12 км (в большинстве случаев). В Таджикской депрессии сейсмичность в основном активна под осадочным чехлом на глубине 40 км [61, 69]. Последние 110 землетрясений разрушительного характера с магнитудой более 7, включая Хаитское землетрясение 1949 г и Сарезские землетрясения 1911 и 2015 [69, 78] сопровождались вторичными экзогенными процессами, в особенности оползнями.

Согласно действующей карты общего сейсмического районирования территории Таджикистана, сделанной в 1978 году, авторами которой являются

Бабаев А.М., Кошлаков Г.В., Мирзоев К.М., территория района каскада ГЭС на реке Вахш занимает 7-, 8- и 9- бальные зоны (рис. 1.4.1).

В связи с тем, что район работ в экономическом плане является важным объектом, в 2010 г. в Институте сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН РТ были начаты работы по анализу имеющихся данных и существующих современных методов расчета сейсмических воздействий для составления новой карты сейсмической опасности территории Таджикистана на основе созданной ГИС-базы данных.

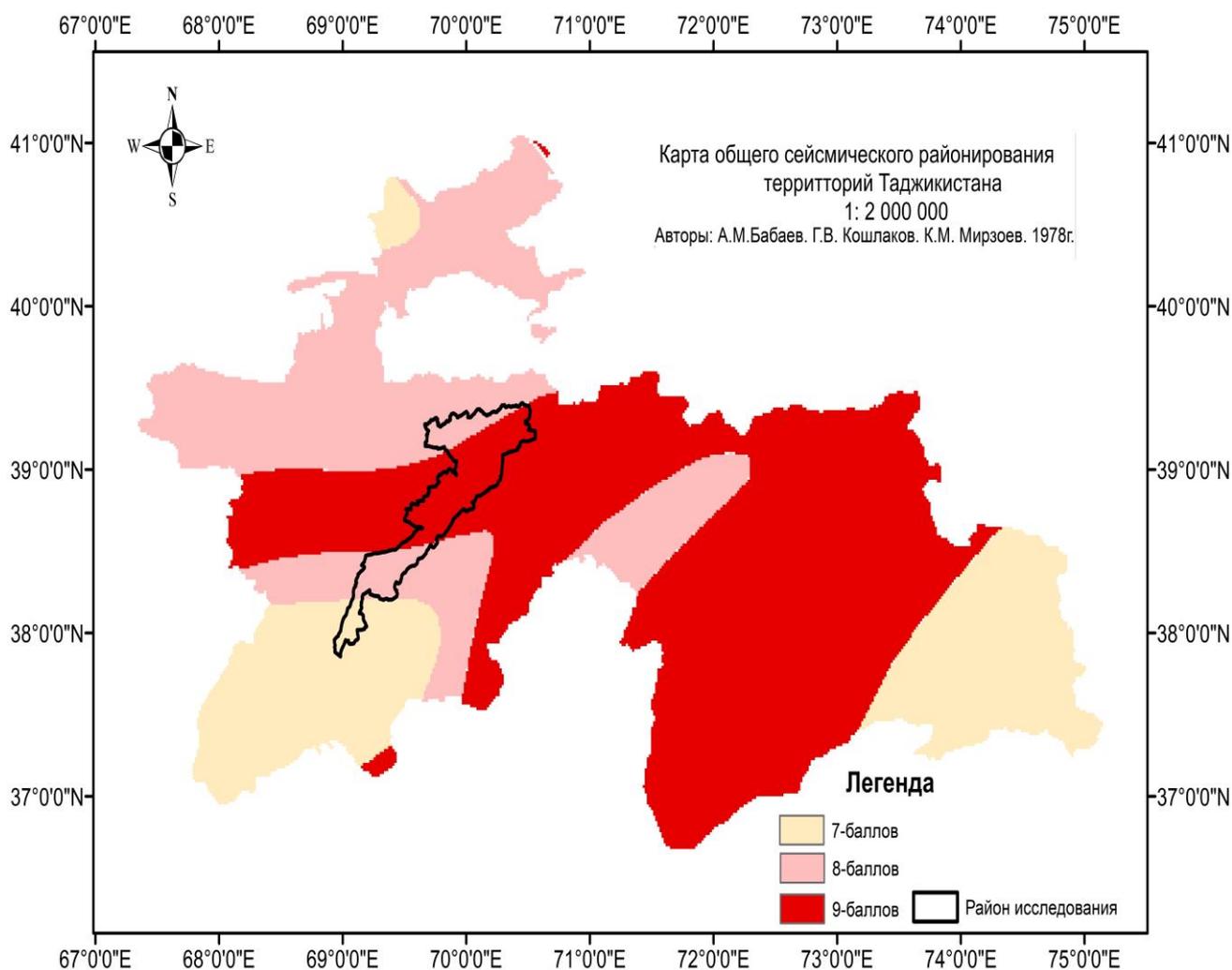


Рисунок 1.4.1. Карта общего сейсмического районирования территорий Таджикистана (по Бабаеву А.М., Кошлакову Г.В. и Мирзоеву К.М., 1978) с обозначением в ней района каскада ГЭС на реке Вахш

При оценке сейсмической опасности использовались зоны активных разломов (Гиссаро-Кокшаальский, Илякско-Вахшский, Дарваз-Каракульский,

Северо-Гиссарский и Зеравшанский), которые попадали в выделенную область радиусом 160 км с центром в месте расположения плотины Рогунской ГЭС.

### **Выводы по первой главе:**

1. История изученности района каскада ГЭС на реке Вахш показывает, что проблемы, связанные с проявлениями экзогенных геологических процессов, в особенности оползневых, решены не до конца. В мировой практике широко используются методы и данные дистанционного зондирования, в особенности при решении задач регионального и национального масштабов по снижению рисков от оползневых явлений. Проведённые ранее работы полностью не охватывают все вопросы по закономерностям проявления и прогнозу оползневых явлений, что обуславливает необходимость продолжения начатых работ.
2. Наиболее неустойчивыми горными породами, слагающими склоны изучаемого региона, являются лёссовидные суглинки, известняки и глины. Они больше всего теряют свою устойчивость при воздействии атмосферных осадков.
3. Сложное геологическое строение района каскада ГЭС на реке Вахш обуславливает активное проявление экзогенных геологических процессов, в особенности оползневых явлений. Породы с наиболее низкой устойчивостью главным образом локализируются вблизи разломов разного порядка, где наблюдается линейное распространение оползней.
4. Район исследования занимает 7-, 8- и 9-бальные зоны по карте общего сейсмического районирования Таджикистана. Интенсивные сейсмопроявления на данной территории обычно сопровождаются оползневыми явлениями.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Данные дистанционное зондирование.** Дистанционное зондирование, которое осуществляется через среду электромагнитного излучения, состоит из четырёх компонентов. Первым компонентом системы дистанционного зондирования служит источник электромагнитного излучения. Он является естественным, происходящим от солнца и земли путём излучения, или искусственным, вызываемым с помощью аппаратов для дистанционного зондирования. Второй компонент системы дистанционного зондирования относится к объектам на поверхности земли, которые определяют электромагнитные излучения, полученные дистанционным датчиком. Существенные физические, химические и биологические свойства объектов определяют количество излучения от них и измеряются датчиком на определённой длине волны. Электромагнитное излучение может также взаимодействовать с атмосферой между поверхностью земли и датчиком, способствуя или изменяя излучение, достигающее датчика, и это составляет третий компонент системы дистанционного зондирования. Последним компонентом системы дистанционного зондирования является датчик, который дистанционно измеряет излучение из окружающей среды Земли [10]. Электромагнитное излучение является каналом, посредством которого создаётся связь между компонентами системы дистанционного зондирования. Этот процесс можно называть формой передачи энергии от одной точки к другой сквозь пространство и среду, который ведёт себя двумя неразделимыми способами: как регулярные волны энергии и как быстро движущиеся и неделимые частицы или фотоны. Первая описывается базовой волновой теорией, вторая – квантовой теорией [10].

Данные ДЗЗ имеют очень большую ценность для решения прикладных задач таких, как: освоение недр, при проведении оценки нерешённости разграничение земель, при оценке устойчивости природных и антропогенных систем, при выявлении экологических проблем городов, контроля загрязнения атмосферы, изучения экологического состояния поверхностных вод, изучения

растительного покрова, лесных ресурсов, контроля водных ресурсов, сельского хозяйства и мониторинга опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций [9]. Карта земельного покрова или землепользования является выходным материалом при обработке данных дистанционного зондирования, где объекты района исследования разбиваются на картографические единицы. В пределах изучаемой области можно наблюдать сотни таких единиц, которые можно получить после интерпретации данных дистанционного зондирования [9].

В случаях интерпретации или обработки изображений выражения «земельный покров» и «землепользование» используются очень часто. Они имеют близкую между собой характеристику. Земельный покров описывает физическое состояние Земли или типы объектов, таких, как песок, вода и асфальт. Землепользование охватывает всю деятельность человека на определённой территории или с какой-либо экономической целью используется участок, например, природного заповедника, промышленного района или города [9].

Объекты поверхности Земли имеют энергетические и поляризационные излучения с различным электромагнитным спектром (рис. 2.1). Эти параметры весьма респектабельны, так как при изучении и определении локации, модификаций, свойств и вида объектов окружающей среды измеряются энергетические и поляризационные излучения [9].

Классификация изображений в дистанционном зондировании включает в себя кластеризацию пикселей снимков в группу классов, так чтобы они имели близкие друг к другу свойства. Выявления спектральных характеристик изображения земельного покрова является основой для классификации изображения. При создании сигнатур большое значение имеет их отличие от других пространственных спектральных откликов составных частей земельного покрова или землепользования. Существует много методов классификаций изображения, но обобщённо они подразделяются на контролируемый и неконтролируемый подходы [79, 52].



Рисунок 2.1. Диапазоны электромагнитного спектра

Выделение пространственных объектов является важнейшей составной частью контролируемой классификации изображений. Секционирование объектов осуществляется определением спектральных характеристик классов путём опознавания элементов выборки или обучающих зон со стороны оператора. Оператор, производящий действия, должен быть знаком с объектами района исследований, так как это является требованием контролируемой классификации [12].

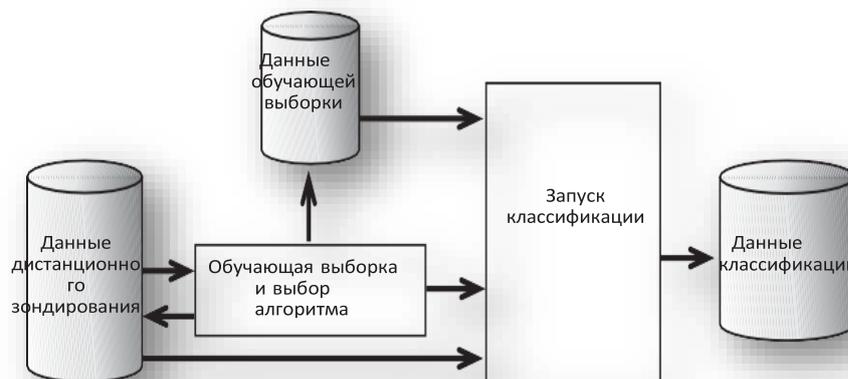


Рисунок 2.2. Порядок классификации изображения, по данным [9]

Наиболее важным требованием контролируемой классификации является фактическое знание состояний объектов района исследования, однако при

отсутствии данных взамен контролируемой классификации используется неконтролируемая классификация. В неконтролируемой классификации алгоритмы кластеризации применяются для разделения пространства объектов на несколько кластеров [12].

В общем описании в контролируемой классификации изображений оператор выявляет все кластеры в процессе обучающей выборки, а в неконтролируемой классификации алгоритм кластеризации автоматически находит и определяет ряд кластеров в пространстве признаков.

Последние исследования показали [79], что контролируемый метод является наиболее точным и подходящим для дистанционной классификации объектов, и, исходя из этого, для района исследований использована контролируемая классификация изображений.

После того как все образцы обучающей выборки будут выделены, осуществляется классификация изображений. Для реализации процесса выбирается алгоритм классификации. В дистанционном зондировании существует несколько алгоритмов классификации:

- коробчатая классификация;
- классификация по методу максимального подобия;
- классификация из кластеров;
- вероятность классов;
- метод главных компонент.

Оценка точности классификации изображений является важнейшим процессом, без которого полученные результаты имеют малую ценность. Данная процедура проводится для оценки выходного материала, полученного в результате обработки данных дистанционного зондирования. Результаты оценки важны для получения гарантии качества классификации и доверия пользователей к продукту [55,104]. Для проведения оценки требуются фактические данные или эталонные пиксели в виде точек [9]. Чем больше точек, тем выше качество оценки точности классификации. Однако фактические данные – это не единственное, что требуется для оценки, следовательно, создаётся матрица погрешностей, где

изложены численные выражения правильно и неправильно классифицированных пикселей (таблица 2.1).

Ячейки, расположенные по диагонали матрицы ошибок, представляют собой количество правильно классифицированных пикселей ( $D_{ii}$ ). Общая точность классификации ( $T$ ) может быть получена из вышеизложенной таблицы путём подсчёта отношения количества правильно классифицированных пикселей ( $\sum D_{ii}$ ) к общему количеству пикселей ( $N = \sum R_i = \sum C_j$ ) района исследования. Это мера выражается в процентах и подсчитывается следующим уравнением:

$$T = \frac{\sum D_{ii}}{N}, \quad (2.1)$$

где:  $\sum D_{ii}$  – общее количество правильно классифицированных пикселей,  $N$  – общее количество пикселей в матрице ошибок.

Таблица 2.1. Форма матрицы погрешностей или искажений [6]

Классификация	Классы на местности					Итого в строках
	1	2	3	----	М	
<b>1</b>	$D_{11}$	$N_{12}$	$N_{13}$	----	$N_{1M}$	$R_1$
<b>2</b>	$N_{21}$	$D_{22}$	$N_{23}$	----	$N_{2M}$	$R_2$
<b>3</b>	$N_{31}$	$N_{32}$	$D_{33}$	----	$N_{3M}$	$R_3$
<b>----</b>	----	----	----	----	----	----
<b>М</b>	$N_{M1}$	$N_{M2}$	$N_{M3}$	----	$D_{MM}$	$R_M$
<b>Итого в столбцах</b>	$C_1$	$C_2$	$C_3$	----	$C_M$	$N$

Точность производителя – это точность на основе ссылок, которая вычисляется путём просмотра прогнозов, полученных для класса, и установления процента правильных прогнозов:

$$PA = \frac{D_{ij}}{R_i}, \quad (2.2)$$

где:  $PA$  – точность производителя,

$D_{ij}$  – количество правильно классифицированных пикселей в строке  $I$  (в диагональной ячейке),  $R_i$  – общее количество пикселей в строке  $i$ .

Точность пользователя – это точность на основе карты, которая вычисляется путём просмотра справочных данных для класса и установления процента правильных прогнозов для этих выборок. Её можно рассчитать по следующей формуле:

$$UA = \frac{D_{ij}}{C_j}, \quad (2.3)$$

Где: UA – точность пользователя,

$D_{ij}$  – количество правильно классифицированных пикселей в столбце  $j$  (в диагональной ячейке),

$C_j$  – общее количество пикселей в столбце  $j$  [40].

Более полной мерой точности классификации является коэффициент Каппа. Этот коэффициент сравнивает количество пикселей в каждой ячейке матрицы ошибок с возможностью распределения пикселей в виде случайной величины. Коэффициент Каппа использовался для измерения точности классификации, поскольку он учитывает все элементы в матрице погрешностей или искажений, а не диагональные элементы [40]. Коэффициент Каппа рассчитывался по формуле (4).

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{j=1}^m D_{ij} - \sum_{i=1}^m R_i \cdot C_i}{N^2 - \sum_{i=1}^m R_i \cdot C_j}, \quad (2.4)$$

Где:  $\hat{K}$  - Каппа-коэффициент,

$N$  – общее число пикселей,

$m$  – число классов,

$\sum D_{ij}$  - общее число диагональных элементов матрицы ошибок (сумма правильно классифицированных пикселей во всех изображениях),

$R_i$  - общее число пикселей в строке  $i$ ,

$c_j$  - общее число пикселей в строке  $j$ .

Таблица 2.2. Критерии оценки статистики Каппа [40]

Статистический №	Статистики Каппа	Сила соглашения
1	<0.00	Согласования нет
2	0.00-0.20	Согласования очень слабая
3	0.21-0.40	Согласования средней силой
4	0.41-0.60	Согласованность сильная
5	0.61-0.80	Согласованность очень сильная
6	0.81-1.00	Совершенная

**Карта инвентаризации оползней.** Инвентаризация оползней является основой для оценки восприимчивости, опасности и риска оползней [49, 63]. Она необходима для построения моделей восприимчивости к возникновению оползней, которые прогнозируют оползни на основе прошлых условий их возникновения [60, 65]. Если они недостаточно доступны, больше внимания следует уделять экспертной оценке и суждению. Поэтому при прогнозировании оползней нам необходимо выявить места локализации прошлых оползней [71].

Карта инвентаризации оползней создаётся с использованием архивных данных [89, 100] и дешифровка материалов дистанционного зондирования [72, 91].

При дешифровке данных дистанционного зондирования, в особенности при интерпретации материалов аэрокосмической съёмки, хорошо выделяются зоны гравитационных деформаций склонов. Затухшие или древние оползни практически не имеют угрозу для окружающей среды, кроме отдельных случаев, когда возможна их повторная активизация. Более опасными являются участки, где есть вероятность возникновения будущих оползней. Выделение участков территорий, на которых кроме единичных существующих оползней возможно образование новых оползней в будущем (например, при увеличении увлажнённости грунтов или при землетрясениях), делается путём дешифровки материалов аэрокосмической съёмки. Такие характерные черты имеют районы распространения мощных толщ лёссовых отложений [116].

Вдобавок к этому, в мировой практике после создания карты инвентаризации оползней идёт непосредственная наземная проверка результатов дешифровок материалов дистанционного зондирования [36]. Для района каскада ГЭС на реке Вахш построение карты инвентаризации оползней осуществлялось с использованием архивных данных и программы Планета Земля и, следовательно, как требуется в дистанционном зондировании, была проведена верификация результатов непосредственно на поле (рис. 2.3). В конечном итоге были оцифрованы более 602 оползней с целью проведения зондирования моделирования восприимчивости к оползням района каскада ГЭС на реке Вахш.

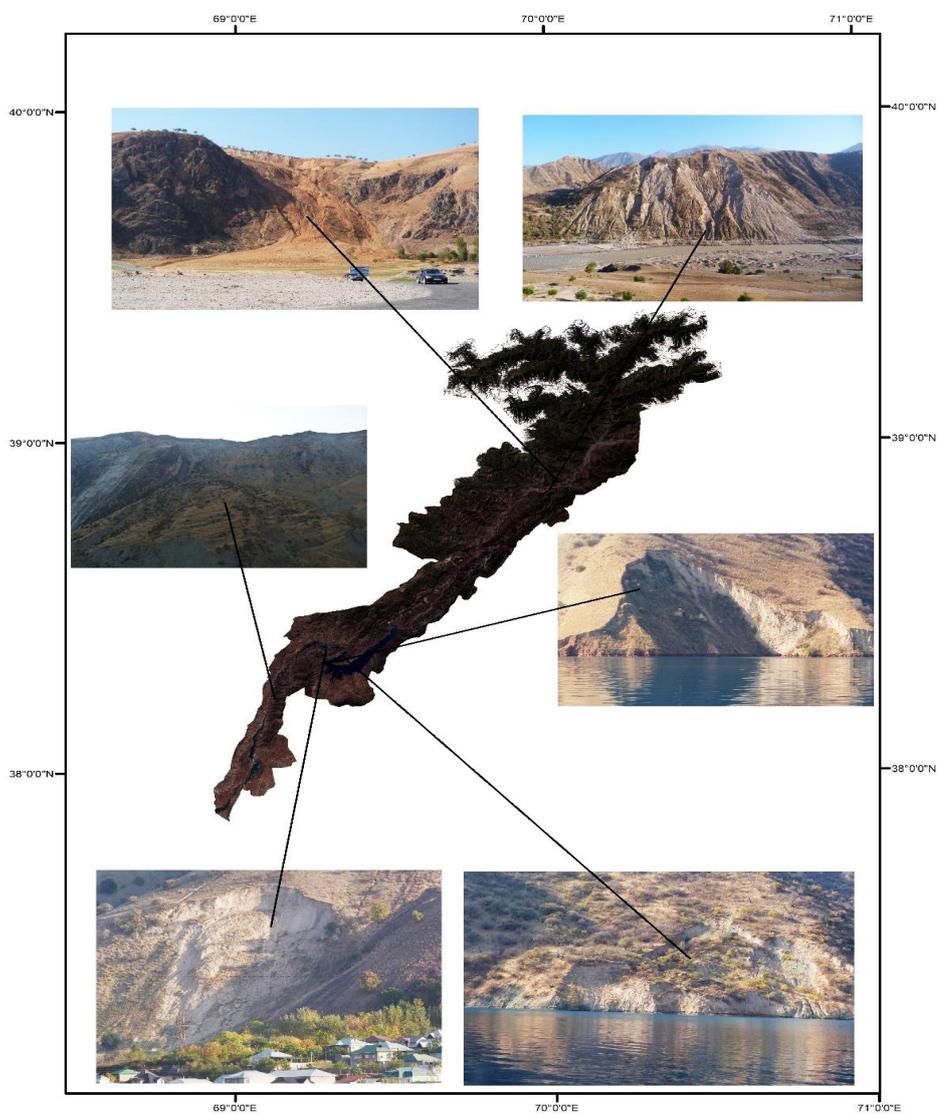


Рисунок 2.3. Верификация результатов дешифровки материалов дистанционного зондирования

После создания карты инвентаризации и её верификаций непосредственно на поле её разделяют на две группы – оползни для обучения и оползни для валидаций (рис. 2.4) результатов моделирования [88].

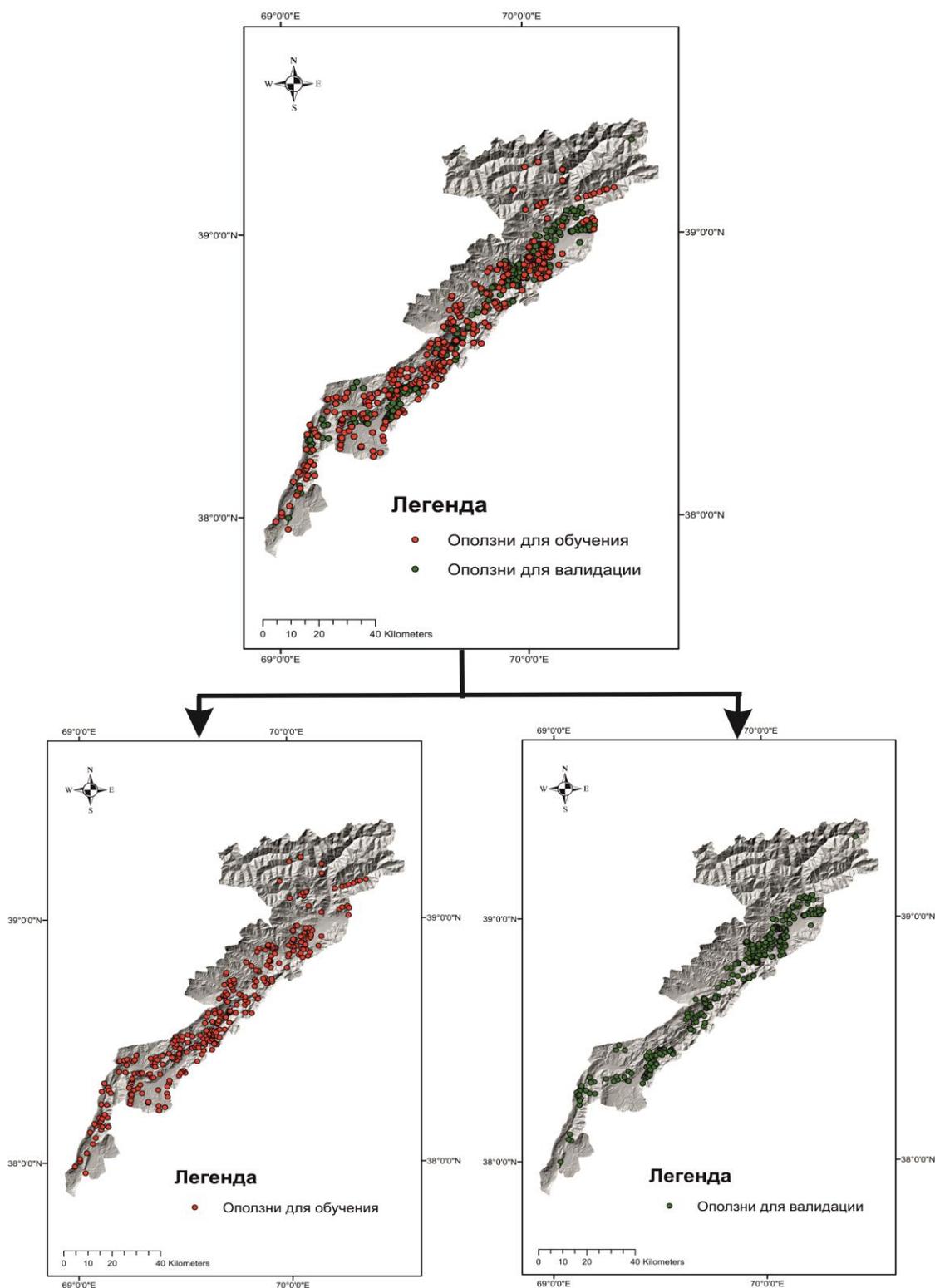


Рисунок 2.4. Оползневые явления района каскада ГЭС на реке Вахш в виде точек

Обычно в мировой практике карта инвентаризации оползней описывается как фактор, вызывающий оползень, однако если судить логично, данная карта является только материалом для выявления взаимосвязи между оползнями и факторами оползнеобразования.

В настоящее время в научной мировой практике широко используются методы моделирования восприимчивости к возникновению оползней. Эти методы позволяют выявить участки, наиболее предрасположенные к возникновению оползней. В свою очередь, восприимчивость к возникновению оползней можно трактовать как вероятность возникновения оползней, так как с повышением восприимчивости повышается вероятность их возникновения [5-А].

Если прежде выявление пространственных корреляций факторов оползнеобразования с оползневыми явлениями для больших территорий считалось трудной задачей, то в настоящее время с появлениями данных дистанционного зондирования (в открытом доступе) и ГИС-программ, особенно в национальном (1:1 000 000), в региональном (1:100 000-1:500 000) для тысяч квадратных километров, в среднем (1:25 000-1:50 000) для нескольких сотен квадратных километров, и в крупном (1:5000-1:10000) масштабах для десятков квадратных километров позволяют осуществлять это на высоком уровне [11].

В мировой практике существуют различные подходы моделирования восприимчивости к возникновению оползней, которые разделяют на количественные, полуколичественные и качественные (рис. 2.5). Для района каскада ГЭС на реке Вахш были использованы количественные и полуколичественные методы, исходя из этого, в данной работе в основном даются только характеристики этих методов. Количественные методы являются простыми и лёгкими для расчёта весов и выявления перспективных зон восприимчивости к возникновению оползней. Они [99, 109] разделяется на статистические, машинного обучения, вероятностный и детерминированные методы.

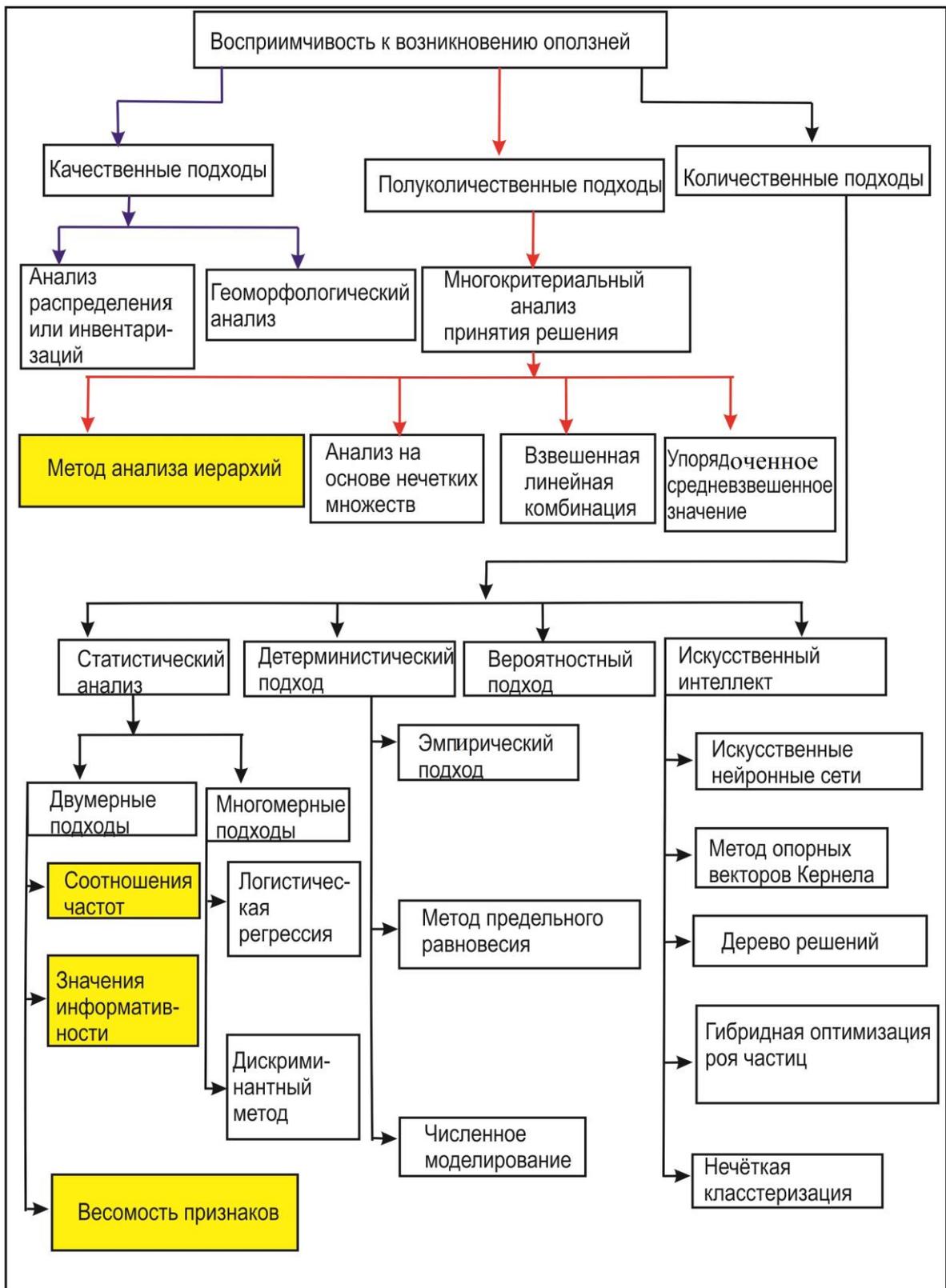


Рисунок 2.5. Схема методов моделирования восприимчивости к возникновению оползней [99]

Статистические методы основываются на выявлении количественных отношений между показателями факторов оползнеобразования и оползновыми явлениями. Примерами статистических методов являются метод соотношения частотности, метод значения информативности и метод весомости признаков.

В полуколичественном подходе классы факторов оползнеобразования взвешиваются на основе мнения группы экспертов. Одним из широко используемых методов этого подхода является метод анализа иерархий, или метод парных сравнений. Главным преимуществом этой модели является то, что все критерии оцениваются иерархично, что даёт возможность распределить веса. К тому же данная методика в основном используется комплексно со статистическими методами. Данная методика была представлена Томасом Саати в 1970 году.

При сравнениях статистических моделей восприимчивости к возникновению оползней авторами работ, несмотря на высокую результативность показателей успешности моделей (более 89%), результаты получились разными. Исходя из этого, с целью выявления точных пространственных закономерностей оползневых явлений района исследований нами были использованы все статистические методы, приведённые на рисунке 2.3. Для выявления весов самих факторов был использован метод анализа иерархий. Надо отметить, что метод анализа иерархий был также использован независимо от других. Все использованные в данной диссертационной работы методы на рисунке 2.3. показаны жёлтым цветом.

На рисунке 2.6 показан алгоритм моделирования восприимчивости к возникновению оползней.

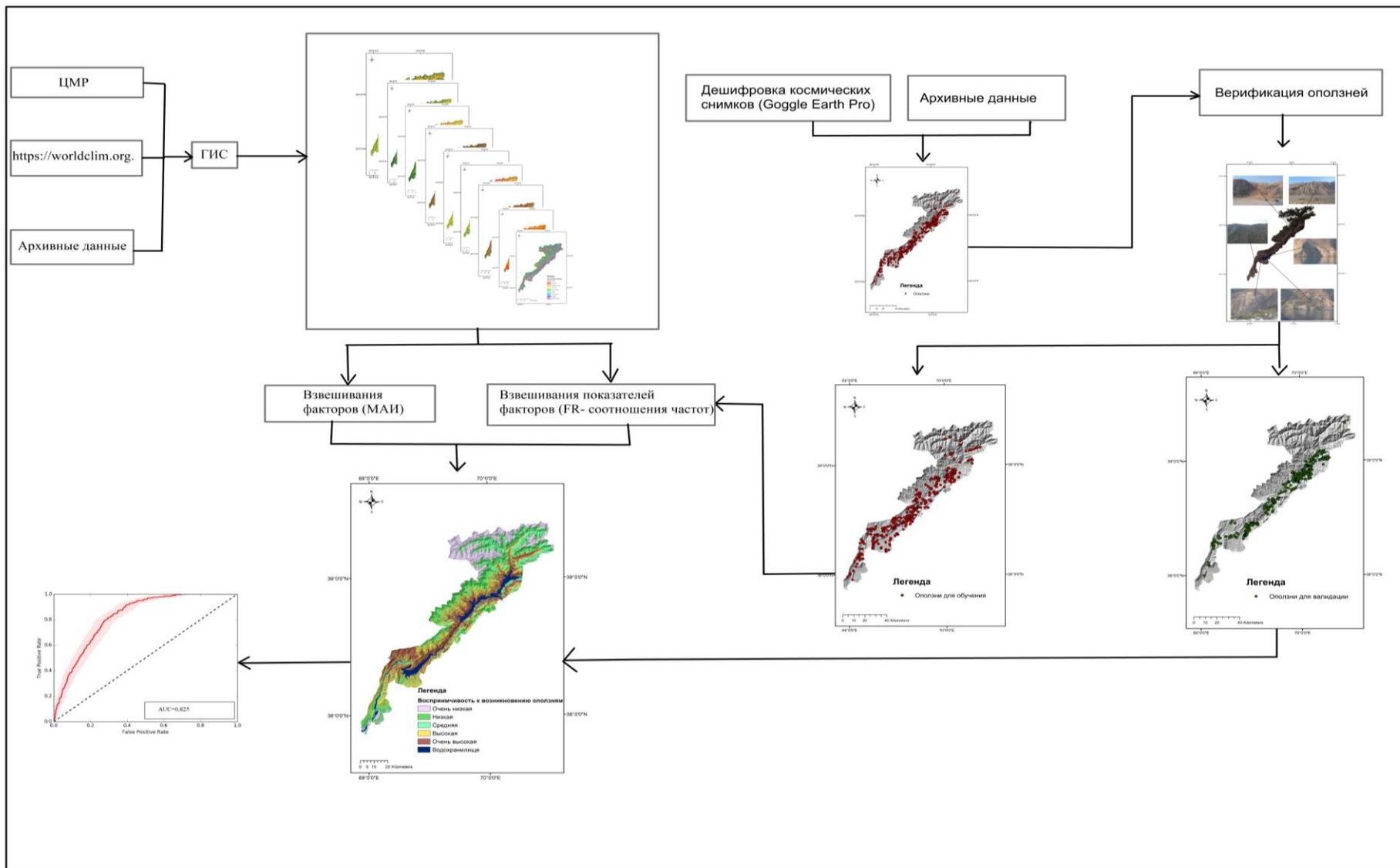


Рисунок 2.6. Схема проведения моделирования восприимчивости к возникновению оползней

Естественно, что моделирование восприимчивости к возникновению оползней сопровождается оценкой точности модели для получения достоверности о прогностической способности и юридической силы модели. Проведение этой работы основано на применении ROC-анализа.

Степень точности карт восприимчивости к возникновению оползней является самой первой мыслью, волнующей каждого научного деятеля, так как именно эта характеристика даёт информацию о доверии к прогностической способности модели. При оценке восприимчивости к возникновению оползней точность — это способность карты отличать свободные от оползней районы от районов, подверженных оползням [35].

Валидация модели — это сравнение результатов с реальными данными для оценки точности модели. Валидация моделей восприимчивости к оползням даёт информацию о доверии модели пользователю. Валидация также позволяет сравнивать различные модели или переменные параметры модели [11].

Оценка точности карты прогноза оползней, как правило, очень сложная задача. На самом деле предсказание оползневых процессов может быть проверено только наблюдением за тем, имеет ли место (или имело место) сбой во времени ("подождите и посмотрите"), но это не очень удобный метод, так как она требует длительного времени. Одним из наиболее часто используемых методов проверки точности карт восприимчивости к возникновению оползней является сочетание окончательной карты опасностей с картиной существующих оползней. Частотное распределение производится из оценок восприимчивости существующих оползневых и не оползневых зон. Прогноз оползней, основанный на более старой карте распределения оползней, затем может быть проверен с более поздним распределением оползней.

При оценке восприимчивости к оползням существуют два типа ошибок прогнозирования (табл. 2.3).

Первый тип ошибок является ложноположительным (ошибка типа I), а второй тип – ложноотрицательным (ошибка типа II).

Таблица 2.3 – Типы ошибок при прогнозировании

1	Оползни могут происходить в районах, которые прогнозируются как стабильные
2	Оползни могут фактически не происходить в районах, которые прогнозируются как нестабильные

Валидация карт восприимчивости к возникновению оползней обычно основывается на статистических данных из межрайонных таблиц, также известных как матрица путаницы или таблица непредвиденных обстоятельств. На основе порога непрерывные значения восприимчивости классифицируются в двоичной карте (классы восприимчивости и невосприимчивости), а затем сравниваются с двоичной картой распределения оползней (наличие или отсутствие оползней).

Кросс-табуляция (табл. 2.4) заключается в вычислении областей перекрытия между двумя бинарными картами. Возможные комбинации следующие: оползневые районы классифицируются как восприимчивые районы (истинно положительные наблюдения); свободные от оползней районы классифицируются как не восприимчивые районы (истинно отрицательные наблюдения); оползневые районы классифицируются как не восприимчивые районы (ложно отрицательные наблюдения); и свободные от оползней районы классифицируются как восприимчивые районы (ложноположительные наблюдения) [62].

Таблица 2.4 – Матрица путаницы

Критерии	Наблюдаемый	
	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
Предсказанный		
X <sub>1</sub>	a	b
X <sub>2</sub>	c	d

где:

a – истинно положительные наблюдения;

d – истинно отрицательные наблюдения;

b – ложно отрицательные наблюдения (тип ошибки II);

c – ложноположительные наблюдения (тип ошибки I);

$$\text{Чувствительность} = \frac{a}{(a + c)} \quad (2.5);$$

$$\text{Специфичность} = \frac{d}{(b + d)} \quad (2.6);$$

AUC вычисляется путем сложения площадей полигонов между пороговыми значениями

$$AUC = \sum_{i+1}^{n+1} \frac{1}{2} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 * (y_i + y_{i+1})} \quad (2.7);$$

Значения AUC варьируются в пределах от 0,5 до 1 [112], однако касательно характеристики значений AUC в литературах нет единого мнения. Авторами работ [73, 92, 114] показано, что значения AUC, близкие к 1, показывают высокую прогностическую способность модели, а значения, близкие к 0,5, - низкую точность. Кроме этого, в мировой практике больше всего используются следующие статистические характеристики AUC, приведённые в таблице 2.5.

Таблица 2.5 Статистические характеристики значения AUC [1, 58, 107] .

<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 первой главе:**

Материалы дистанционного зондирования в основном используются для процессов и явления поверхности Земли. При изучения оползневых явлений, материалы дистанционного зондирования используются для дешифровки существующих оползней, прогноза будущих оползней, создания карт факторов

оползнеобразования и выявления пространственных закономерностей оползневых явлений.

Закономерности оползневых явлении имеют важное значение для снижения риска от оползней, ведь именно взаимоотношения существующих оползней с факторами даёт возможность обнаружить зоны с более высокой вероятности возникновения оползней. Кроме того, применение ГИС-технологии и данных дистанционного зондирования помогают получить эти данные в сжатые сроки с высокой точностью.

Принимая во внимание специфику района каскада ГЭС на реке Вахш, для моделирования восприимчивости к возникновению оползней были выбраны количественные и полуколичественные методы. Данные методы позволяют выявить пространственные закономерности оползневых явлений и зоны предрасположенных оползней.

Помимо правильного выбора методики, ранжирование факторов оползнеобразования имеют большое значение. Все факторы, использованные в данном исследовании, были отобраны после изучения ряда опубликованных работ. Для ранжирования и взвешивания самих факторов оползнеобразования, метод анализа иерархии является идеальным.

### ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ АКТИВИЗАЦИЮ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЙОНЕ КАСКАДА ГЭС НА РЕКЕ ВАХШ

Оползни проявляют свою активность в геологической среде, и именно эта среда служит фоном, на котором происходит развитие оползневого процесса. Несмотря на это, даже при наличии подходящих условий оползень может и не произойти в отсутствие причинного фактора, активизирующего процесс или служащего спусковым крючком при активизации оползней. Без сомнения, можно сказать, что самым существенным условием для возникновения оползней является рельеф местности [5].

Факторы, влияющие на возникновение оползней, разделяются на две группы: факторы, являющиеся причиной возникновения оползней, и факторы, играющие роль спускового крючка при возникновении оползневых процессов. Для района каскада ГЭС на реке Вахш были использованы 9 факторов, таких, как крутизна и кривизна склонов, высотная зональность, экспозиция склонов, количество атмосферных осадков (мм/год), сейсмическое воздействие, индекс мощности потока и топографический индекс влажности, влияющих на возникновение оползней.

**Крутизна склона.** Рельеф является определяющим фактором при возникновении оползней и имеет прямое и косвенное влияние. Прямые влияния оказывают крутые склоны, морфология речных долин, уклоны тальвегов. Косвенное воздействие рельефа на оползневые и в целом на экзогенные геологические процессы реализуется как один из элементов географической среды, в основном определяющего характер и пространственное распределение циркуляции воздушных масс, температуры, атмосферных осадков, растительного покрова, поверхностных и подземных вод. Перепад высот рельефа является самым важным условием для развития оползней [5].

Кроме того, рельеф имеет сложный и многогранный механизм влияния на развитие оползневых процессов и объясняется в воздействиях такого рода процессообразующими факторами, как увлажненность территории, мощность и

состав покровных образований, энергия и концентрация поверхностного стока, сдвигающие усилия и потенциальная энергия [5].

Первой и самой важной характеристикой рельефа при возникновении оползней является крутизна склона, от которой в свою очередь зависит накопление рыхлых горных отложений (элювиально-делювиальные отложения с определённой мощностью и составом) [5], подземный сток и фильтрация воды и влияние силы тяжести на возникновение оползней [43]. Исходя из этого, при выяснении закономерностей оползневых явлений установлено, что оползни больше всего коррелируются со склонами с крутизной от 20 до 40 градусов [82, 103], так как более крутые склоны не являются благоприятными для накопления рыхлых масс горных пород [43]. Однако, как показывает мировая практика, в некоторых регионах по мере повышения крутизны склона повышается и вероятность возникновения оползней [57]. Такая региональная закономерность наблюдается не везде. С точки зрения авторов научно-исследовательской работы [116], самыми уязвимыми значениями крутизны склонов района каскада ГЭС на реке Вахш являются значения от  $5^{\circ}$  до  $30^{\circ}$  (для неглубоких оползней в рыхлых горных отложениях).

Опыт изучения оползневых явлений [18] свидетельствует о большой роли влияния крутизны склонов на развитие оползней в Таджикистане. Установлено, что основная масса оползней развивается на склонах с крутизной  $30-35^{\circ}$  (рис.3.1).

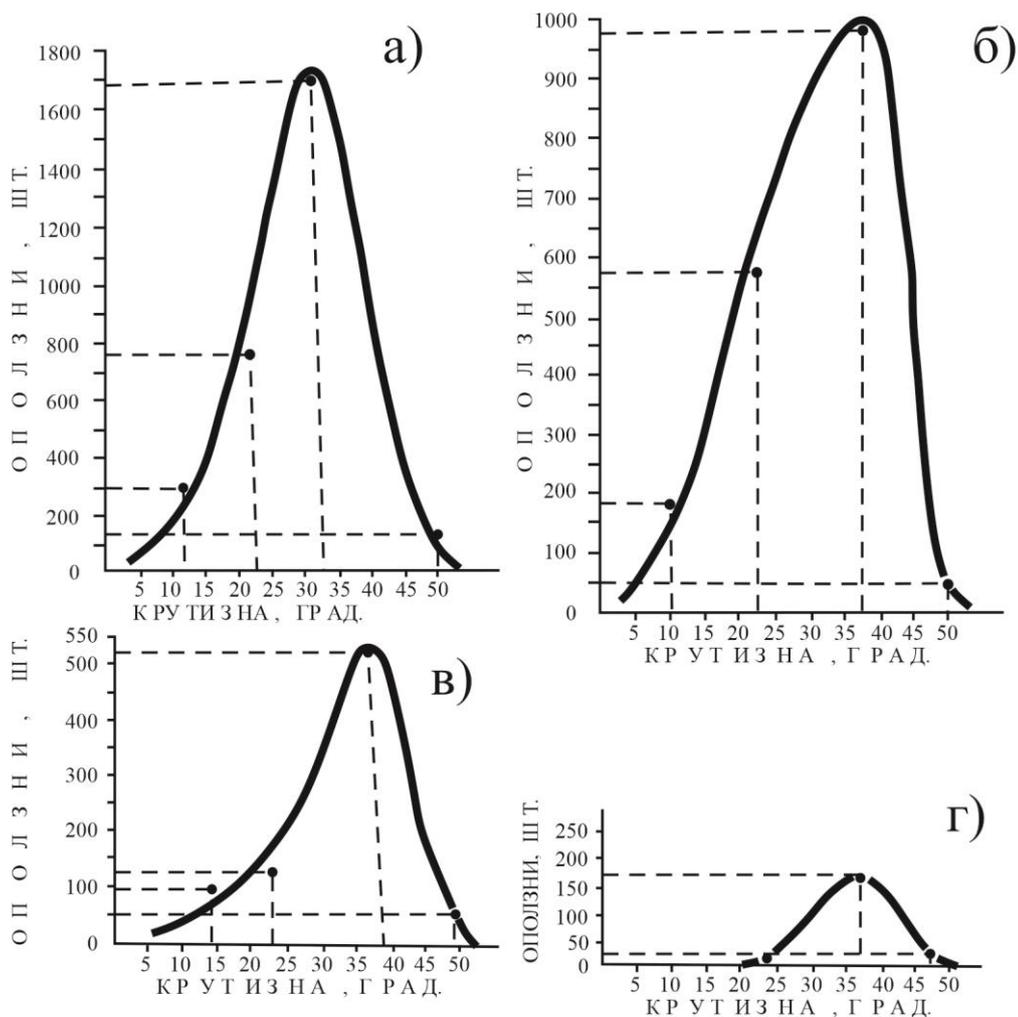


Рисунок 3.1. Развитие оползней на склонах различной крутизны: а) по республике в целом; б) в Таджикской депрессии; в) в Гиссаро-Алайской горной области; г) на Памире [18]

С появлением геоинформационных систем стало возможным использование данных дистанционного зондирования, что дало возможность выявить пространственные взаимоотношения крутизны склонов с оползневыми явлениями.

Крутизна склонов в районе исследования подсчитана с использованием цифровой модели рельефа и была сгруппирована в 7 классов (рис. 3.2).

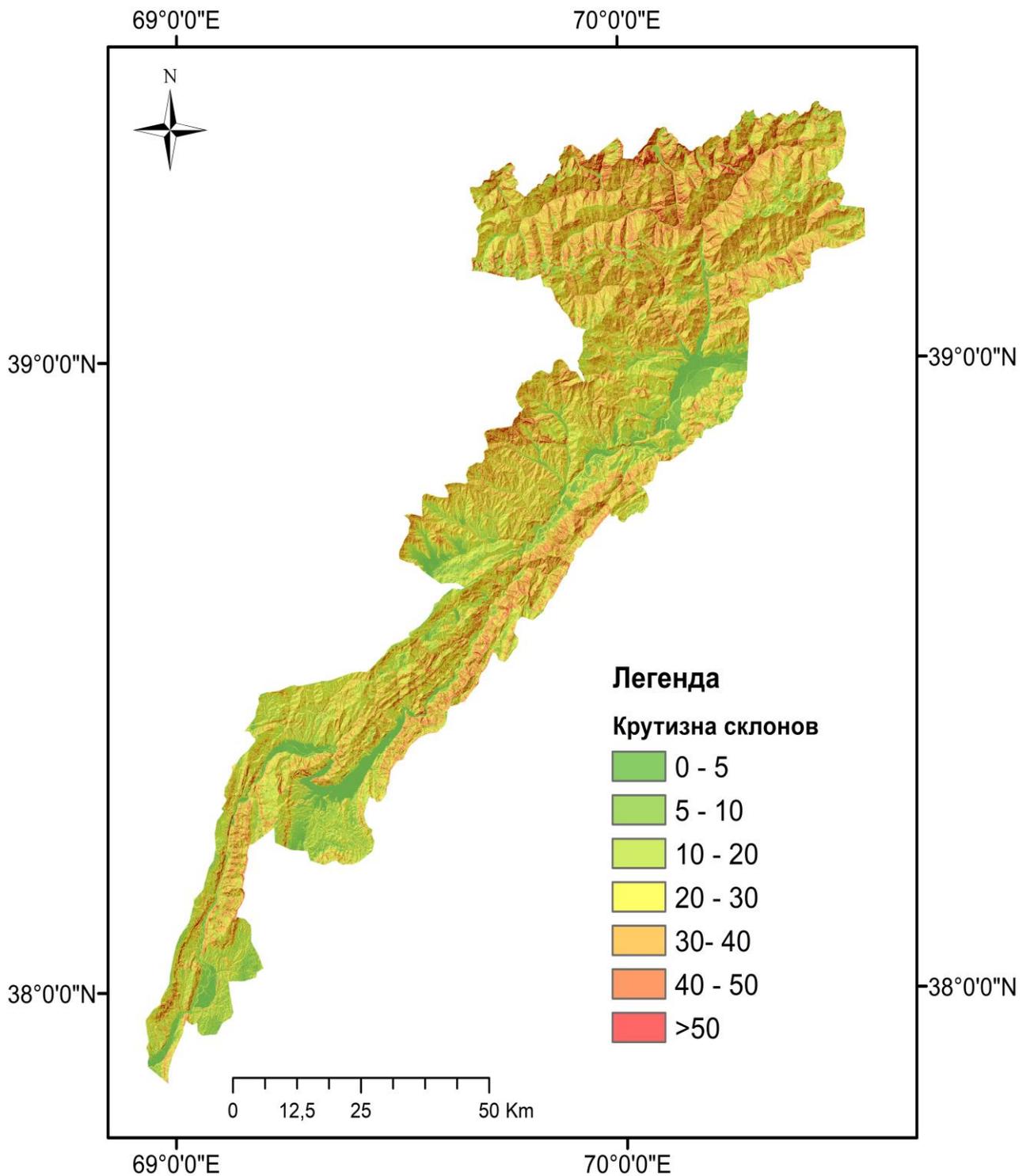


Рисунок. 3.2. Карта крутизны склонов

**Топографический индекс влажности.** Гидрологические процессы, такие как вырезка основания профиля склона, насыщение почвы потоком воды, представляют собой факторы, способствующие развитию оползневых процессов. В современной мировой практике построения таких

гидрологических показателей осуществляются с использованием ЦМР в ГИС-программах.

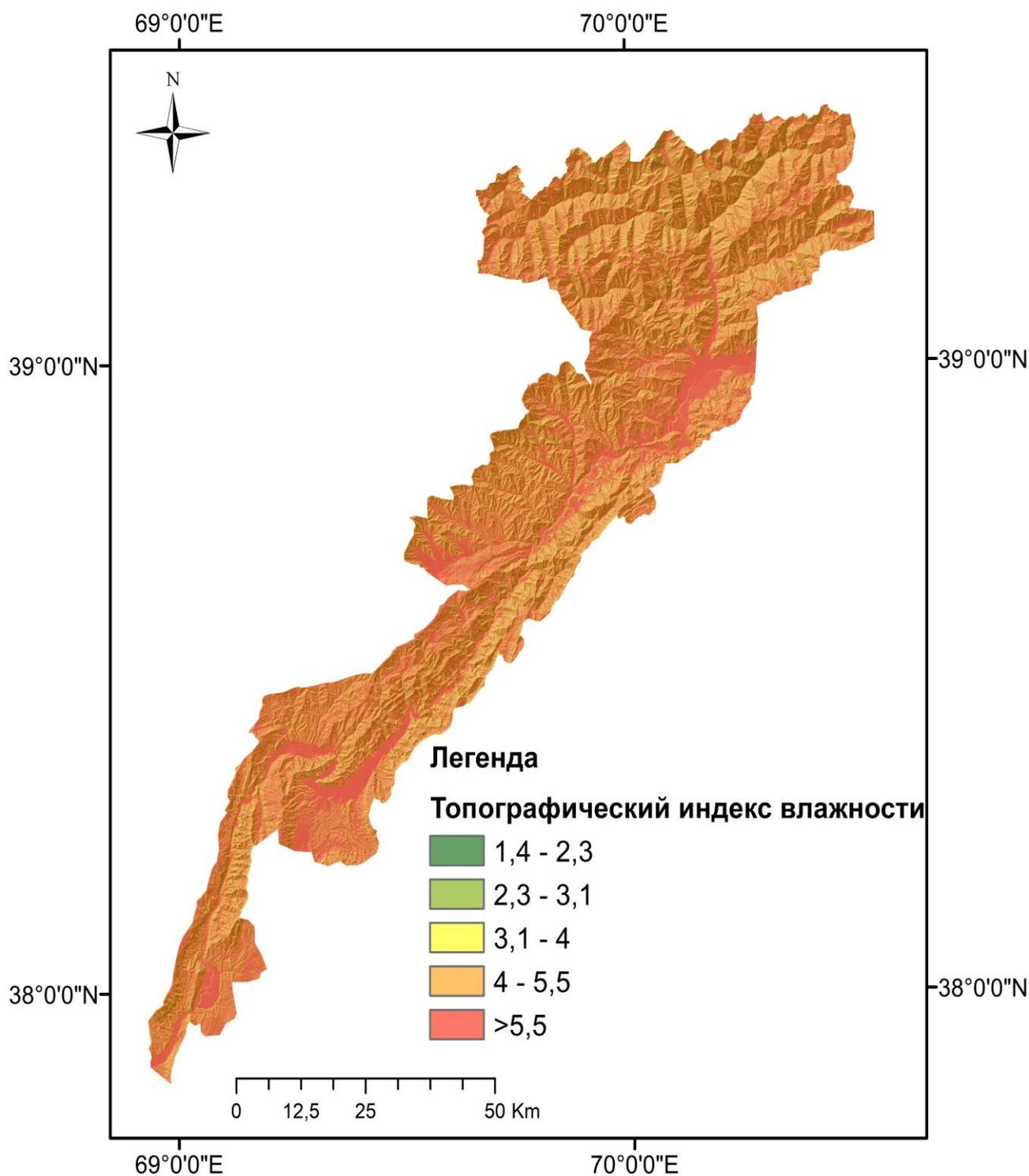


Рисунок 3.3. Распределение индексов влажности в зависимости от крутизны склонов в изучаемом регионе

Одним из широко используемых гидрологических показателей является топографический индекс влажности, который характеризует потенциал

насыщения данного участка в зависимости от площади склона и местного склона и подсчитывается следующим уравнением [66]:

$$TWI = \ln \left( \frac{a}{tg b} \right) \quad (3.1)$$

где TWI – топографический индекс влажности, а – локальная площадь склона, стекающая через определенную точку, и b – локальный наклон в радианах. Высокие значения TWI выделяют плоские участки с большими площадями склонов, которые, как ожидается, будут иметь относительно высокую увлажненность. Низкие значения TWI соответствуют крутым участкам, которые, как ожидается, будут лучше дренированы [53, 83]. Зависимость индекса влажности от крутизны склона показана на рисунке 3.3.

**Индекс мощности потока.** Другой (SPI) параметр, характеризующий гидрологический показатель — это индекс мощности потока, вычисление которого основывается на предположении, что сток пропорционален площади водосбора (рис. 4.4). Он предсказывает чистую эрозию в зонах ускорения и конвергенции потока и чистое осаждение в зонах уменьшения скорости потока [93].

Для того чтобы оценить параметр SPI, в работе [84] предлагают следующее уравнение:

$$SPI = Ln (A_s * tg \beta) \quad (3.2)$$

где Ln – натуральный логарифм,  $A_s$  – накопление потока, а  $\beta$  – крутизна.

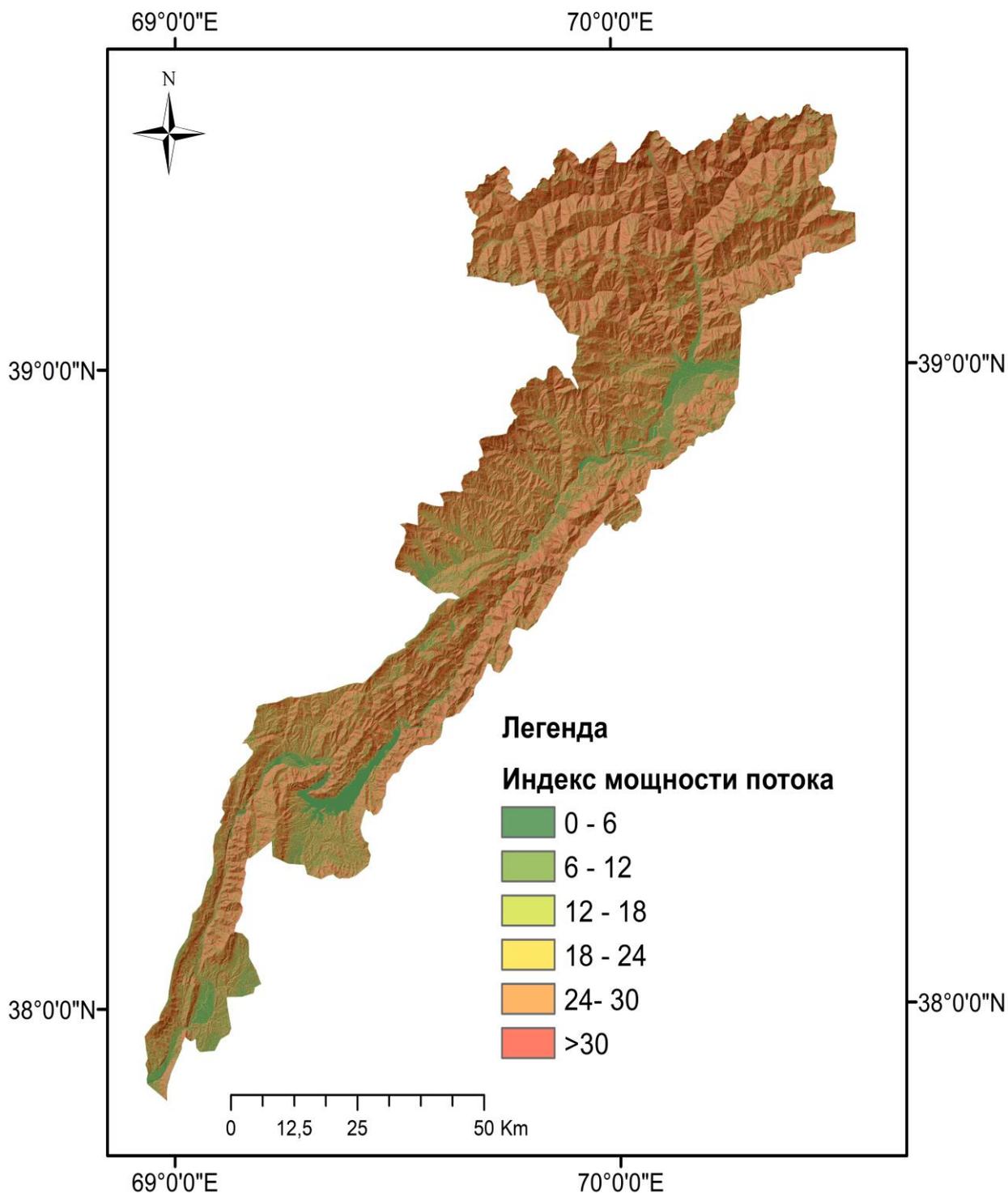


Рисунок 3.4. Карта индексов мощности потока

**Экспозиция склонов.** От экспозиции (ориентации) склона (рис. 3.5) зависит количество попадающего на склон солнечного света, что косвенно влияет и на другие факторы, способствующие развитию оползней. К этим факторам относятся влажность почвы, растительный покров и толщина почвы. Экспозиция склонов (рис. 3.5) подразделяется на равнинные, северные, северо-

восточные, восточные, юго-восточные, южные, юго-западные, западные и северо-западные классы [44].

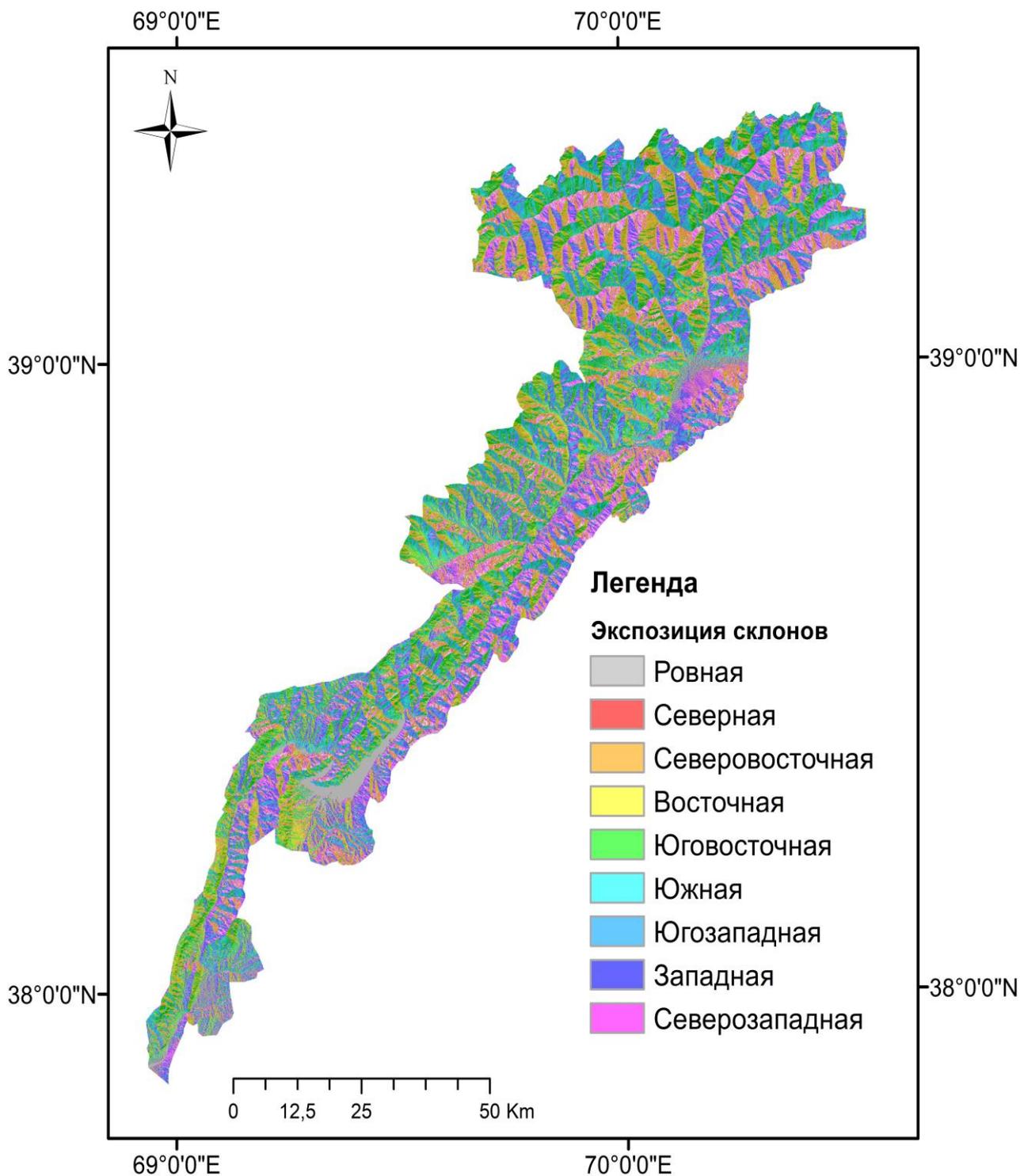


Рисунок 3.5. Карта экспозиций склонов

Влияние экспозиции склонов чаще всего связывают с климатическими условиями. В особенности авторы опубликованных работ [41, 43] утверждают, что наиболее чувствительными к воздействию являются склоны, обращенные к

солнцу, так как склоны, находящиеся в тени, из-за высокой влаги в почвах, имеют относительно высокий рост растительности, которая сохраняет устойчивость склонов. Однако, как утверждает автор работы [4], влияние растительности на устойчивость склонов может быть как отрицательным, так положительным, что связано с увеличением прочности верхней толщи грунтов в результате ее армирования корневой системой или уменьшением прочности при расклинивании плотных пород корнями; весом массы деревьев и передаваемой ими на склоны ветровой нагрузки; многообразным влиянием на термический режим и влажностно-водный режим склонов. Это разнообразие и переменность влияния растительного покрова на экзодинамические процессы, в особенности на оползни, делает чрезвычайно сложной оценку её комплексного влияния на их развитие [7].

**Нормализованный вегетационный индекс.** Растительность. Воздействия растительности практически на все условия развития оползневых процессов (климатических, гидрогеологических, гидрологических и на интенсивность процессов выветривания и эрозии) сделали ее сложным процессообразующим фактором [7]. Анализируя и обобщая результаты научных работ нескольких исследователей, автор работ [7] сделал следующие выводы: «Влияние растительности на устойчивость оползневых склонов тем больше, чем на меньшей глубине расположена возможная поверхность скольжения; при этом различаются два основных случая: а) корневая система находится выше зоны скольжения, и тогда растительность влияет на величину сдвигающих усилий за счет собственного веса и передаваемой склону ветровой нагрузки, а также веса удерживаемой растительностью влаги в верхнем слое; б) корневая система находится в зоне скольжения, в этом случае влияние растительности двояко, с одной стороны, оно способствует снижению прочности пород при их выветривании и увлажнении, а с другой стороны, сопротивление сдвигу пород, армированных корнями, увеличивается». Эти точки зрения подкрепляются фактическими данными, например, всем известно, что глубокие оползни развиваются в климатических зонах разного рода и

несмотря на наличие или отсутствие растительного покрова. Возможное влияние посадки деревьев на ход оползнего процесса наблюдалось в одном из районов Швеции [7]. Наблюдалась и противоположная тенденция – активизация поверхностных оползней после вырубки лесов и кустарников, который можно охарактеризовать тем, что растительность влияет на характер и зависимость между крутизной склона и предельной мощностью покровных образований. Мощность покровных образований является большей при наличии растительности, чем без неё, и таким образом при вырубке корней растительности и изменения водного режима склона он теряет свою устойчивость [4].

Также при наличии растительности уменьшается инфильтрационное свойство грунтов и снижается размывающая сила поверхностных вод. При отсутствии растительности повышается сила три основных групп процессов, являющихся причинами возникновения оползней [1], и таким образом, вероятность возникновения оползней повышается.

Нормализованный индекс вегетации (рис.3.6) нами был создан с использованием космических снимков Landsat 5, которые были заимствованы с Американского сайта USGS. NDVI – это показатель, который отражает количество зеленой растительности [50] и может быть вычислен с помощью следующего уравнения:

$$NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED) \quad (3.3);$$

Где: NIR и RED представляют собой спектральное отражение инфракрасной и красной излучения электромагнитного спектра. Значения NDVI варьируют от -1 до 1, и более высокое значение означает более плотную растительность, тогда как более низкие значения указывают на разреженную растительность [94].

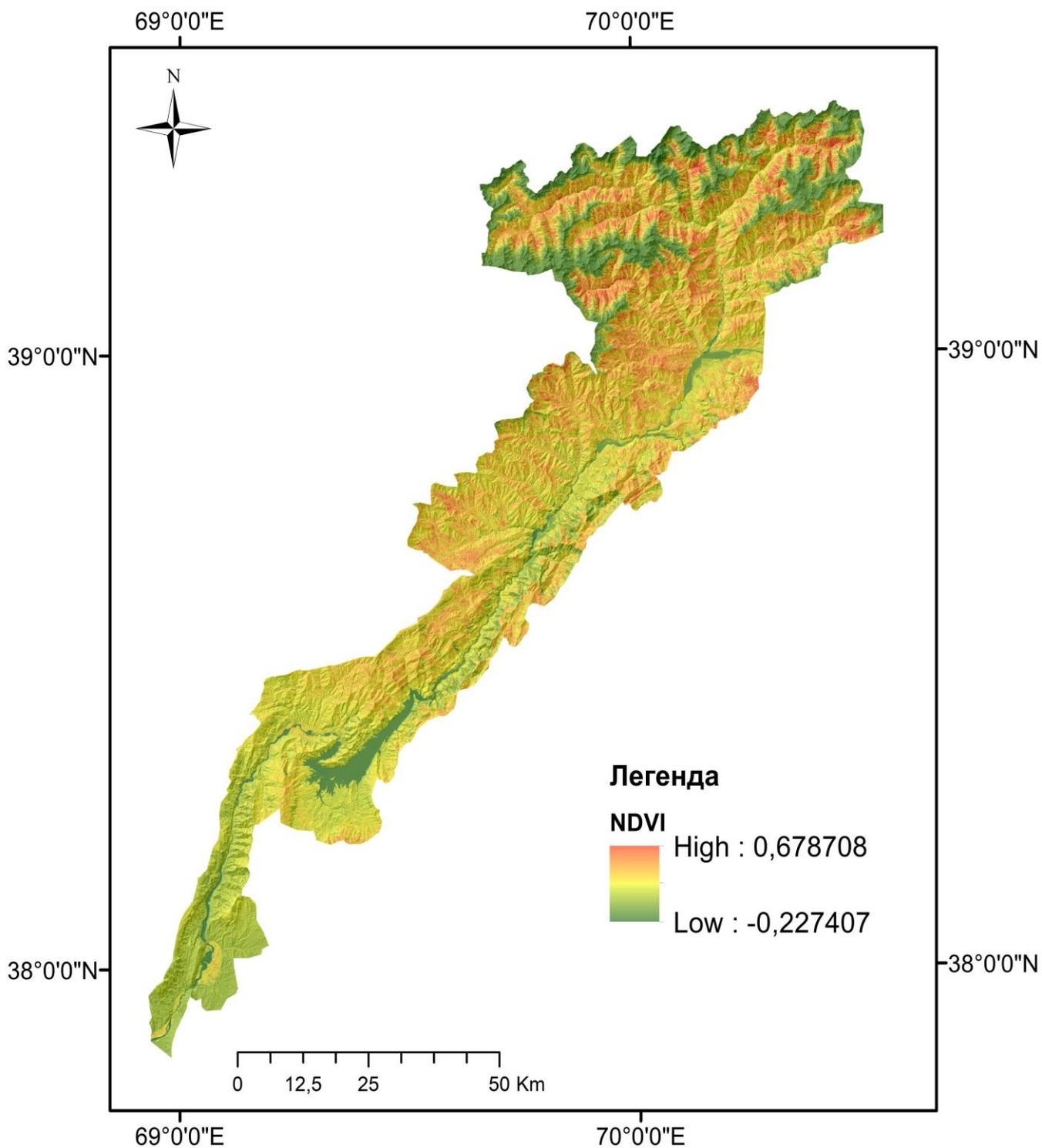


Рисунок 3.6. Карта, демонстрирующая плотность распределения растительности в изучаемом регионе

**Высотная зональность.** Высота над уровнем моря широко используется для оценки восприимчивости к оползням. Изменение высоты связано с различными экологическими условиями, такими, как типы растительности и количество осадков [91]. Высоты района исследования были классифицированы на 9

классов: 451-1000, 1000-1500, 1500-2000, 2000-2500, 2500-3000, 3000-3500, 3500-4000, 4000-4500, 4500-5203, что нашло своё отражение при построении нами карты высотной зональности региона (рис. 3.7).

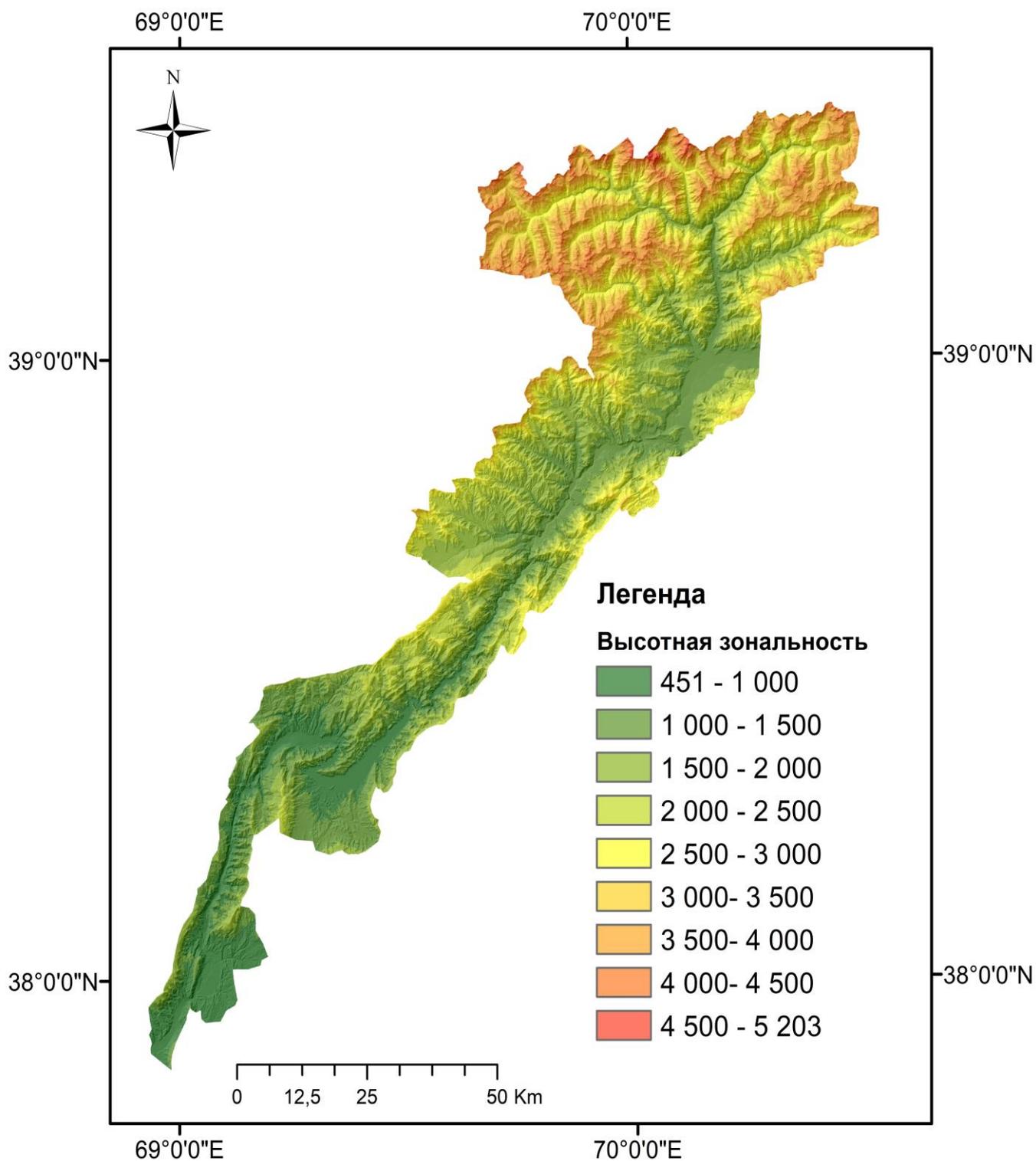


Рисунок 3.7. Карта высотной зональности

**Кривизна склона.** Форма склона является важным морфологическим параметром склона при оценке восприимчивости к возникновению оползней [85], так как оползней больше всего происходит на склонах с выпуклой формы [1].

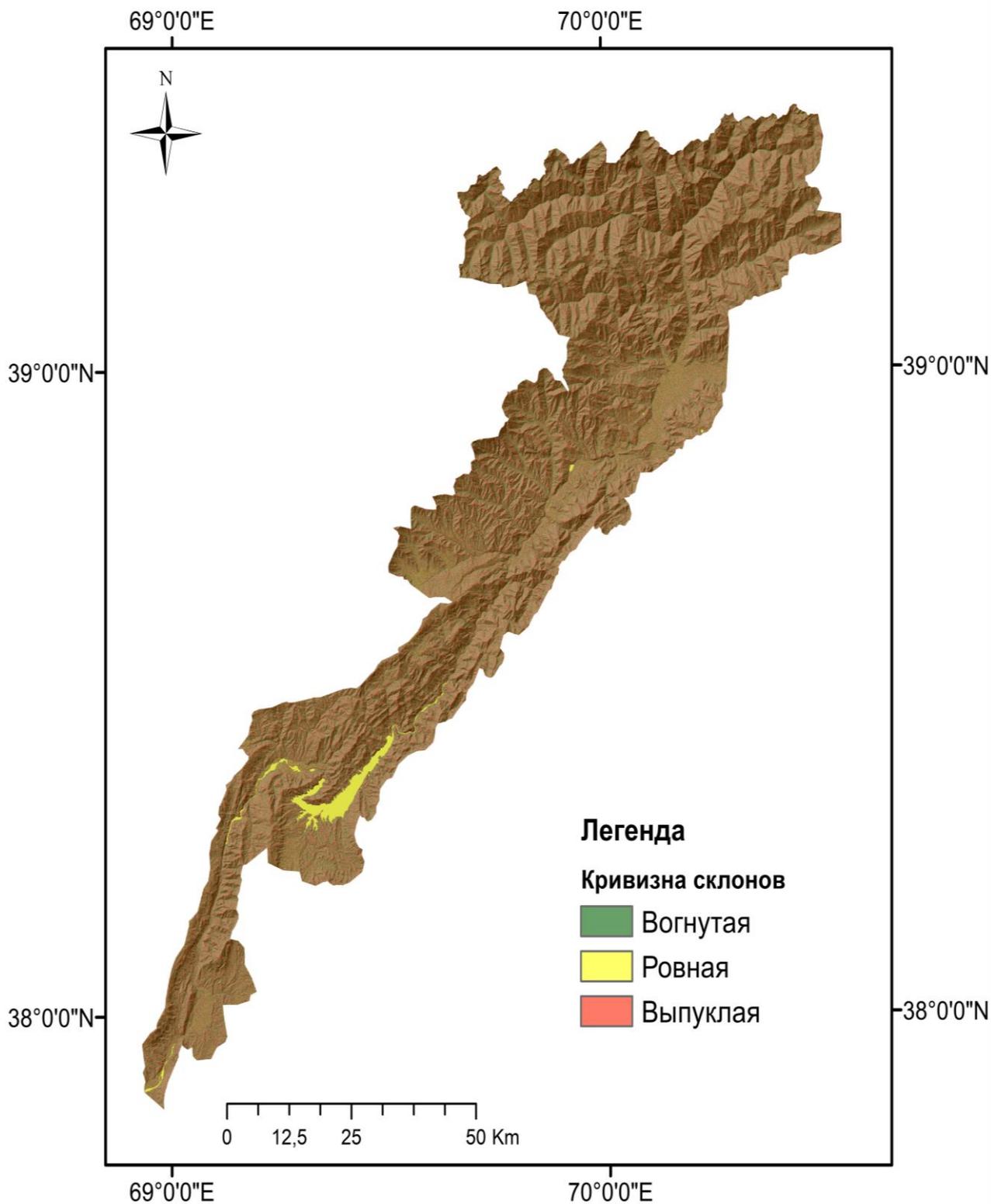


Рисунок 3.8. Карта кривизны склонов исследуемого региона

Однако такую точку зрения разделяет не каждый исследователь, например, согласно авторам работы [14], вогнутая форма склона, имея относительно высокую способность удерживать воду, обуславливает менее устойчивое состояние склона. Построенная нами карта кривизны склонов была классифицирована на выпуклую, плоскую и вогнутую поверхности (рис. 3.8).

**Атмосферные осадки.** Другой важный фактор, который имеет существенное значение при активизации оползневых масс, это климат. Климатические условия (режим тепла и влаги), по данным работы [7], отнесены к группе основных изменяющихся факторов, в зависимости от типа климата и региональных особенностей территорий; климат действует на распространение оползневых явлений в пространстве и во времени.

Проведенные в Таджикистане работы по изучению закономерностей возникновения оползневых явлений свидетельствуют о том, что количество атмосферных осадков как выступает основной метеорологический показатель, способствующий развитию оползневых процессов. Такая тесная связь периодов активизаций оползней с периодами повышенных показателей атмосферных осадков показана и в других работах, в особенности в [29, 30]. Кроме этого, исследования по изучению влияния режима увлажнения на активизацию оползневого процесса в лессовых породах Чаткало-Кураминской зоны показывают, что атмосферные осадки, увлажняя породы по трещинам, нарушают устойчивость склонов [7]. При продолжительных ливневых дождях происходят обводнение и глубокая инфильтрация пород, которые являются опасными для рыхлых горных отложений [7].

Подводя итоги, можно сказать, что атмосферные осадки рассматриваются как фактор, активизирующий оползневые процессы. Доля осадков, поглощаясь землёй, повышает влажность грунтов, усиливая процесс выщелачивания. Другая часть осадков формирует поверхностные стоки воды. Поверхностные воды, размывая склоны, приводят их в неустойчивое состояние, и интенсивность размывания зависит от интенсивности осадков. Распределения атмосферных осадков территории исследования отображено на рисунке 3.9.

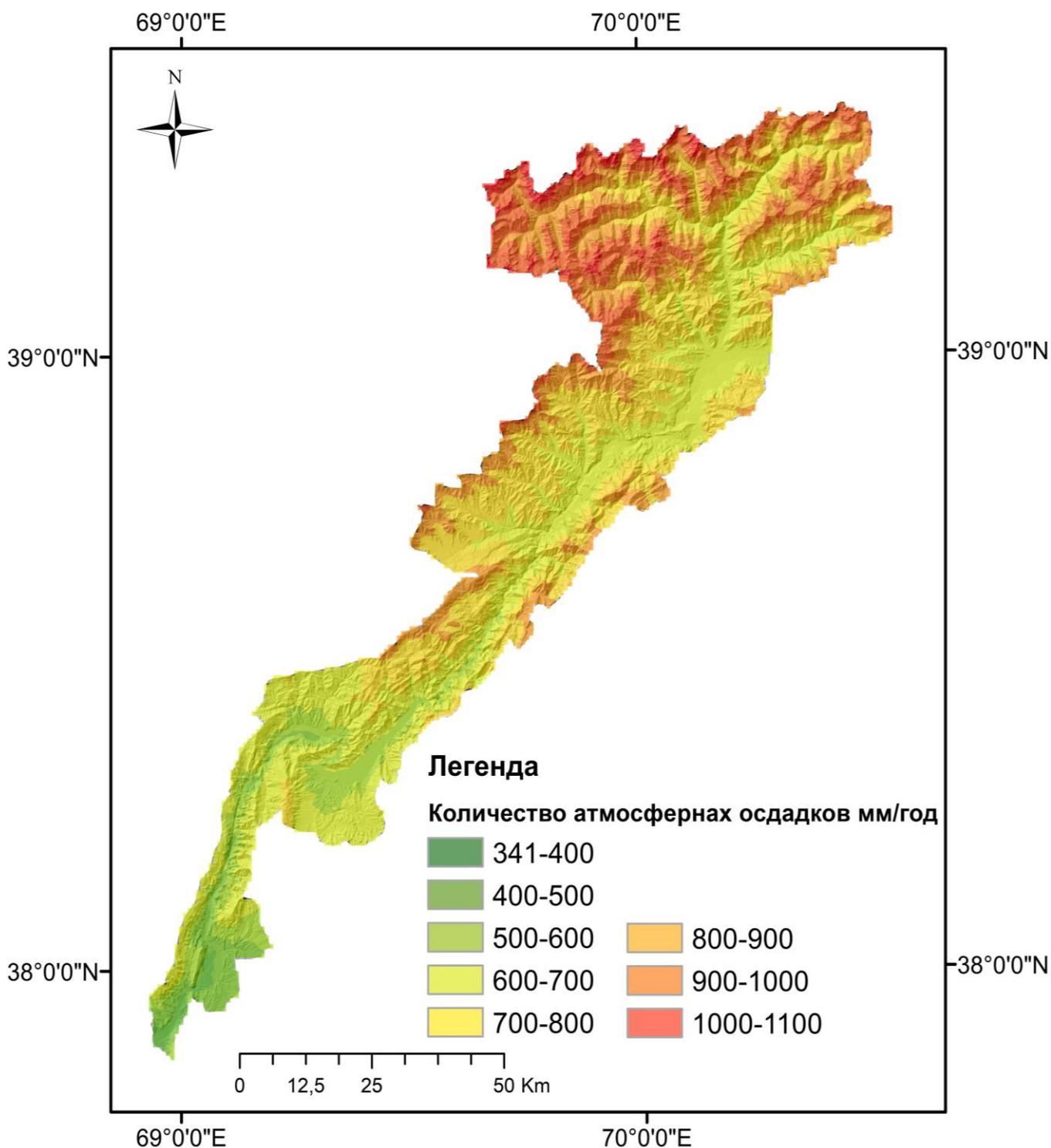


Рисунок 3.9. Распределение атмосферных осадков на изучаемой территории

**Сейсмические воздействия.** Сейсмичность рассматривается как один из основных факторов активизации не только оползневых процессов, но и других гравитационных явлений. Кроме того, сейсмичность оказывает влияние на дальность смещения оползневых масс, приводит к раздроблению массива горных пород и изменению их механических и ряда других свойств [28].

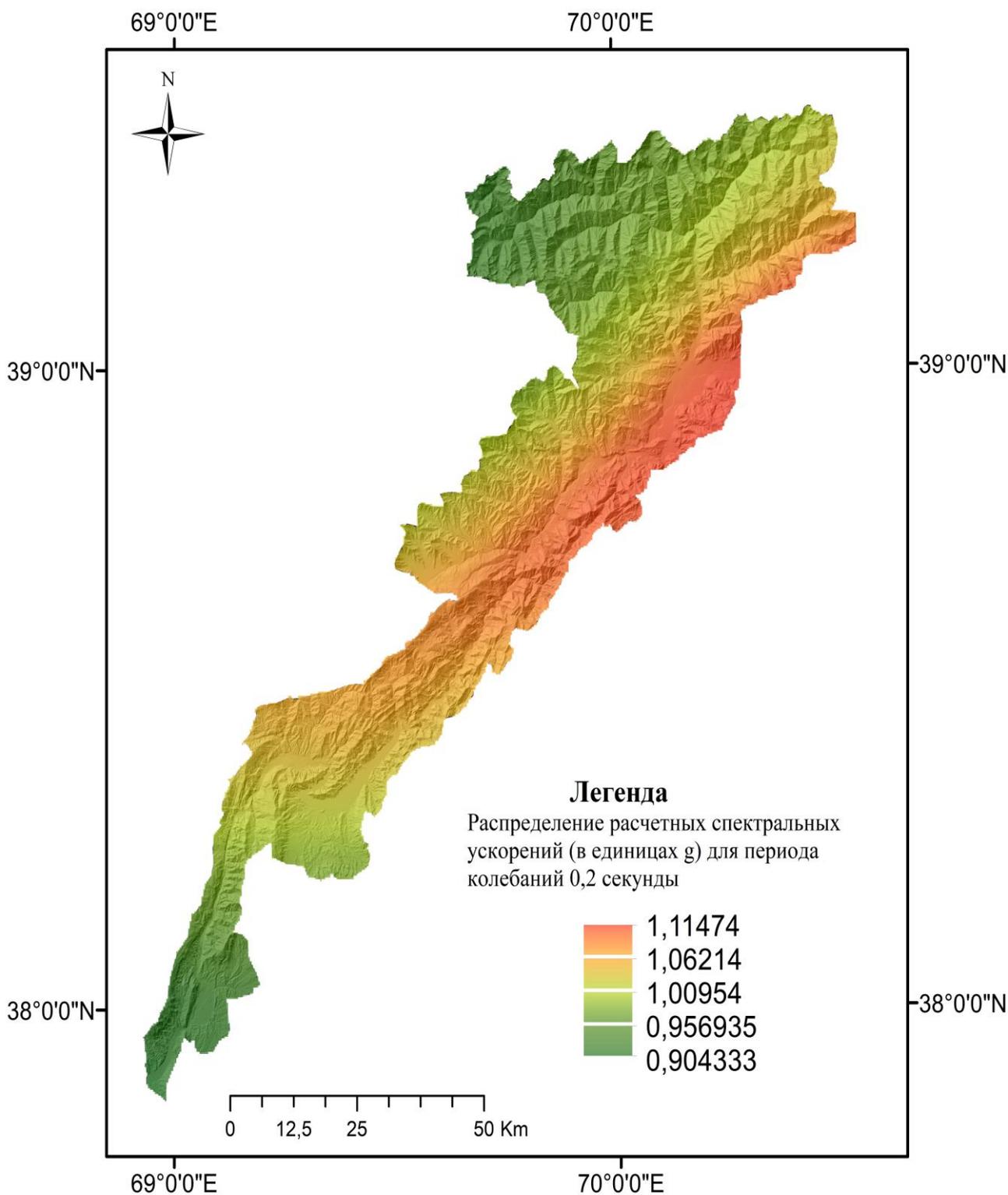


Рисунок 3.10. Распределение расчётных спектральных ускорений грунтов ( в единицах g) для периода колебаний 0,2 секунды на исследуемой территории

Примером связи землетрясений с экзодинамическими процессами могут служить Хаитский оползень 1949 г. и Усойский завал 1911 г. Надо отметить, что развитию экзодинамических процессов способствуют и слабые

землетрясения [7]. К тому же, как утверждает Е.П. Емельянова, воздействия землетрясений приводят к смещению даже устойчивых склонов, не подверженных смещению в обычном состоянии [4].

Сейсмичность имеет прямые воздействия (колебания земной поверхности, вызываемые сейсмическими волнами и приводящие к разрушению зданий и сооружений) и косвенные, или вторичные, воздействия (проседание и уплотнение грунтов, оползни, обвалы, разжижение грунта, трещины на поверхности). В большинстве случаев к жертвам приводят косвенные проявления землетрясений [6].

В качестве сейсмического воздействия для района исследований было использовано распределение расчетных спектральных ускорений с периодом колебаний 0,2 сек для периода повторяемости 1 раз в 475 лет (в м/сек<sup>2</sup>) (рис. 3.10) (данные получены в лаборатории оценки сейсмической опасности Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана).

**Земельной покров.** Дистанционное зондирование является весьма удобным способом получения данных о земельном покрове района исследования. Этот способ помогает сократить время, которое было бы затрачено на проведение полевых работ непосредственно на местности, особенно в районах с сильно расчленённым рельефом, а также сократить экономические расходы. Однако при классификациях изображения требуется использование фактических данных в виде эталонных точек, которые служат основой для классификации изображения.

Оценка точности классификации является неотъемлемой частью исследований при создании карты земельного покрова, без этого полученные результаты имеют малую ценность. Результат оценки важен для получения гарантии качества классификации и доверия пользователей к продукту. Для проведения оценки требуются эталонные пиксели или фактические данные в виде точек, на основе которых создаётся матрица погрешностей или

искажений. Чем больше точек, тем выше качество оценки точности классификации.

Вычисленная нами точность классификации карты земельного покрова района исследования составляет 69%. Согласно критериям оценки статистики Каппа (таблица 3.1.), выходной материал оценивается как существенный. Исходя из этого, можно сделать вывод, что полученные результаты можно оценить, как положительные, и составленную карту можно использовать для дальнейших научных исследований при прогнозировании оползневых процессов и проведении мониторинга.

**Таблица 3.1. - Матрица погрешностей или искажений карты земельного покрова**

Классификация	Кл. 1	Кл.2	Кл. 3	Кл.4	Кл.5	Кл. 6	Кл.7	Общая сумма	Пользовательская точность
Населённые пункты	207	155	9	16	0	18	34	439	47%
Агрокультура	12	186	5	45	0	0	109	357	52%
Лес и высокая растительность	109	12	307	44	1	0	30	503	61%
Низкая растительность	2	11	55	266	0	0	6	340	78%
Ледники и временные снеговые покровы	10	0	1	5	397	2	24	439	90%
Водоём	45	0	1	2	2	379	4	433	87.5%
Бесплодная земля	15	36	22	22	0	0	191	286	67%
Общая сумма	400	400	400	400	400	399	398	2797	
Точность производителя	52%	46.5%	77%	66.5%	99%	95%	48%		
<b>Общая оценка точности : 69%</b>						<b>Каппа=0,68</b>			

Полученные данные в виде пикселей были сравнены с теми же участками с достоверными данными. В матрице погрешностей изложены все фактические и прогнозируемые (предикторы) данные, которые служат для оценки точности

классификации (таблица 3.1). В общем были использованы 2797 случайных

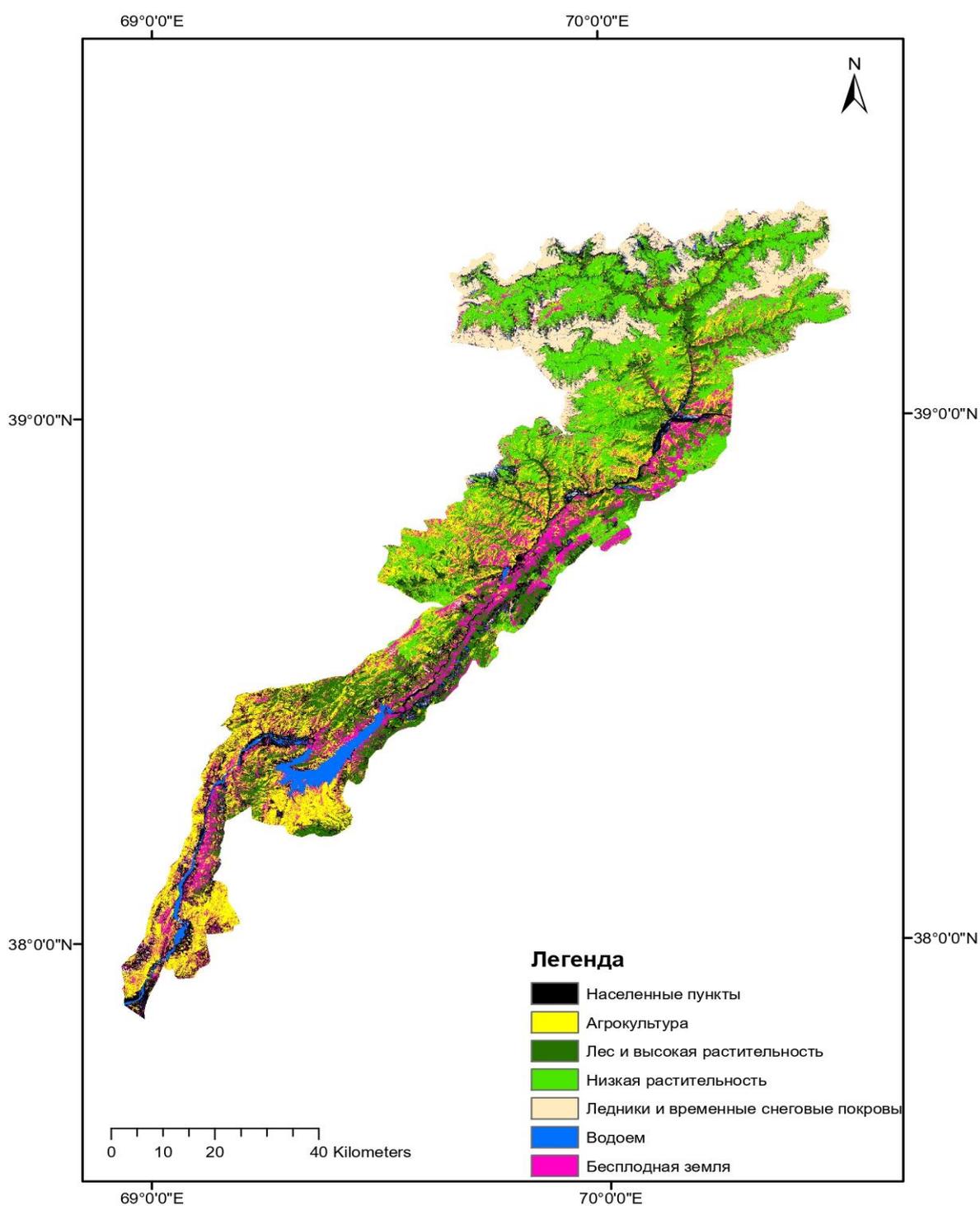


Рисунок 3.11. Карта земельного покрова

точек для оценки точности классификации. Результат оценки точности обычно предоставляет пользователям общую точность карты и точность для каждого класса на карте.

**Выводы по главе 4.** На развитие оползневых явлений может влиять ряд факторов, таких, как крутизна склона, сейсмичность, литология, экспозиция склонов, растительный покров и др. Однако, несмотря на большое количество факторов, при картированиях восприимчивости к возникновению оползней использование множества факторов не является логически правильным, в особенности в региональном и национальном масштабах районирования, так как в таких случаях некоторые из них могут иметь незначительное влияние на развитие оползневых явлений. Все факторы, показатели которых при взвешиваниях берут низкое значение, не должны быть использованы для моделирования. Исходя из этого, для каждого региона используются факторы, свойственные этим регионам. Для района каскада ГЭС на реке Вахш были анализированы все всевозможные факторы, и в конце было решено использовать девять факторов (крутизна склонов, экспозиция склонов, атмосферные осадки, нормализованный вегетационный индекс, сейсмическое воздействия, кривизна склонов, топографический индекс влажности, индекс мощности потока и высотная зональность) при районировании восприимчивости к возникновению оползней.

#### **ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА КАЧЕСТВО КАРТ ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОПОЛЗНЕЙ РАЙОНА КАСКАДА ГЭС НА РЕКЕ ВАХШ**

В практике моделирования восприимчивости к возникновению оползней широкое применение получила ЦМР. Большую роль она играет при построении морфометрических факторов оползнеобразования, таких, как крутизна и кривизна склонов, высотная зональность, экспозиция склонов и др. [96, 97].

Точность и надежность выявления пространственных закономерностей оползневых явлений зависит от выбора разрешения ЦМР. Исходя из этого, одним из принципиальных и дискуссионных вопросов по моделированию восприимчивости к возникновению оползней является выбор оптимального пространственного разрешения ЦМР для построения модели. Как показал опыт некоторых зарубежных исследователей, существует разноречивость мнений в отношении выбора оптимального пространственного разрешения ЦМР [74, 106, 111].

На протяжении многих лет моделирование восприимчивости к оползням стало практическим подходом для получения более глубокого понимания пространственных закономерностей оползневых явлений и выявления участков, наиболее предрасположенных к оползневым процессам. Накопленный опыт показывает, что ЦМР является частью основных базовых данных, которые используются для выявления различных существенных обуславливающих факторов, учитываемых в любом анализе восприимчивости к природным опасностям [42, 48].

В начале XXI [47, 76] впервые было затронуто вопрос по выбору пространственного разрешения ЦМР. Выбор правильного пространственного разрешения ЦМР является важным шагом в составлении карт восприимчивости к возникновению оползней, так как оно имеет существенное влияние на зонирование восприимчивости к возникновению оползней [70, 108]. При картировании восприимчивости к возникновению оползней использовались

ЦМР с разными разрешениями (5, 10, 20, 40 и 80 м), и в итоге пришли к выводу, что разрешения 20 м дают более высокое качество [70,108].

Мировая практика показывает, что точное пространственное разрешение пикселей ЦМР при картировании восприимчивости к оползням не всегда приводит к высокой прогностической точности [76]. Между тем, не существует идеального пространственного разрешения ЦМР, которое могло бы универсально и идеально представлять размеры всех оползней в пределах анализируемой области [47, 96]. В некоторых исследованиях [47, 96] при проведении моделирования стабильности местности для сравнений ЦМР с разрешением от 2 до 50 м указывают, что ЦМР с разрешением меньше 10 м из-за чрезмерной детализации особенностей рельефа не отражают физические процессы, ответственные за инициирование оползней. Аналогичные результаты были получены в работе [105], где обнаружили, что разрешение 90 м имеет самую высокую точность, и весьма примечательным событием является то, что средняя площадь оползней была очень близка к пространственному разрешению 90 м, что показывает положительную корреляцию между средней площадью оползней и лучшим разрешением.

Для района Куллу (Индия) были использованы ЦМР с разрешением 12.5, 30 и 90 м, и для создания карт восприимчивости к оползням (рис. 4.1) был использован метод соотношения частотности [76].

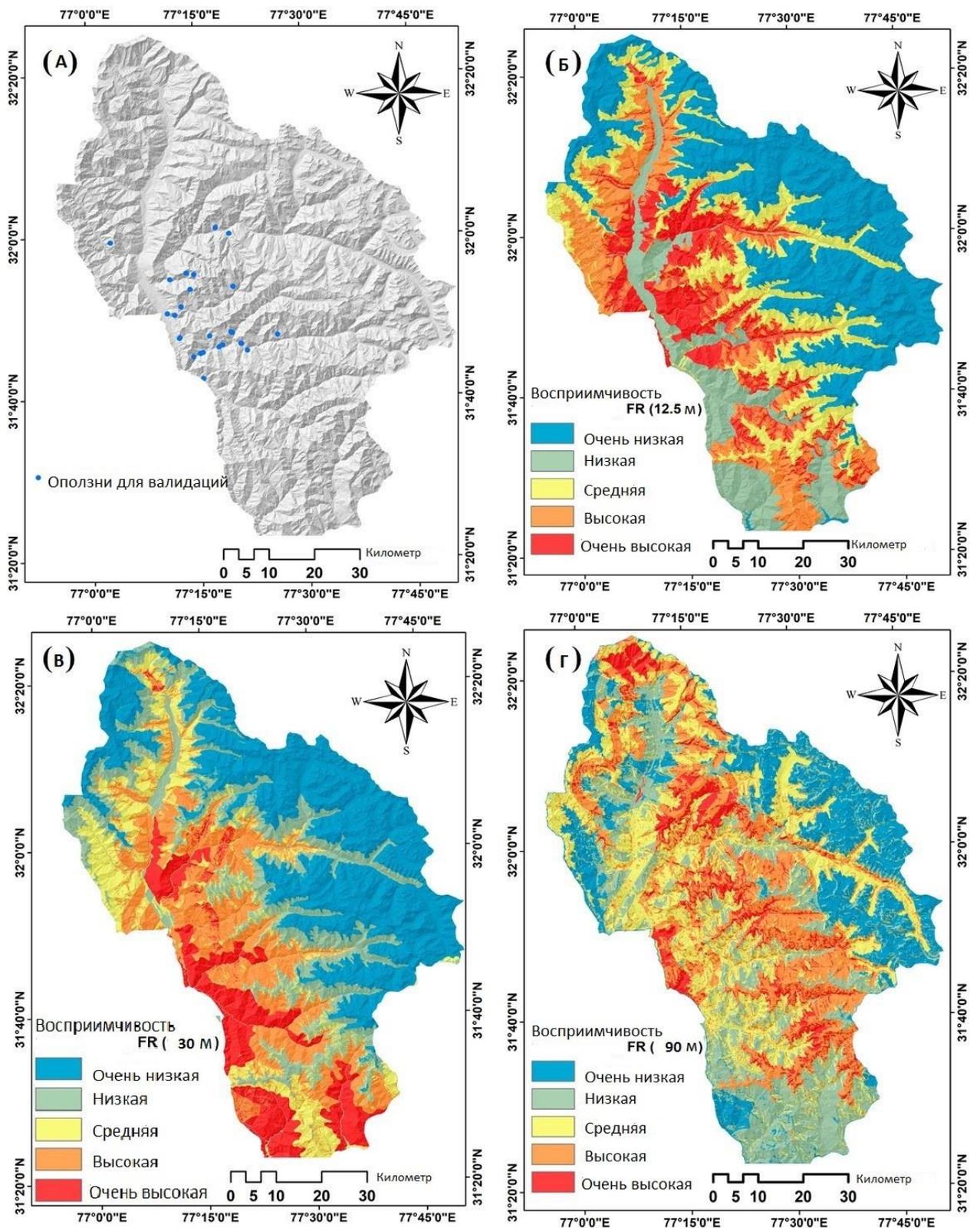


Рисунок 4.1. Карты восприимчивости к возникновению оползней с разными разрешениями: А) оползни в виде точек для оценки качества моделей, Б) модель с разрешением 12.5м, В) модель с разрешением 30м и Г) модель с разрешением 90м [76]

Даже визуальное сравнение карт восприимчивости к возникновению оползней (рис. 4.1 Б, В, Г) с картой инвентаризации оползней (рис.4.1 А) района Куллу позволяет сделать предварительную оценку моделей и прийти к выводу, что модель восприимчивости к возникновению оползней с разрешением 90 м (рис. 4.1 Г) имеет очень низкую точность, так как действующие оползни оказываются вне зоны высокой восприимчивости к возникновению оползней. Однако валидация результатов моделирования и тем самым сравнение моделей восприимчивости к возникновению оползней делается не визуально, а с использованием специальных методов, предназначенных для сравнения и оценки модели. Самыми распространёнными из них являются ROC-кривая и R-индекс.

При работе в районе Куллу были использованы ROC-кривая и R-индекс. Проведенная оценка качества моделей показала, что карта с разрешением 30 м имеет более точные результаты (рис. 4.2 и 4.3).

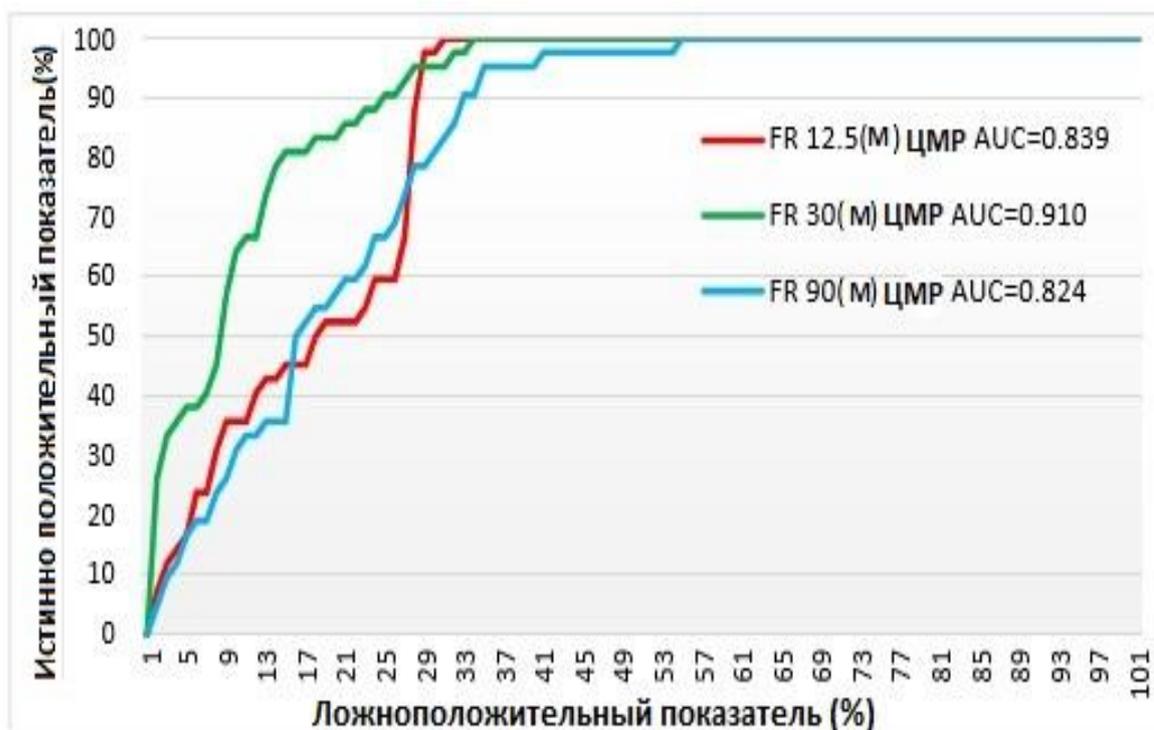


Рисунок 5.2. Результаты ROC- анализа для района Куллу, Индия для ЦМР с разрешениями 12,5, 30 и 90м [76]

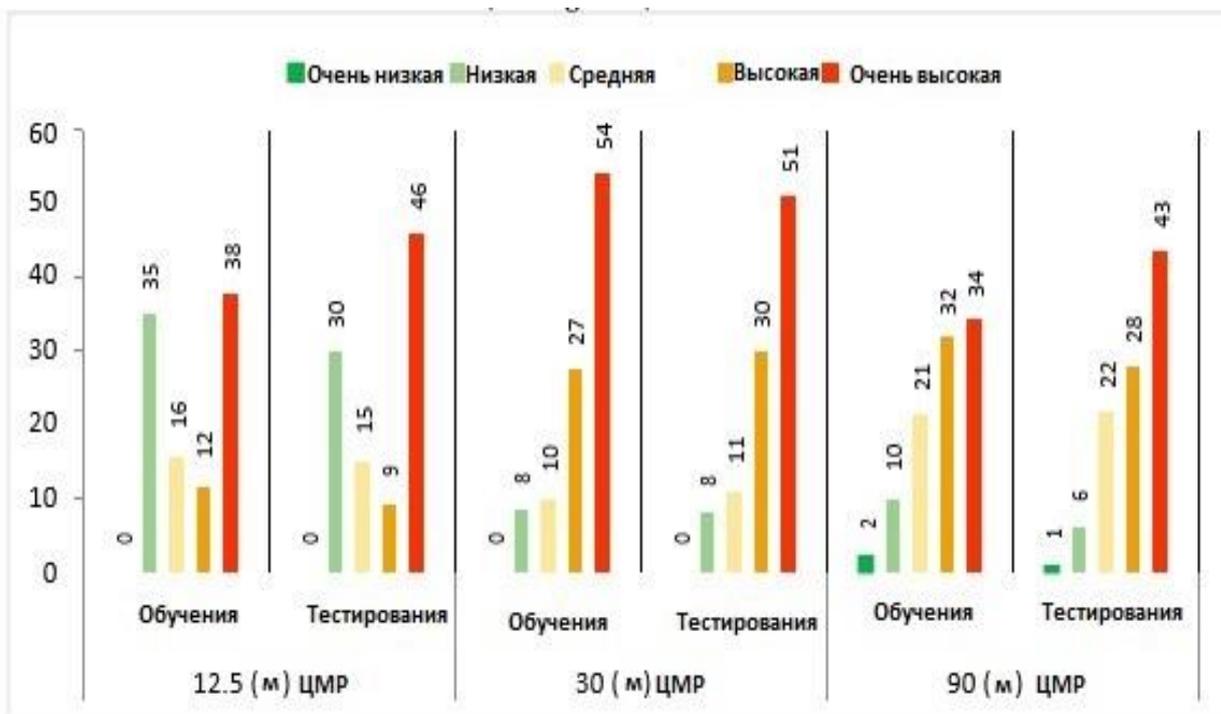


Рисунок 4.3. R-индекс в классах восприимчивости для трех различных по разрешению ЦМР на основе данных обучающих и тестированных выборок [76]

При моделировании восприимчивости к возникновению оползней бассейна реки Баксие (Китай) ЦМР с различными пространственными разрешениями (30м, 40м, 50м, 60м, 70м, 80м, и 90 м) были включены три различные статистические модели [47].

В качестве примера на рисунках 4,4, 5,5 и 4,6 приводятся модели восприимчивости к возникновению оползней района Баксие, Китай, с разными разрешениями.

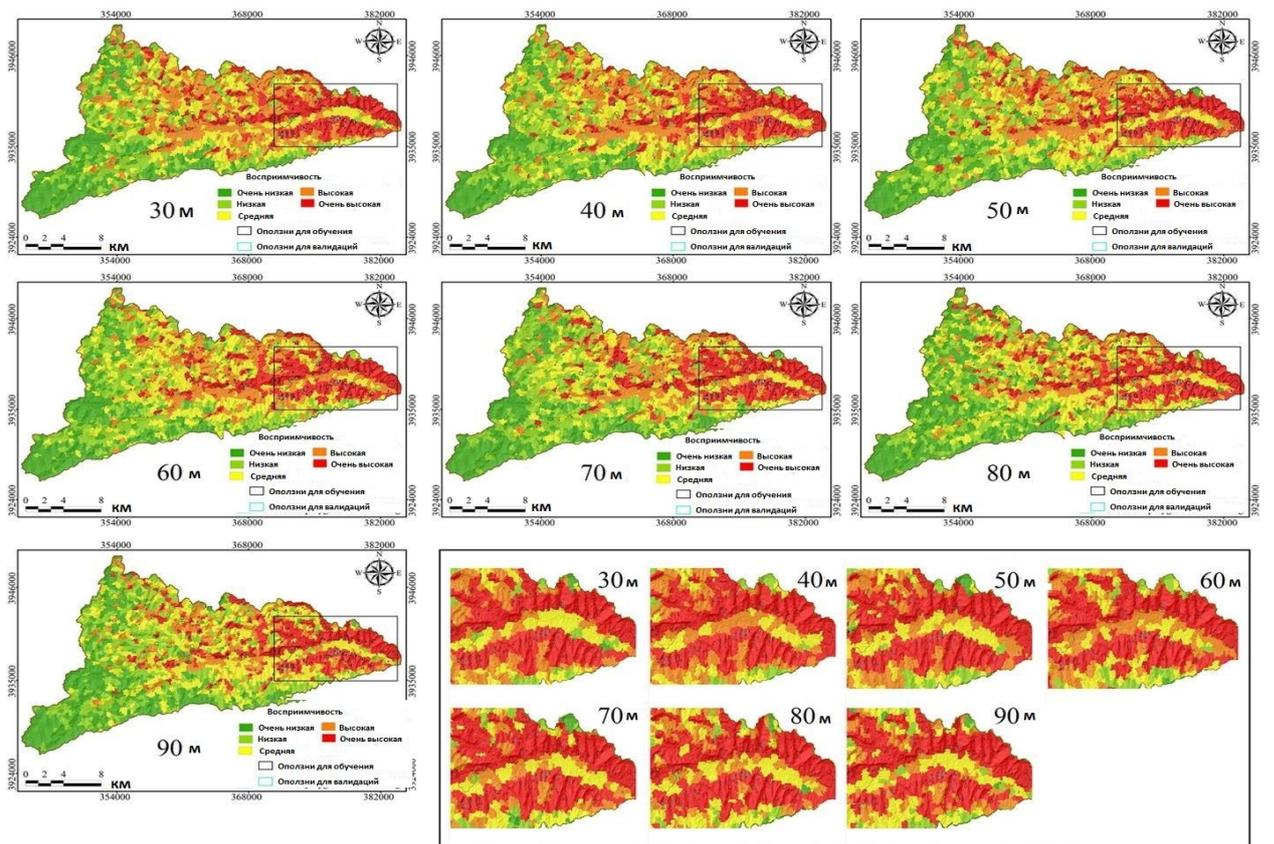


Рисунок 4.4. Моделирования восприимчивости к возникновению оползней с разными разрешениями методом соотношения частотности для бассейна реки Баксие, Китай [47]

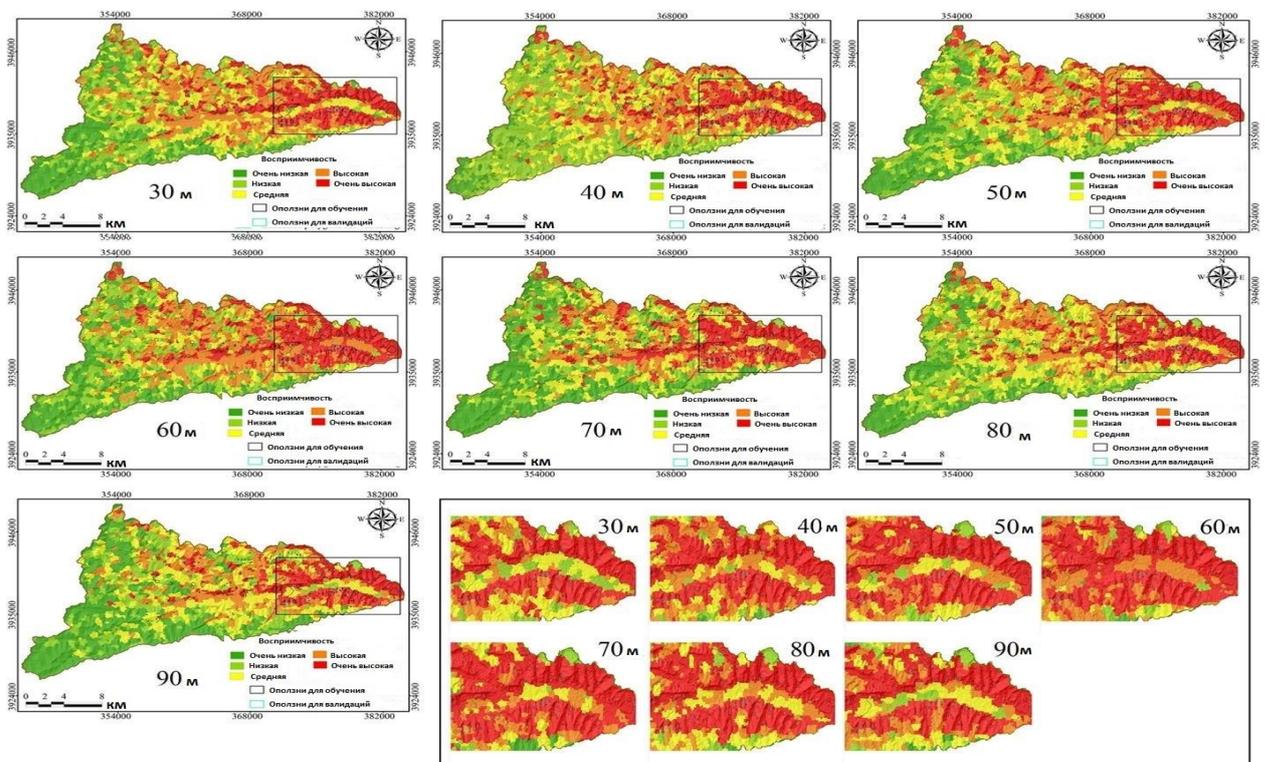


Рисунок 4.5. Моделирования восприимчивости к возникновению оползней с разными разрешениями методом значения информативности для бассейна реки Баксие, Китай [47]

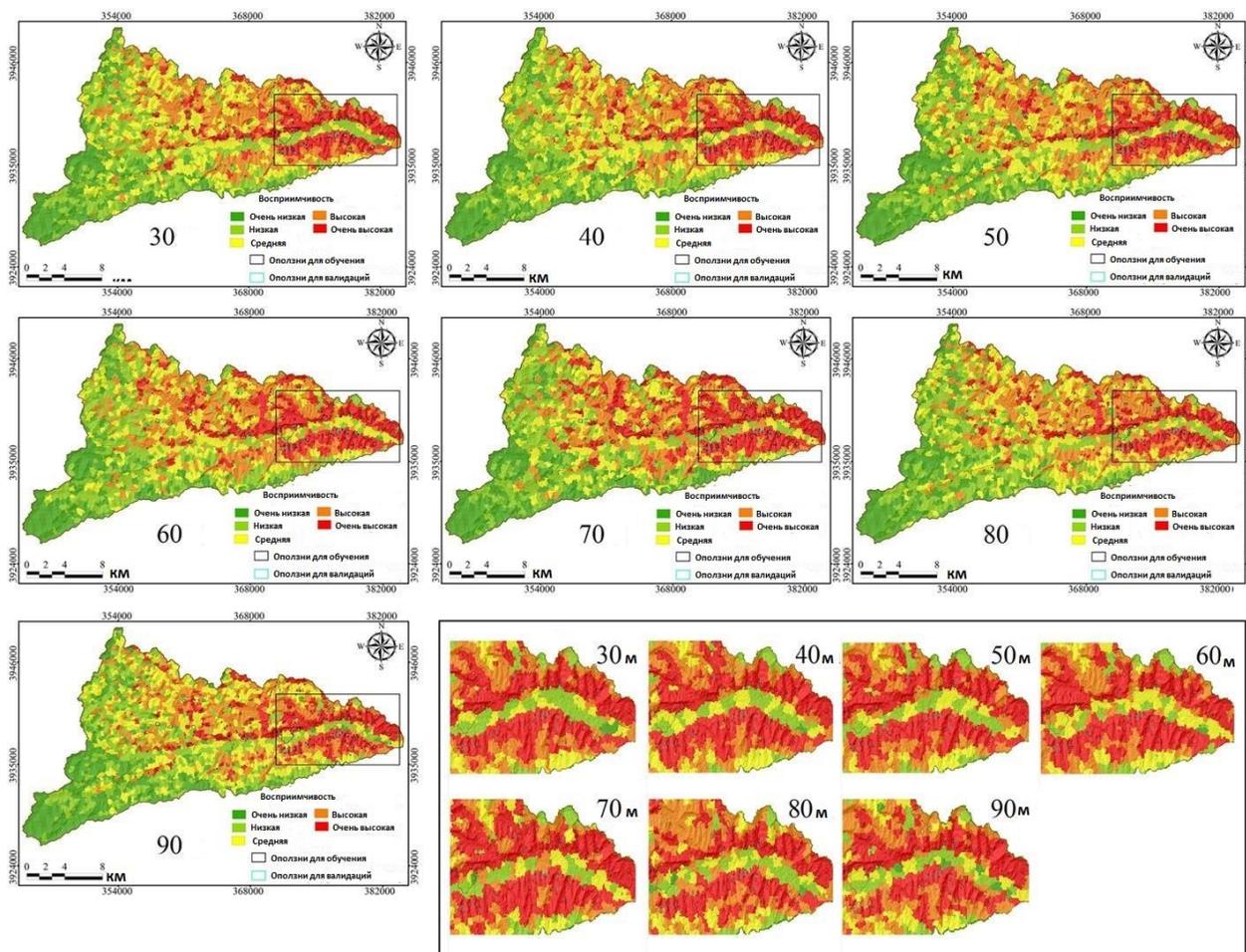


Рисунок 4.6. Моделирования восприимчивости к возникновению оползней с разными разрешениями методом весомости признаков для бассейна реки Баксие, Китай [47]

Для проверки качества карт с разными разрешениями бассейна реки Баксие, Китай был использован только ROC-анализ. На рисунке 5.7 показана зависимость результата ROC-анализа от пространственного разрешения ЦМР.

Результаты показывают, что карта восприимчивости к возникновению оползней, полученная с разрешением ЦМР 70 м, является наиболее статистически надежной.

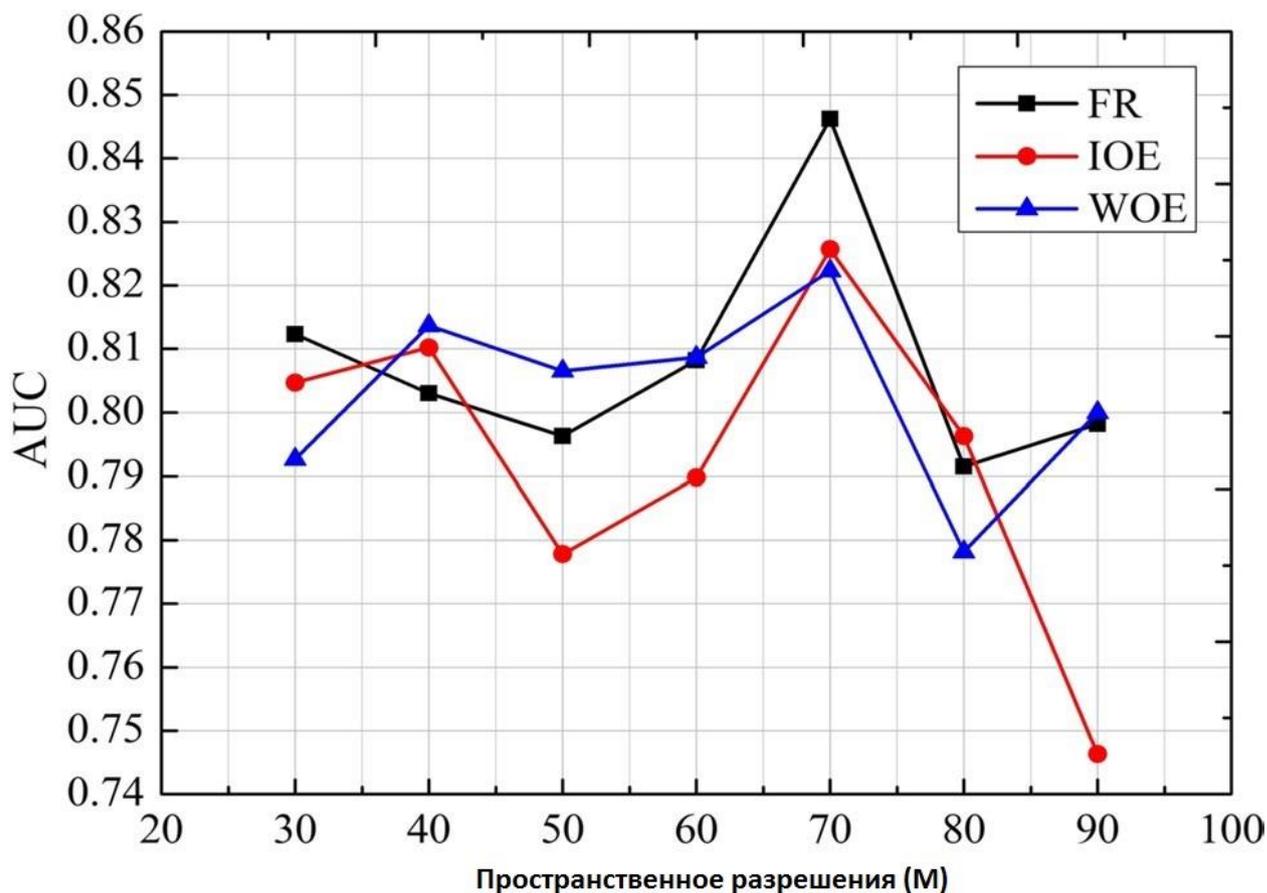


Рисунок 4.7. Кривые успешности для каждого разрешения и моделей: FR – соотношения частотности, IOE – значения информативности и WOE – весомости признаков [47]

Вопрос по выбору пространственного разрешения ЦМР в Таджикистане до настоящего времени не было рассмотрено. Однако неоднозначное мнение по этому вопросу в мировой практике и первый опыт проведения столь детальных и комплексных научных исследований с использованием современных компьютерных программ, и методов привели нас к необходимости проведения оценки качества карт восприимчивости к возникновению оползней и корреляции всех оползнеобразующих факторов с оползневыми явлениями района исследования, которые были созданы двумя ЦМР, имеющими разные пространственные разрешения (30м и 90м). Надо иметь ввиду, что правильный выбор пространственного разрешения ЦМР окажет прямое влияние на качество моделей восприимчивости к возникновению оползней и выявления правильной корреляции между факторами оползнеобразования и оползневыми явлениями.

Для выявления пространственных корреляций был использован метод соотношения частотности. Результаты взвешивания топографических индексов влажности (рис. 4.8 и 4.9) и индексов мощности потока (рис. 4.10 и 4.11) показывают разные результаты.

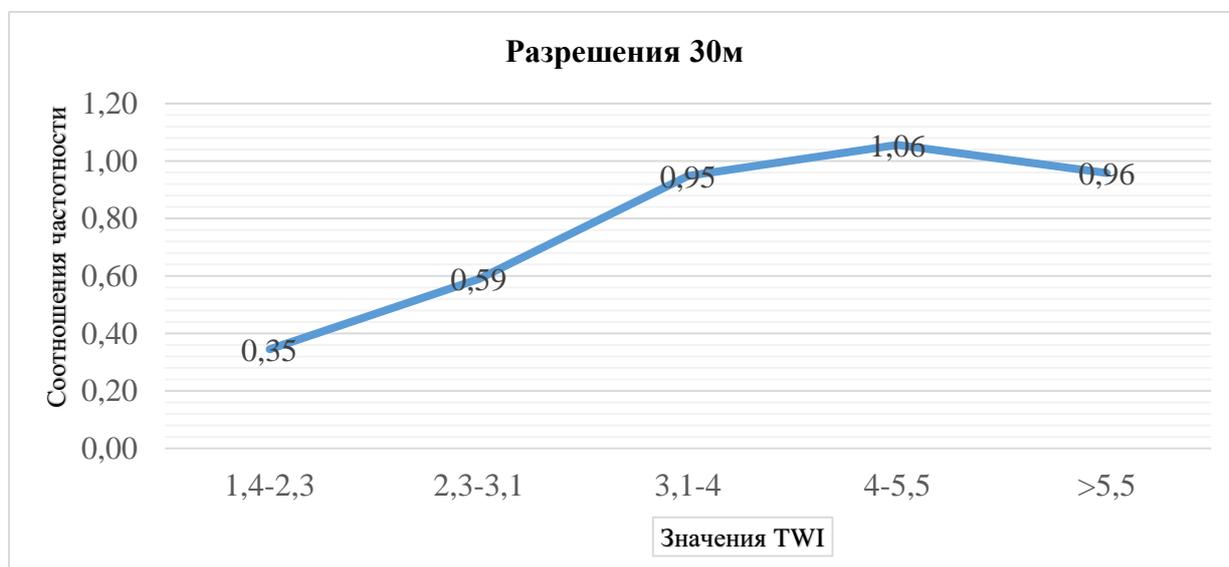


Рисунок 4.8. График зависимости соотношения частотности от показателей TWI с разрешением 30м района каскада ГЭС на реке Вахш

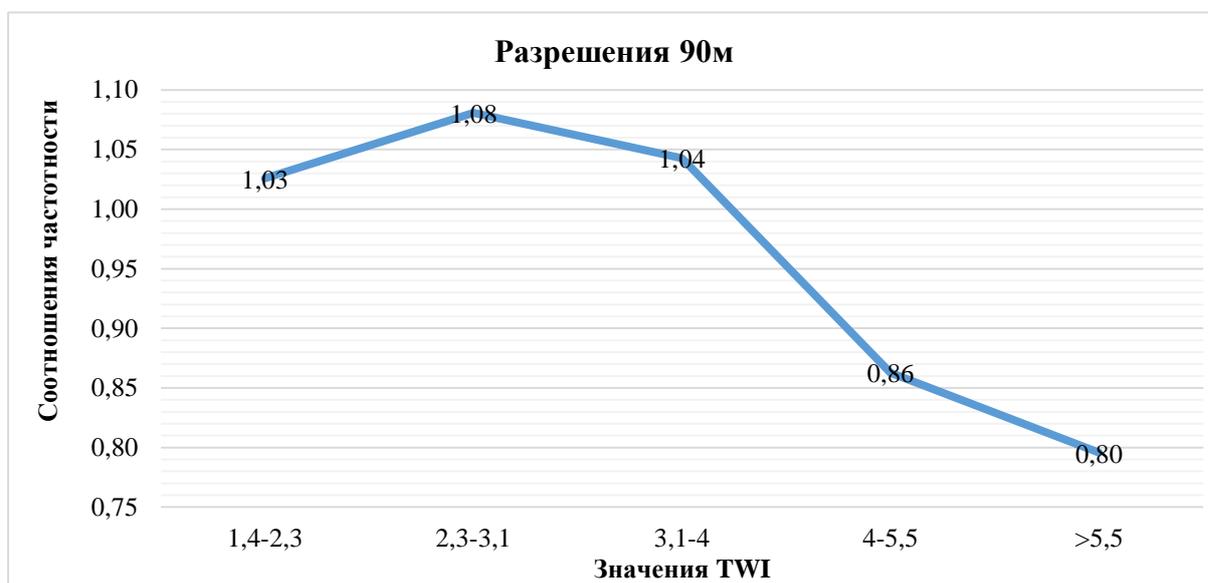


Рисунок 4.9. График зависимости соотношения частотности от показателей TWI с разрешением 90м района каскада ГЭС на реке Вахш

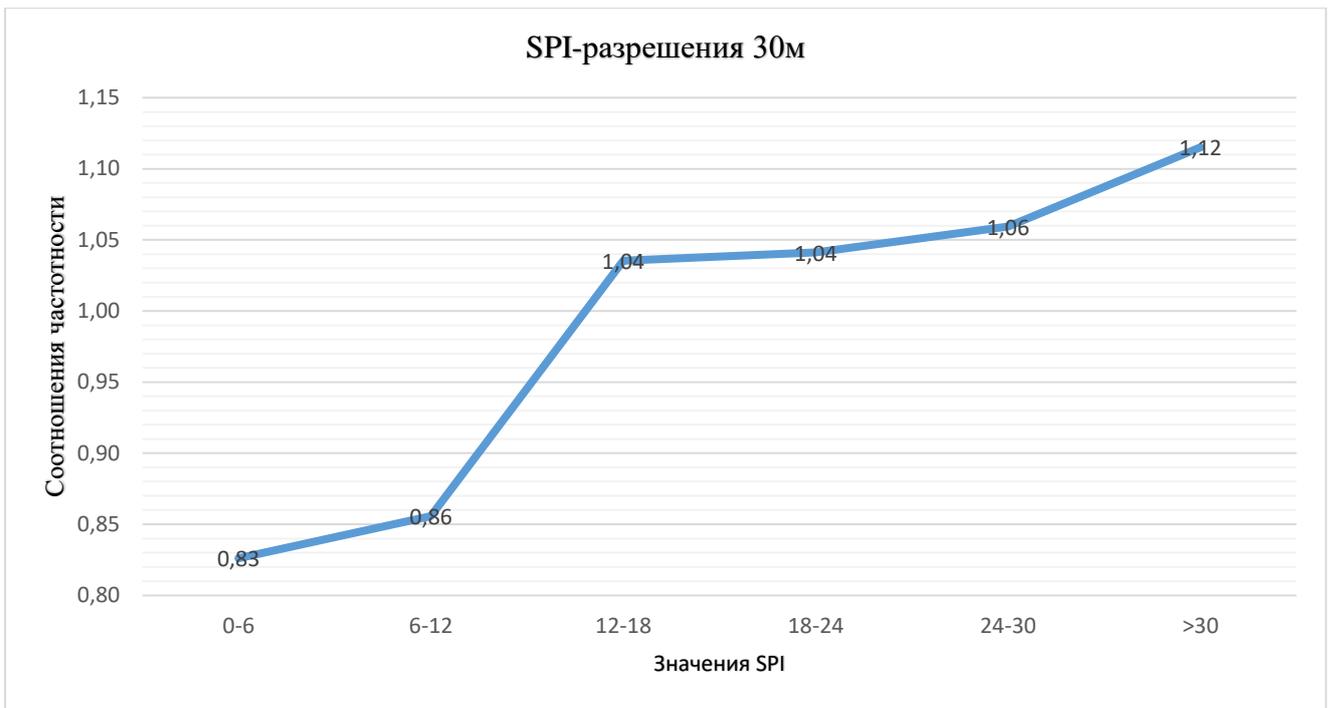


Рисунок 4.10. График зависимости соотношения частотности от показателей SPI с разрешением 30м района каскада ГЭС на реке Вахш

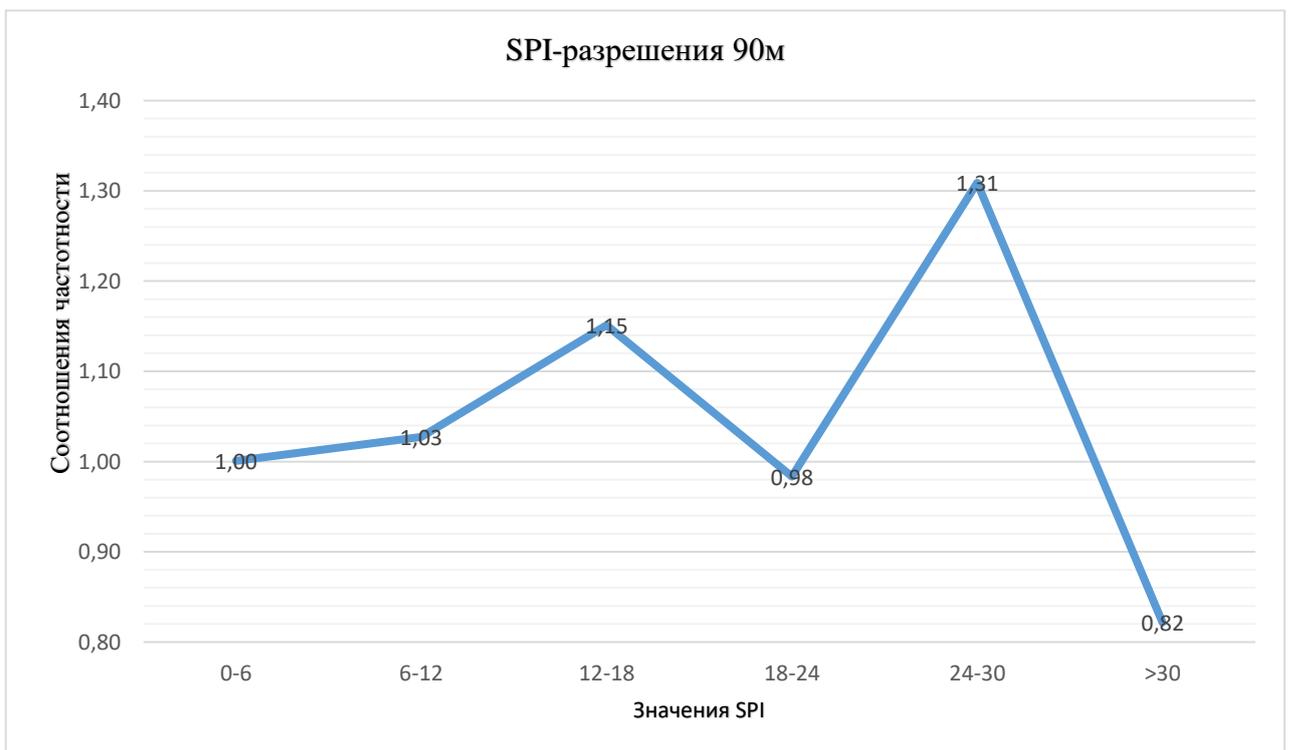


Рисунок 4.11. График зависимости соотношения частотности от показателей SPI с разрешением 90м района каскада ГЭС на реке Вахш

Модели, созданные с учётом перечисленных факторов, даны на рисунках 4.12 и 4.13.

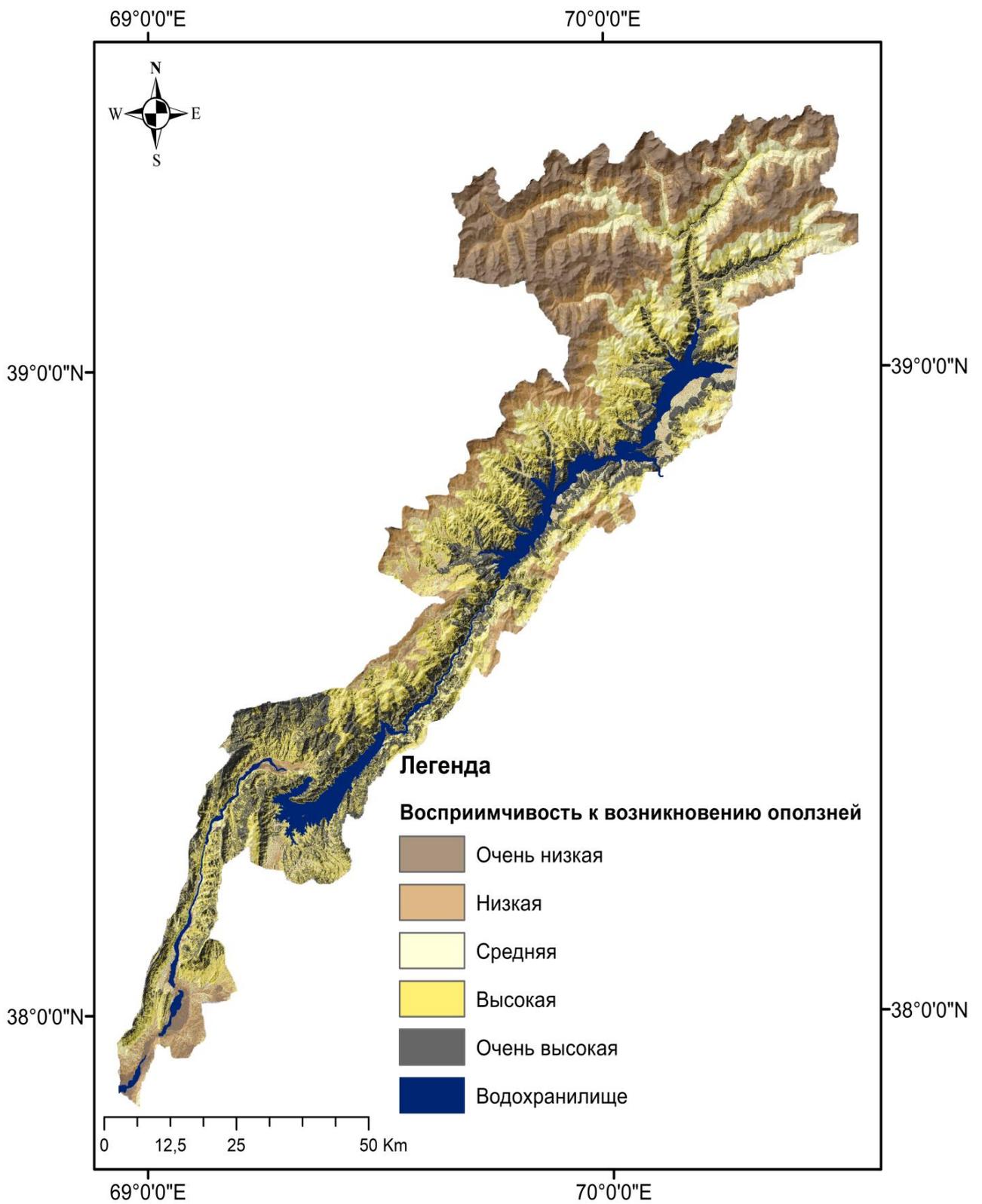


Рисунок 4.12. Модель восприимчивости к возникновению оползней с разрешений 30м

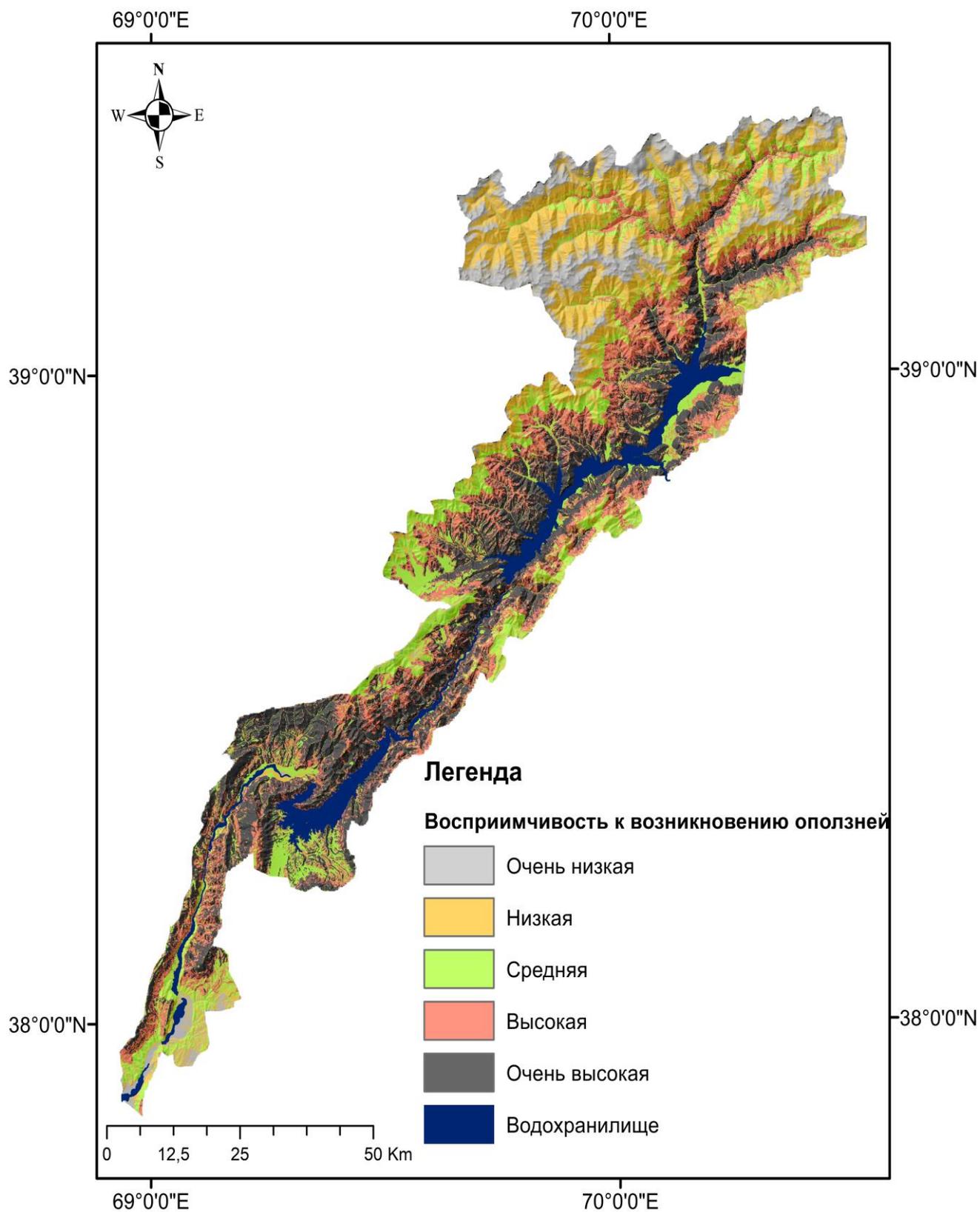


Рисунок 4.13. Модель восприимчивости к возникновению оползней с разрешением 90м

Сравнение качества моделей приведено на рисунке 4.14.

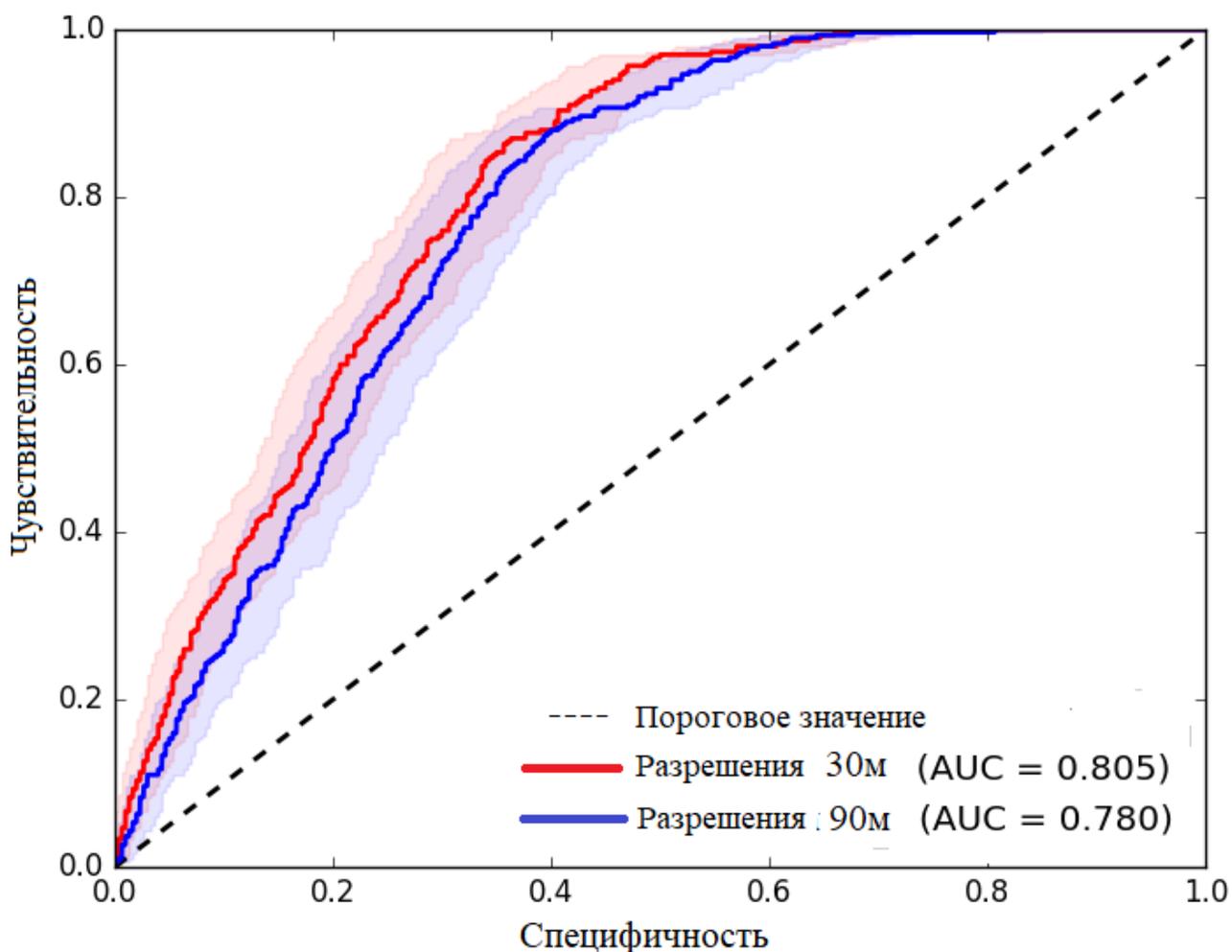


Рисунок 4.14. Сравненные качества моделей с разрешением 30м и 90м

Анализ ранее проведенных работ по оценке влияния пространственного разрешения ЦМР на качество моделей восприимчивости свидетельствуют о том, что нет какой-либо универсальной ЦМР, соответствующей разрешениям, которые могли бы полностью удовлетворить потребность пользователей. Влияние этого показателя ЦМР проявляется по-разному, например, исходная карта в случае картирования восприимчивости к возникновению оползней с разрешением 90 для района Куллу (рис 4.1. г) имеет относительно низкую точность. Однако в других исследованиях по изучению влияния этого показателя было выявлено, что разрешение 90 м более или менее охватывает всю площадь оползня и рекомендуется использовать этот размер пикселей.

Разные результаты работ по этой проблеме вынудили нас проводить собственное исследование в этом направлении. В наличии у нас были ЦМР с 30 и 90 м разрешений, с помощью которых в программе ArcGIS ArcMap были

созданы некоторые факторы оползнеобразования и были выявлены закономерности оползневых явлений с использованием метода соотношения частотности. Результаты картирования восприимчивости к возникновению оползней с этими разрешениями пикселей были сравнены между собой с использованием ROC-кривой. Как видно из рисунка 4.14, исходные данные показали почти одинаковые результаты

**Выводы по четвёртой главе.** Пространственное разрешение матрицы высот - один из наиболее важных факторов, способствующих эффективному анализу восприимчивости к возникновению оползней. Выбор подходящего разрешения может обеспечить высокую точность всего анализа и получение надежных результатов.

Ранее проведенные работы по изучению влияния этого параметра ЦМР имеют локальные отображения и не могут быть связаны с другими территориями. Поэтому анализ ЦМР должен проводиться конкретно для каждой территории. В связи с этим для района каскада ГЭС на реке Вахш впервые был поднят вопрос, какое пространственное разрешение ЦМР является более пригодным при моделировании восприимчивости к возникновению оползней. Все проведенные нами анализы были направлены на решение этого дискуссионного вопроса, включая коррелятивности всех факторов. Модели восприимчивости и все связанные с ними анализы ЦМР с разными разрешениями дали довольно высокие результаты. Однако сделать выводы по влиянию пространственного разрешения ЦМР на основе прогностической способности моделей недостаточно, исходя из этого, было принято решение включить в работу анализ факторов оползнеобразования по отдельности. В результате различие было выявлено при коррелятивности некоторых факторов оползнеобразования, в особенности TWI и SPI, где некоторые результаты являются логически неверными. При анализе TWI с разрешением 30м наблюдается закономерное повышение соотношения частотности, в отличие от 90м разрешения, где получены совсем иные результаты.

## **ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОПОЛЗНЕЙ В РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ**

### **5.1. Метод анализа иерархий при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш**

Прогноз и выявление зон, наиболее предрасположенных к возникновению оползней, напрямую зависят от отбора факторов оползнеобразования. Только после подбора всех факторов проводится процедура взвешивания показателей факторов и выявляется значимость каждого фактора. Одним из широко используемых методов выявления значимости факторов оползнеобразования является МАИ. Применение МАИ направлено на выявление условий, при которых реализуется оползневой процесс, на основе мнения экспертов.

МАИ получает в настоящее время широкое применение при картировании зон восприимчивости к возникновению оползней и, в отличие от статистических методов, не требуется каталог оползней для выявления корреляций показателей факторов оползнеобразования с оползневыми явлениями. Кроме того, следует отметить, что последние работы, посвященные картированию восприимчивости к возникновению оползней, дали очень хорошие результаты. Например, в работе [51] с применением этого метода для бассейна реки Умм-эр-Рбия в Марокко была построена модель восприимчивости к возникновению оползней (рис. 5.1.1.), точность которой равна 77,6%.

Метод анализа иерархий широко используется в международной практике и даёт весьма положительные результаты. Данный подход является полуколичественным методом оценки восприимчивости к возникновению оползней, где взвешивается каждый фактор на основе мнения экспертов [37].

Метод анализа иерархий, или метод экспертных суждений, состоит из 4 стадий [37]:

- 1) построение структурной иерархии;
- 2) построение матрицы парных сравнений на основе мнения экспертов;

- 3) нормализация данных в матрице парных сравнений и определения весов критерий;
- 4) обобщение весов и оценка согласованности.

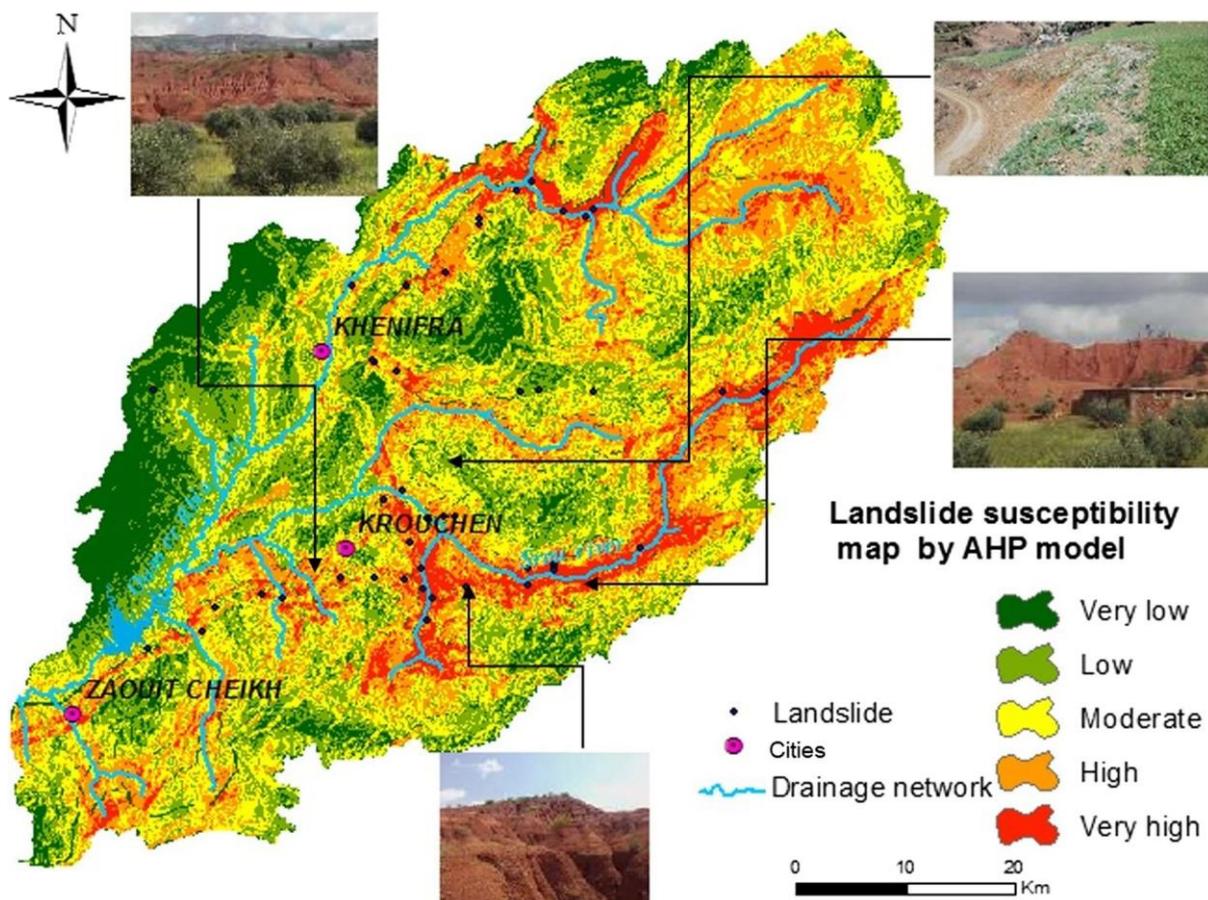


Рисунок 5.1.1. Модель восприимчивости к возникновению оползней бассейна реки Умм-эр-Рбия, Марокко [51]

Последовательность структуры иерархий такова, что сначала ставятся цель, критерий и затем альтернативы (рис. 5.1.2). При разложении критериев и альтернатив они должны располагаться по мере убывания важности.

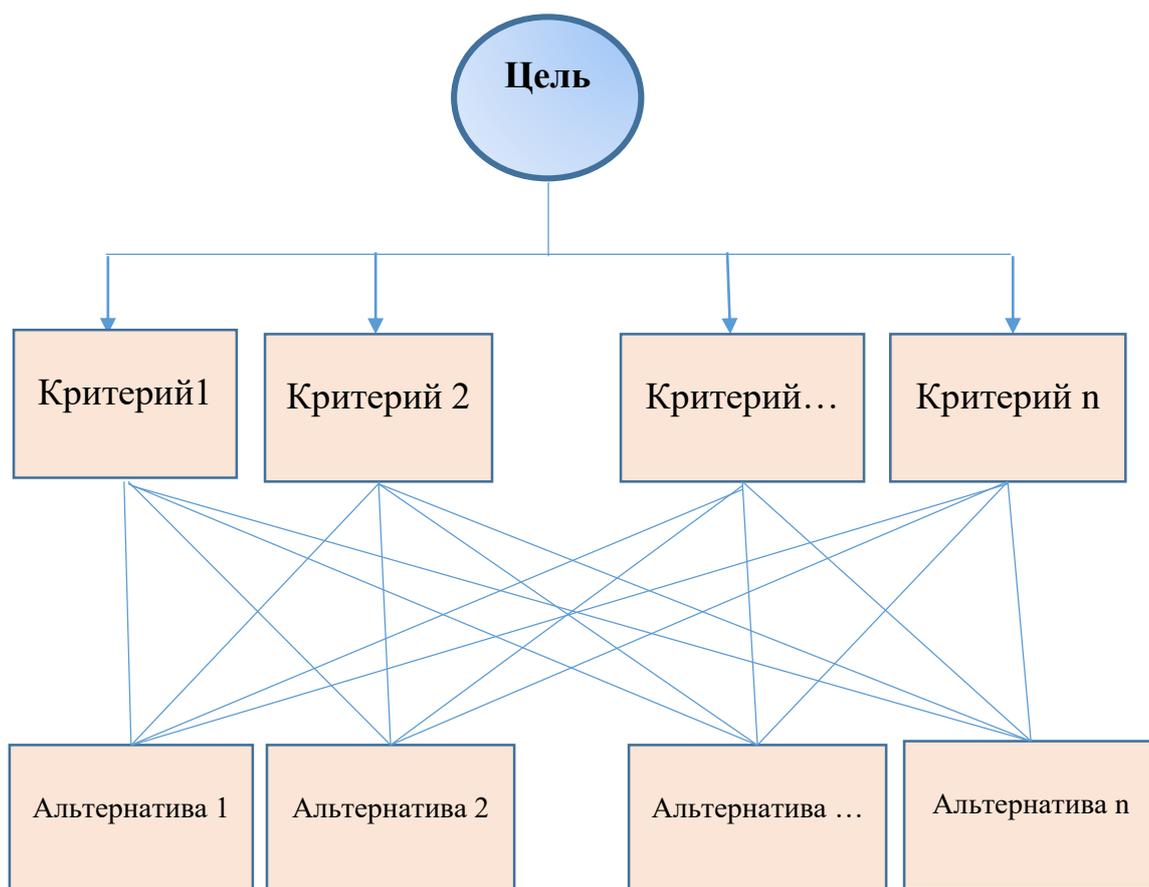


Рисунок 5.1.2. Конструкция структуры иерархии [37]

Вслед за построением структуры иерархий проводится процедура парных сравнений. Критерий оцениваются согласно шкале парных сравнений (табл. 5.1.1), который варьируется от 1 до 9 или от одинаковой значимости до абсолютной значимости. Сущность парных сравнений в том, что оно показывает, насколько переменная "а" более благоприятна или важна, чем переменная "в" в матрице парных сравнений.

Матрица представлена математически в виде [37];

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1.1);$$

Числа переменных по диагонали матрицы равны 1, так как при сравнении критерия между собой он берёт равную или одинаковую важность. При заполнении матрицы парных сравнений, если элемент  $a_{ij}$  имеют равное значения  $i$  имеет превосходство над элементом  $j$ , то клетка ( $i$  и  $j$ ),

соответствующая строке  $i$  и столбцу  $j$ , заполняется целым числом, а клетка  $(j, i)$ , соответствующая строке  $j$  и столбцу  $i$ , заполняется обратным числом (дробью).

Таблица 5.1.1. Шкала парных сравнений [87]

<b>Степень значимости</b>	<b>Определение</b>	<b>Объяснение</b>
<b>1</b>	Одинаковая значимость	Два критерия имеют равное значение
<b>3</b>	Слабая значимость	Опыт и суждения слегка отдают предпочтение одному критерию перед другим
<b>5</b>	Существенная или сильная значимость	Опыт и суждения сильно отдают предпочтение одному критерию перед другим
<b>7</b>	Очень сильная или очевидная значимость	Один критерий очень сильно предпочтен другому; его превосходство практически явно
<b>9</b>	Абсолютная значимость	Доказательства, отдающие предпочтение одному критерию перед другим, имеют наивысший возможный порядок утверждения
<b>2,4,6,8</b>	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы	
<b>Обратные величины приведенных выше чисел (1/2, ..., 1/9)</b>	Если критерию $i$ присвоено одно из вышеперечисленных чисел при сравнении с критерием $j$ , то $j$ имеет обратное значение при сравнении с $i$	

Нормализация данных в матрице парных сравнений и определение локальных весов делаются путём деления значений каждой клетки столбца « $j$ »

на общее количество значений, на столбцы «j». После нормализации общее количество значений в столбце «j» должно быть равным 1. Ниже приводится формула нормализаций матрицы парных сравнений [37].

$$Aw = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum a_{in}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum a_{ij}} & \frac{a_{n2}}{\sum a_{ij}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum a_{in}} \end{bmatrix} \quad (5.1.2);$$

Обобщение весов и оценка согласованности является последней стадией метода анализа иерархий. Первый шаг в данной стадии — это подсчёт глобального веса с обобщением локального веса. Следовательно, идёт подсчёт собственного вектора матрицы A с помощью вычисления среднего  $C_i$  и затем как среднее значение строке «i» в матрицы Aw будут вычислены для столбца C, где вычисленные  $C_i$  результаты представляют относительную степень важности.

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum a_{in}} \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum a_{ij}} + \frac{a_{n2}}{\sum a_{ij}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum a_{in}} \end{bmatrix} \quad (5.1.3);$$

Кроме того, после подсчёта весов ( $C_i$ ) идет их контроль согласованности, и делается это путём умножения матрицей A с матрицы C ( $A \times C$ ) (уров. 5.1.4).

$$A * C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (5.1.4);$$

Следовательно, согласно формуле 6.1.5, подсчитывается  $\lambda_{\max}$  [37].

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{C_i} \quad (5.1.5);$$

Где  $\lambda_{\max}$  - собственное значение матрицы парного сравнения.

Индекс согласованности (CI) подсчитывается по формуле (5.1.6), а коэффициент согласованности – по формуле (5.1.7). В результате будет вычислено приближение к индексу согласованности (CR).

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5.1.6);$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5.1.7);$$

где RI – значение случайного индекса согласованности, который берётся из таблицы (табл. 6.1.2) и зависит от числа критериев.

Взвешивания показателей разных факторов приведены в таблицах 5.1.3 – 5.1.10.

Таблица 5.1.2. Значения случайного индекса [39, 87]

n	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Таблица 5.1.3 – Взвешивания показателей крутизны склонов

Критерий	30-40	20-30	10-20	40-50	5-10	50-69	0-5	Вес
<b>30-40</b>	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	<b>0,35</b>
<b>20-30</b>	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	<b>0,24</b>
<b>10-20</b>	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	<b>0,16</b>
<b>40-50</b>	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	<b>0,11</b>
<b>5-10</b>	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	<b>0,07</b>
<b>50-69</b>	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	<b>0,05</b>
<b>0-5</b>	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	<b>0,03</b>
<b>CR=0,025</b>								

Таблица 5.1.4. – Взвешивания показателей нормализованного вегетационного индекса

Критерий	-0.25-0	0-0.1	0.1-0.2	0.5-0.68	0.4-0.5	0.3-0.4	0.2-0.3	Вес
<b>-0.25-0</b>	1,00	1	1/3	1/6	1/6	1/5	1/7	0,03
<b>0-0.1</b>	1,00	1,00	1/2	1/3	1/4	1/4	1/5	0,04
<b>0.1-0.2</b>	3,00	2,00	1,00	1/2	1/3	1/4	1/5	0,07
<b>0.5-0.68</b>	6,00	3,00	2,00	1,00	1/2	1/3	1/4	0,12
<b>0.4-0.5</b>	6,00	4,00	3,00	2,00	1,00	1/2	5	0,25
<b>0.3-0.4</b>	5,00	4,00	4,00	3,00	2,00	1,00	2	0,27
<b>0.2-0.3</b>	7,00	5,00	5,00	4,00	0,20	0,50	1,00	0,21
<b>CR=0,096</b>								

Таблица 5.1.5 – Взвешивания показателей кривизны склонов

Критерий	Выпуклая	Вогнутая	Плоская	Вес
Выпуклая	1,00	3,00	2,00	<b>0,54</b>
Вогнутая	0,33	1,00	0,50	<b>0,3</b>
Плоская	0,50	2,00	1,00	<b>0,16</b>
CR=0,008				

Таблица 5.1.6 – Взвешивания показателей спектральных ускорений грунтов

Критерий	1,084 - 1,114744	1,054 - 1,084	1,024 - 1,054	0,994 - 1,024	0,964 - 0,994	0,934 - 0,964	0,904 - 0,934	Вес
1,084 - 1,114744	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	<b>0,35</b>
1,054 - 1,084	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	<b>0,24</b>
1,024 - 1,054	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	<b>0,16</b>
0,994 - 1,024	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	<b>0,11</b>
0,964 - 0,994	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	<b>0,07</b>
0,934 - 0,964	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	<b>0,05</b>
0,904 - 0,934	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	<b>0,03</b>
CR=0,025								

Таблица 5.1.7 – Взвешивания показателей атмосферных осадков

Критерий	351-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-100	1000-1100	1100-1205	Вес
351-400	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,13	0,11	0,02
400-500	2,00	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,13	0,03
500-600	3,00	2,00	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,04
600-700	4,00	3,00	2,00	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,05
700-800	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,08
800-900	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,50	0,33	0,25	0,11
900-100	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,50	0,33	0,15
1000-1100	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,50	0,22
1100-1205	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,31
CR=0,035										

Таблица 5.1.8 – Взвешивания показателей топографического индекса влажности

Критерий	>5,5	4-5,5	3,1-4	2,3-3,1	1,4-2,3	Вес
>5,5	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	0,42
4-5,5	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	0,26

Продолжение таблицы 5.1.8

<b>3,1-4</b>	<b>0,33</b>	<b>0,50</b>	<b>1,00</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>0,16</b>
<b>2,3-3,1</b>	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	0,1
<b>1,4-2,3</b>	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,06
<b>CR=0,015</b>						

Таблица 5.1.9 – Взвешивания показателей индекса мощности потока

Критерий	>30	24-30	18-24	12-18	6-12	6-12	Вес
<b>&gt;30</b>	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	0,38
<b>24-30</b>	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	0,25
<b>18-24</b>	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	0,16
<b>12-18</b>	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	0,1
<b>6-12</b>	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	0,07
<b>0-6</b>	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,04
<b>CR=0,02</b>							

Таблица 5.1.10 – Взвешивания показателей высотной зональности

Критерий	1000-1500	452-1000	1500-2000	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	4000-4500	4500-5196	Вес
<b>1000-1500</b>	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	0,31
<b>452-1000</b>	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	0,22
<b>1500-2000</b>	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	0,15
<b>2000-2500</b>	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	0,11
<b>2500-3000</b>	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	0,08
<b>3000-3500</b>	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	0,05
<b>3500-4000</b>	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	0,04
<b>4000-4500</b>	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	0,03
<b>4500-5196</b>	0,11	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,02
<b>CR=0,035</b>										

На таблице 5.1.11 приведены результаты взвешивания факторов оползнеобразования.

Таблица 5.1.11 – Взвешивания факторов оползнеобразования

Критерий	Спектральное ускорение грунтов	Крутизна склонов	Атмосферные осадки	Индекс NDVI	Высотная зональность	Экспозиция склонов	Мощность потока	кривизна	Влажность	Вес

Продолжение Таблица 5.1.11

<b>Спектральное ускорение грунтов</b>	<b>1,00</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,00</b>	<b>7,00</b>	<b>8,00</b>	<b>9,00</b>	<b>0,31</b>
<b>Крутизна склонов</b>	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	0,22
<b>Атмосферные осадки</b>	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	0,15
<b>Индекс NDVI</b>	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	0,11
<b>Высотная зональность</b>	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	0,08
<b>Экспозиция склонов</b>	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	0,05
<b>Мощность потока</b>	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	0,04
<b>кривизна</b>	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	0,03
<b>Влажность</b>	0,11	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,02
<b>CR=0,035</b>										

С использованием взвешенных показателей разных факторов и самих факторов было создана карта восприимчивости к возникновению оползней (рис. 5.1.3).

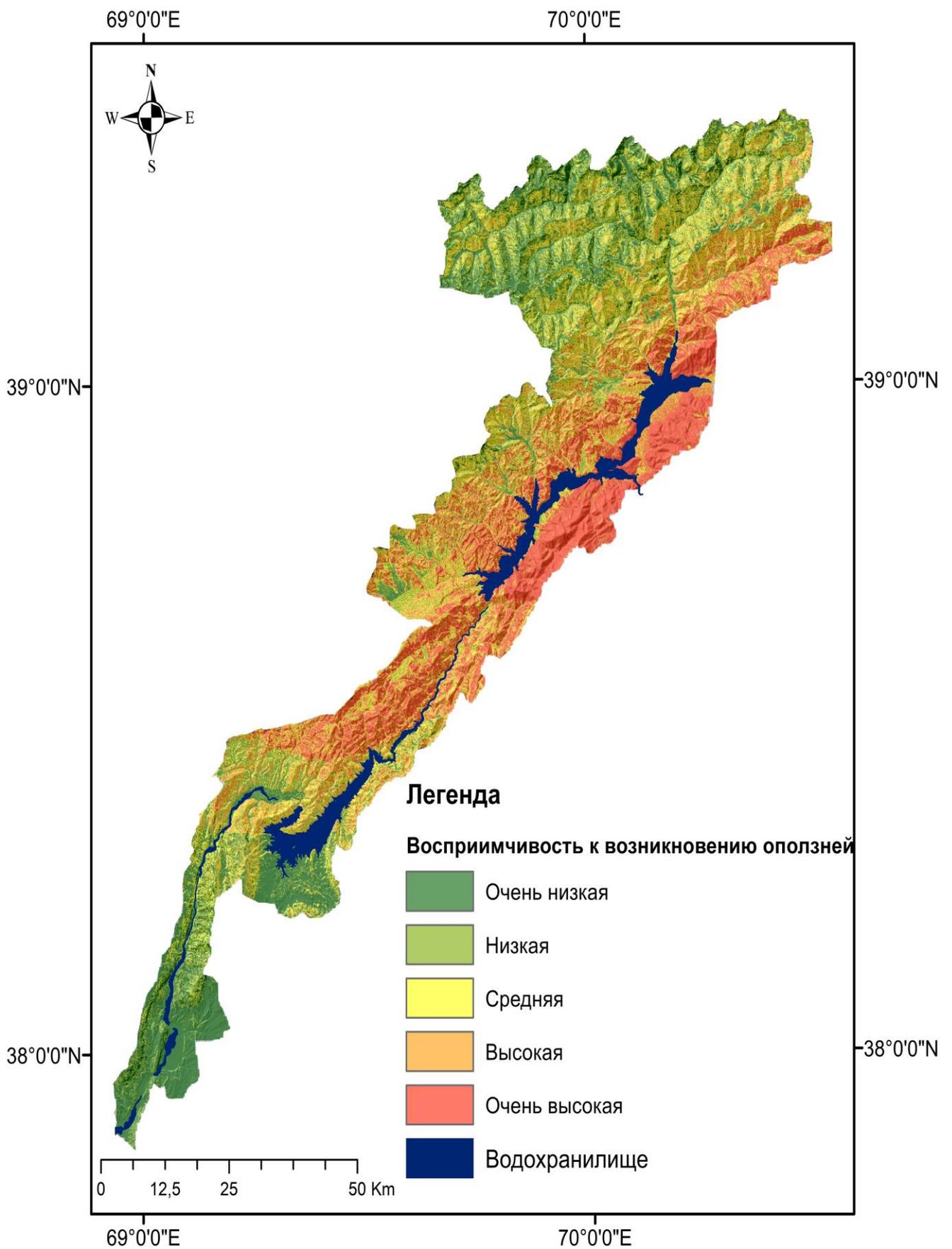


Рисунок 5.1.3. Модель восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш, созданная с помощью МАИ

## 5.2. Метод соотношения частотности при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш

Метод соотношения частотности — это двумерный статистический или количественный метод анализа данных, представляет собой очень простую и полезную модель для районирования восприимчивости территорий к возникновению оползней [81]. Метод соотношения частотности используется для выявления статистической взаимосвязи между распределением существующих оползней и каждым фактором, определяющим оползневой процесс [82, 86]. Значения соотношения частотности больше 1 представляет высокую корреляцию, а значения меньше 1 показывает слабую корреляцию с наличием оползней [38, 46, 75]. Простота расчета и высокие результаты данного метода моделирования сделали ее самым часто используемым [90].

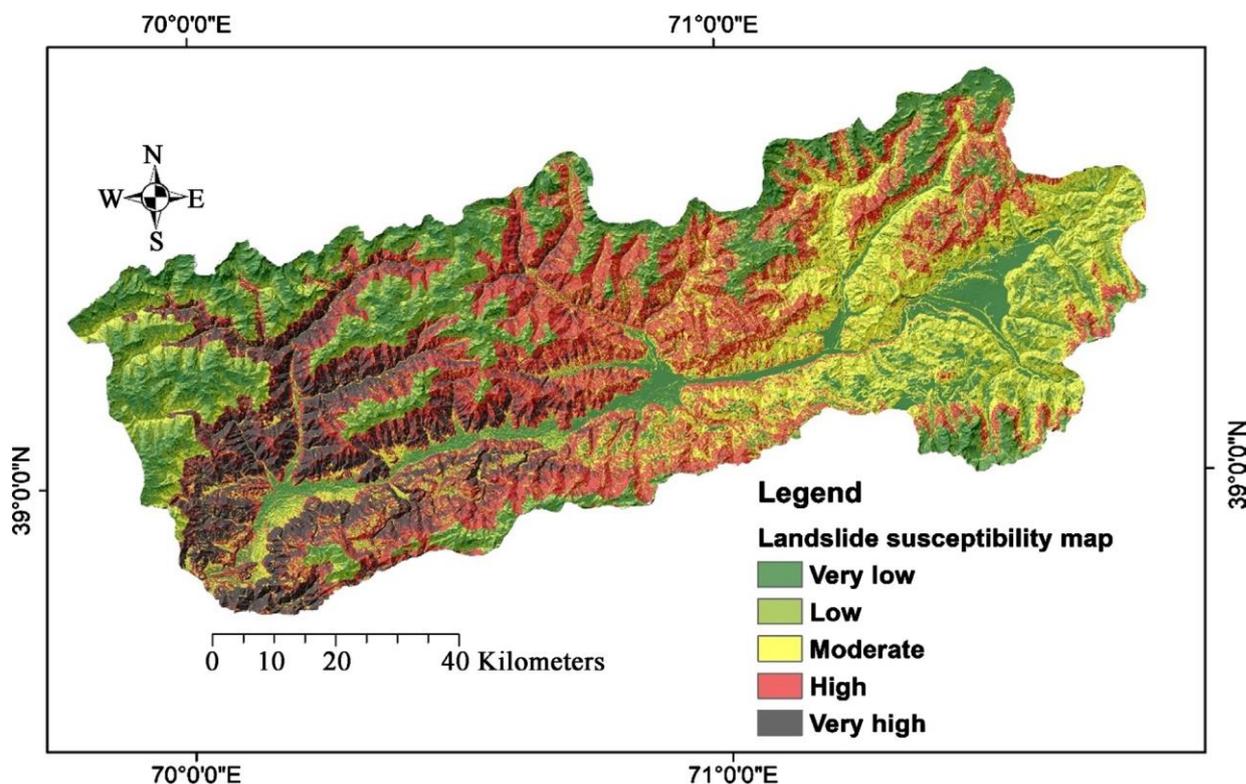


Рисунок 5.2.1. Карта восприимчивости к возникновению оползней долины реки Сурхоб [7-А]

Метод соотношения частотности, как показывает анализ данных за последние годы, практически во всех случаях его использования при картировании восприимчивости к возникновению оползней дал очень высокий результат. В особенности, зонирование восприимчивости к возникновению

оползней с применением этого метода для территорий долины реки Сурхоб позволило составить карту пространственного регионального прогноза мест, наиболее предрасположенных к возникновению оползней (рис. 5.2.1), с точностью 88% и выявить общие закономерности оползневых явлений на этой территории.

Расчёт соотношения частотности согласно работам [59, 113], делается по формуле 5.2.1.

$$FR_i = \frac{Ncell(S_i) / Ncell(N_i)}{\sum Ncell(S_i) / \sum Ncell(N_i)} \quad (5.2.1);$$

где:  $FR_i$  – соотношения частотности;

$Ncell(S_i)$  – количество пикселей с оползнями в классе;

$Ncell(N_i)$  – количество пикселей в классе;

$\sum Ncell(S_i)$  – общее количество пикселей с оползнями на карте;

$\sum Ncell(N_i)$  – общее количество пикселей на карте;

Индекс восприимчивости к возникновению оползней рассчитывается путем суммирования значений соотношения частот классов каждого фактора [95] с использованием уравнений 5.2.2 [46, 77] и инструментов пространственного анализа ГИС [101].

$$LSI = \sum_{i=1}^n FR_i \quad (5.2.2);$$

где:  $LSI$  – индекс восприимчивости к возникновению оползней.

Выявленные корреляции факторов оползнеобразования методом соотношения частотности приведены в таблице 5.2.1 и на рисунке 5.2.2 в виде карт.

Таблица 5.2.1 – Результаты взвешивания факторов оползнеобразования методом соотношения частотности.

Крутизна склонов					
Класс	Ncell(Ni)	∑Ncell(Ni)	Ncell(Si)	∑Ncell(Si)	FRi
0-5	358712		1474		0,14

Продолжение Таблица 5.2.1

<b>5-10</b>	<b>438560</b>		<b>6236</b>		<b>0,48</b>
<b>10-20</b>	1233599	6125152	39216	180345	1,08
<b>20-30</b>	1746391		61951		1,20
<b>30-40</b>	1594183		50861		1,08
<b>40-50</b>	635541		18146		0,97
<b>&gt;50</b>	118166		2461		0,71
<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>	74378		3		0,00
<b>Северная</b>	658396		21657		1,12
<b>Северо-восточная</b>	625982		18090		0,98
<b>Восточная</b>	788265	6125152	29117	180345	1,26
<b>Юго-восточная</b>	929793		33710		1,23
<b>Южная</b>	818591		24116		1,00
<b>Юго-западная</b>	717627		14166		0,67
<b>Западная</b>	787705		18260		0,79
<b>Северо-западная</b>	739430		21226		0,98
<b>Высотная зональность</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>452-1000</b>	650768		19399		1,01
<b>1000-1500</b>	1186600		51034		1,46
<b>1500-2000</b>	1205345	6125152	60572	180345	1,71
<b>2000-2500</b>	921930		34725		1,28
<b>2500-3000</b>	733389		12071		0,56
<b>300-3500</b>	663320		2186		0,11
<b>3500-4000</b>	623924		358		0,02
<b>4000-4500</b>	144205		0		0,00
<b>4500-5196</b>	10686		0		0,00
<b>Кривизна 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>Вогнутая</b>	2952404		89060		1,027
<b>Ровная</b>	315062	6125152	6598	180345	0,713
<b>Выпуклая</b>	2872701		84687		1,004
<b>Спектральное ускорение грунтов</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>0.90-0.96</b>	1083216		19625		0,62
<b>0.96-1.002</b>	2545885	6143204	66006	179906	0,89
<b>1.002-1.04</b>	2514103		94275		1,28
<b>Атмосферные осадки мм/год</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>341-400</b>	44875		0		0,00
<b>400-500</b>	186837		3791		0,69
<b>500-600</b>	405666	6148566	18932	179841	1,60
<b>600-700</b>	1807378		80967		1,53

Продолжение Таблица 5.2.1

<b>700-800</b>	<b>1780655</b>		<b>65363</b>		<b>1,25</b>
<b>800-900</b>	1126694		10136		0,31
<b>900-1000</b>	684447		652		0,03
<b>1000-1100</b>	112014		0		0,00
<b>Нормализованный вегетационный индекс</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>-0,39 - -0,27</b>	2829		5		0,06
<b>-0,27 - -0,15</b>	30531		108		0,12
<b>-0,15 - -0,03</b>	667700		300		0,02
<b>-0,03- 0,08</b>	517744	6140247	11469	180359	0,75
<b>0,08 - 0,2</b>	1330724		53348		1,36
<b>0,2 - 0,31</b>	1450670		50832		1,19
<b>0,31 - 0,43</b>	1233110		40788		1,13
<b>0,43- 0,55</b>	714703		19604		0,93
<b>0,55 - 0,67</b>	180188		3780		0,71
<b>0,67 - 0,79</b>	12048		125		0,35
<b>Топографический индекс влажности</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>1,4-2,3</b>	117		1		0,35
<b>2,3-3,1</b>	21314	7287164	311	180344	0,59
<b>3,1-4</b>	748650		17585		0,95
<b>4-5,5</b>	3225711		84351		1,06
<b>&gt;5,5</b>	3291372		78096		0,96
<b>Индекс мощности потока</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>0-6</b>	2374331		48541		0,83
<b>6-12</b>	286787	7287164	6073	180344	0,86
<b>12-18</b>	401052		10276		1,04
<b>18-24</b>	398263		10263		1,04
<b>24-30</b>	306284		8031		1,06
<b>&gt;30</b>	3520447		97160		1,12

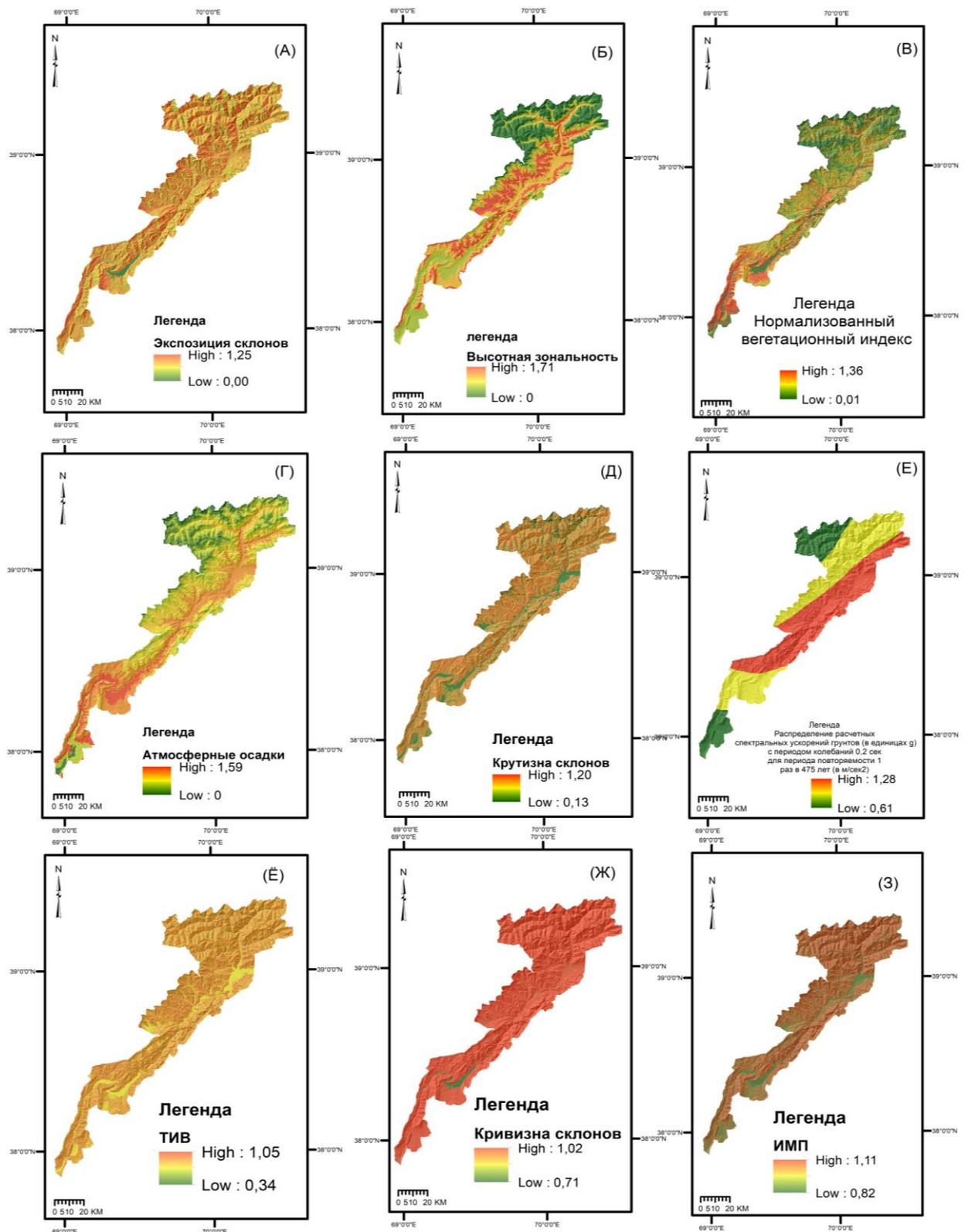


Рисунок 5.2.2. Результаты взвешивания процессообразующих факторов в виде карт (методом соотношения частотности)

С использованием взвешенных процессообразующих факторов в ГИС-программе ArcGIS ArcMap версии 10.6.1 была построена модель восприимчивости к возникновению оползней (рис. 5.2.3).

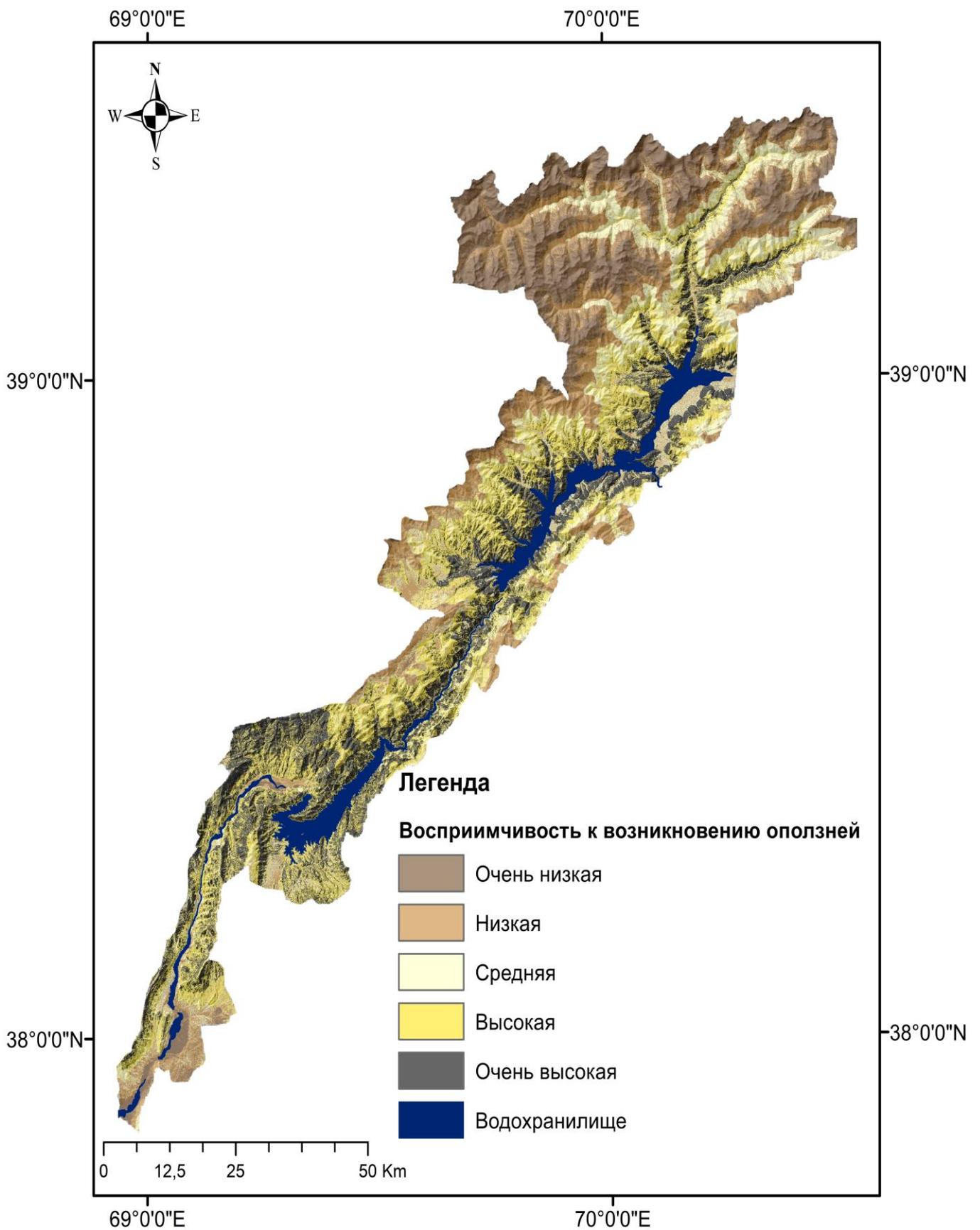


Рисунок 5.2.3. Модель восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш, построенная методом соотношения частотности

### 5.3. Метод значения информативности при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш

Модель значения информативности — это двумерный метод статистического анализа [34], который был взят из теории информативности. Вначале он был использован в геологоразведочных полевых работах и, следовательно, для прогнозирования геологических опасностей и для оценки риска стихийных бедствий [45]. В данной методике веса классов факторов оползнеобразования определяются вне зависимости друг от друга с наложением карты инвентаризаций на каждый из классифицированных карт факторов с использованием инструмента кросс-табуляций ГИС-программ. Значение информативности выражается следующим образом:

$$I(H, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 1/n \frac{P(H, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}{P(H)}, \quad (5.3.1)$$

где  $I(H, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  - значения информативности, вычисленные сочетаниями факторов  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ,  $P(H, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  - вероятность возникновения оползня при наложении факторов  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ,  $P(H)$  - вероятность возникновения оползня.

Основываясь на вычисленной условной вероятности, уравнение (5.3.2) можно написать так:

$$P(H, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = I(H, x_1) + I_{x_1}(H, x_2) + \dots + I_{x_1 x_2 x_3 \dots x_{n-1}}(H, x_n), \quad (5.3.2)$$

где  $I_{x_1}(H, x_2)$  - значения информативности обеспечивающий фактором  $x_2$  при наличии  $x_1$ . Таким образом, согласно уравнению (5.3.2), значение информативности, полученной комбинацией факторов  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , равно сумме значения информативности, представленного факторами  $x_1$ , и значением информативности оползня, представленным фактором  $x_2$ , когда определён  $x_1$ ,

значения информативности оползня, обеспечиваемым  $x_n$ , когда определён  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}$ .

В практике моделирования восприимчивости к возникновению оползней, согласно авторам работ [32, 45], расчёт значения информативности делается следующим уравнением:

$$I(H, x_i) = \ln \left( \frac{Densclass}{Denmap} \right) = \ln \frac{Npix(Si) / Npix(Ni)}{\sum Npix(Si) / \sum Npix(Ni)} \quad (5.3.3)$$

Где:  $I(H, x_i)$  – значение информативности;

$Densclass$  – плотность оползней в классе фактора;

$Denmap$  – плотность оползней на карте;

$Npix(Si)$  – количество пикселей с оползнями в классе;

$Npix(Ni)$  – количество пикселей в классе;

$\sum Npix(Si)$  – общее количество пикселей с оползнями на карте;

$\sum Npix(Ni)$  – общее количество пикселей на карте.

Индекс значения информативности рассчитывается суммированием всех взвешенных факторов [45, 54] с использованием уравнений (5.3.4).

$$LSI = \sum_{i=1}^n I(H, x_i) = \sum_{i=1}^n \ln \left( \frac{Densclass}{Denmap} \right) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{Npix(Si) / Npix(Ni)}{\sum Npix(Si) / \sum Npix(Ni)} \quad (6.3.4);$$

$LSI < 0$  вероятность возникновения оползней меньше средней,

$LSI = 0$  вероятность возникновения оползней равна средней,

$LSI > 0$  вероятность возникновения оползней выше средней.

Выявленные корреляции факторов оползнеобразования методом соотношения частотности приведены в таблице 5.3.1 и на рисунке 5.3.1 в виде карт.

Таблица 5.3.1- Результаты взвешивания факторов оползнеобразования методом значения информативности

<b>Крутизна склонов</b>					
Класс	Npix(Si)	Npix(Ni)	$\sum$ Npix(Si)	$\sum$ Npix(Ni)	I (H, xi)
0-5	1474	358712			-1,97
5-10	6236	438560			-0,73
10-20	39216	1233599			0,08
20-30	61951	1746391	180345	6140167	0,19
30-40	50861	1594183			0,08
40-50	18146	635541			-0,03
50-60	2461	118166			-0,34
<b>Экспозиция склонов</b>					
Класс	Npix(Si)	Npix(Ni)	$\sum$ Npix(Si)	$\sum$ Npix(Ni)	I (H, xi)
Ровная	3	74378			-6,59
Северная	21657	658396			0,11
Северо-восточная	18090	625982			-0,02
Восточная	29117	788265	180345	6140167	0,23
Юго-восточная	33710	929793			0,21
Южная	24116	818591			0,00
Юго-западная	14166	717627			-0,40
Западная	18260	787705			-0,24
Северо-западная	21226	739430			-0,02
<b>Высотная зональность</b>					
Класс	Npix(Si)	Npix(Ni)	$\sum$ Npix(Si)	$\sum$ Npix(Ni)	I (H, xi)
452-1000	19399	650768			0,01
1000-1500	51034	1186600			0,38
1500-2000	60572	1205345			0,54
2000-2500	34725	921930	180345	6140167	0,25
2500-3000	12071	733389			-0,58
300-3500	2186	663320			-2,19
3500-4000	358	623924			-3,94
4000-4500	0	144205			0,00
4500-5196	0	10686			0,00
<b>Спектральное ускорение грунтов</b>					
Класс	Npix(Si)	Npix(Ni)	$\sum$ Npix(Si)	$\sum$ Npix(Ni)	I (H, xi)
0.904333-0.964568	19625	1083216			-0,48
0.964568-1.002524	66006	2545885	179906	6143204	-0,12
1.002524-1.036355	94275	2514103			0,25
<b>Атмосферные осадки мм/год</b>					
Класс	Npix(Si)	Npix(Ni)	$\sum$ Npix(Si)	$\sum$ Npix(Ni)	I (H, xi)
341-400	0	44875			0,00
400-500	3791	186837			-0,37

Продолжение Таблица 5.3.1

<b>500-600</b>	<b>18932</b>	<b>405666</b>			<b>0,47</b>
<b>600-700</b>	80967	1807378	179841	6148566	0,43
<b>700-800</b>	65363	1780655			0,23
<b>800-900</b>	10136	1126694			-1,18
<b>900-1000</b>	652	684447			-3,42
<b>1000-1100</b>	0	112014			0,00
<b>Нормализованный вегетационный индекс</b>					
<b>Класс</b>	<b>Npix(Si)</b>	<b>Npix(Ni)</b>	<b>∑Npix(Si)</b>	<b>∑Npix(Ni)</b>	<b>I (H, xi)</b>
<b>-0,39 - -0,27</b>	5	2829			-2,81
<b>-0,27 - -0,15</b>	108	30531			-2,12
<b>-0,15 - -0,03</b>	300	667700			-4,18
<b>-0,03- 0,08</b>	11469	517744	180359	6140247	-0,28
<b>0,08 - 0,2</b>	53348	1330724			0,31
<b>0,2 - 0,31</b>	50832	1450670			0,18
<b>0,31 - 0,43</b>	40788	1233110			0,12
<b>0,43- 0,55</b>	19604	714703			-0,07
<b>0,55 - 0,67</b>	3780	180188			-0,34
<b>0,67 - 0,79</b>	125	12048			-1,04
<b>Топографический индекс влажности</b>					
<b>Класс</b>	<b>Npix(Si)</b>	<b>Npix(Ni)</b>	<b>∑Npix(Si)</b>	<b>∑Npix(Ni)</b>	<b>I (H, xi)</b>
<b>1,4-2,3</b>	1	117			-1,06
<b>2,3-3,1</b>	311	21314			-0,53
<b>3,1-4</b>	17585	748650			-0,05
<b>4-5,5</b>	84351	3225711	180345	7287164	0,06
<b>&gt;5,5</b>	78096	3291372			-0,04
<b>Индекс мощности потока</b>					
<b>Класс</b>	<b>Npix(Si)</b>	<b>Npix(Ni)</b>	<b>∑Npix(Si)</b>	<b>∑Npix(Ni)</b>	<b>I (H, xi)</b>
<b>0-6</b>	48541	2374331			-0,19
<b>6-12</b>	6073	286787			-0,16
<b>12-18</b>	10276	401052			0,03
<b>18-24</b>	10263	398263	180345	7287164	0,04
<b>24-30</b>	8031	306284			0,06
<b>&gt;30</b>	97160	3520447			0,11
<b>Кривизна склонов</b>					
<b>Класс</b>	<b>Npix(Si)</b>	<b>Npix(Ni)</b>	<b>∑Npix(Si)</b>	<b>∑Npix(Ni)</b>	<b>I (H, xi)</b>
<b>Вогнутая</b>	89060	2952404			0,03
<b>Ровная</b>	6598	315062	180345	6140167	-0,34
<b>Выпуклая</b>	84687	2872701			0,01

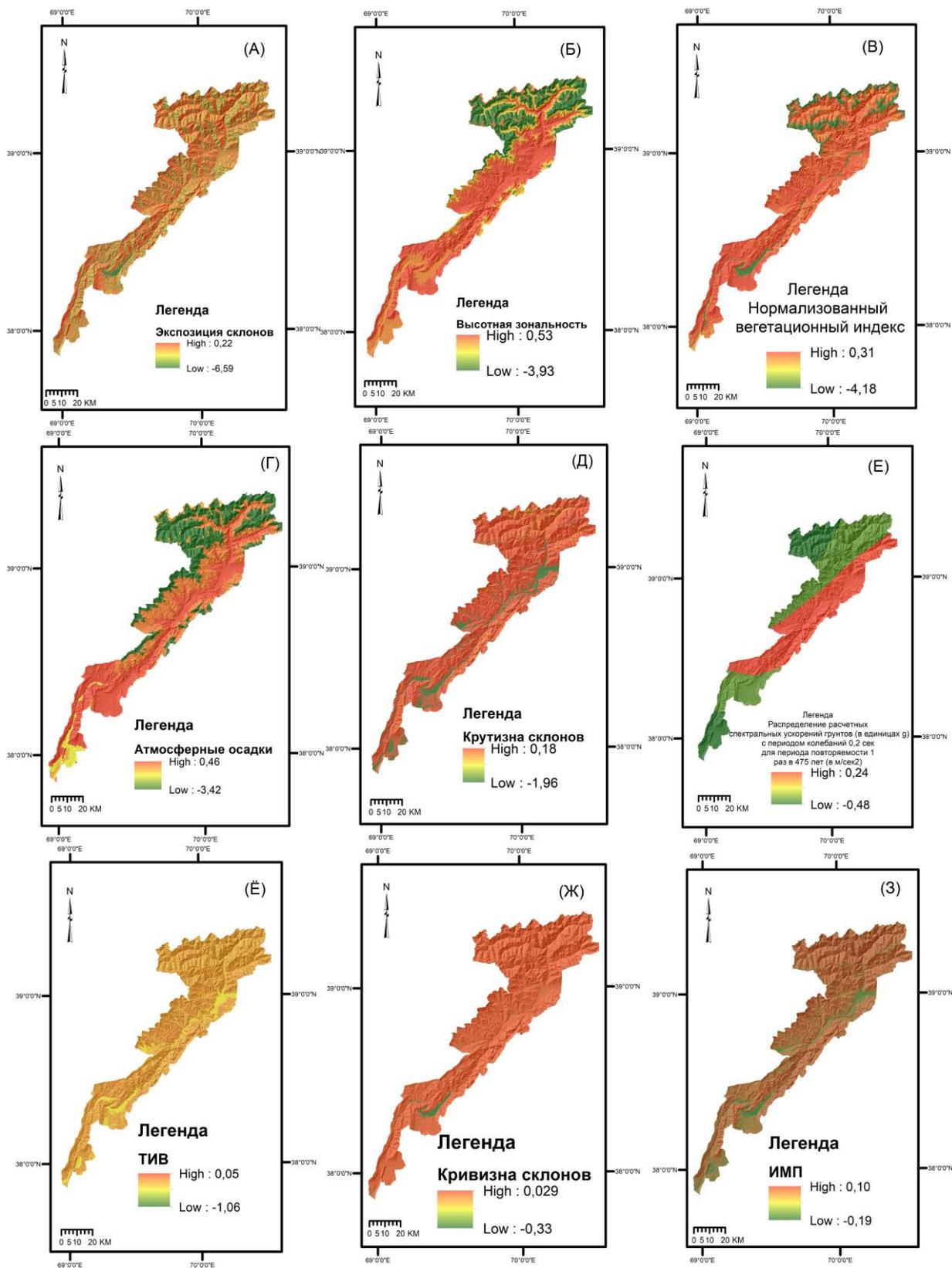


Рисунок 5.3.1. Результаты взвешивания процессообразующих факторов в виде карт (методом значения информативности)

Построенная модель восприимчивости к возникновению оползней методом значения информативности представлена на рисунке 5.3.2.

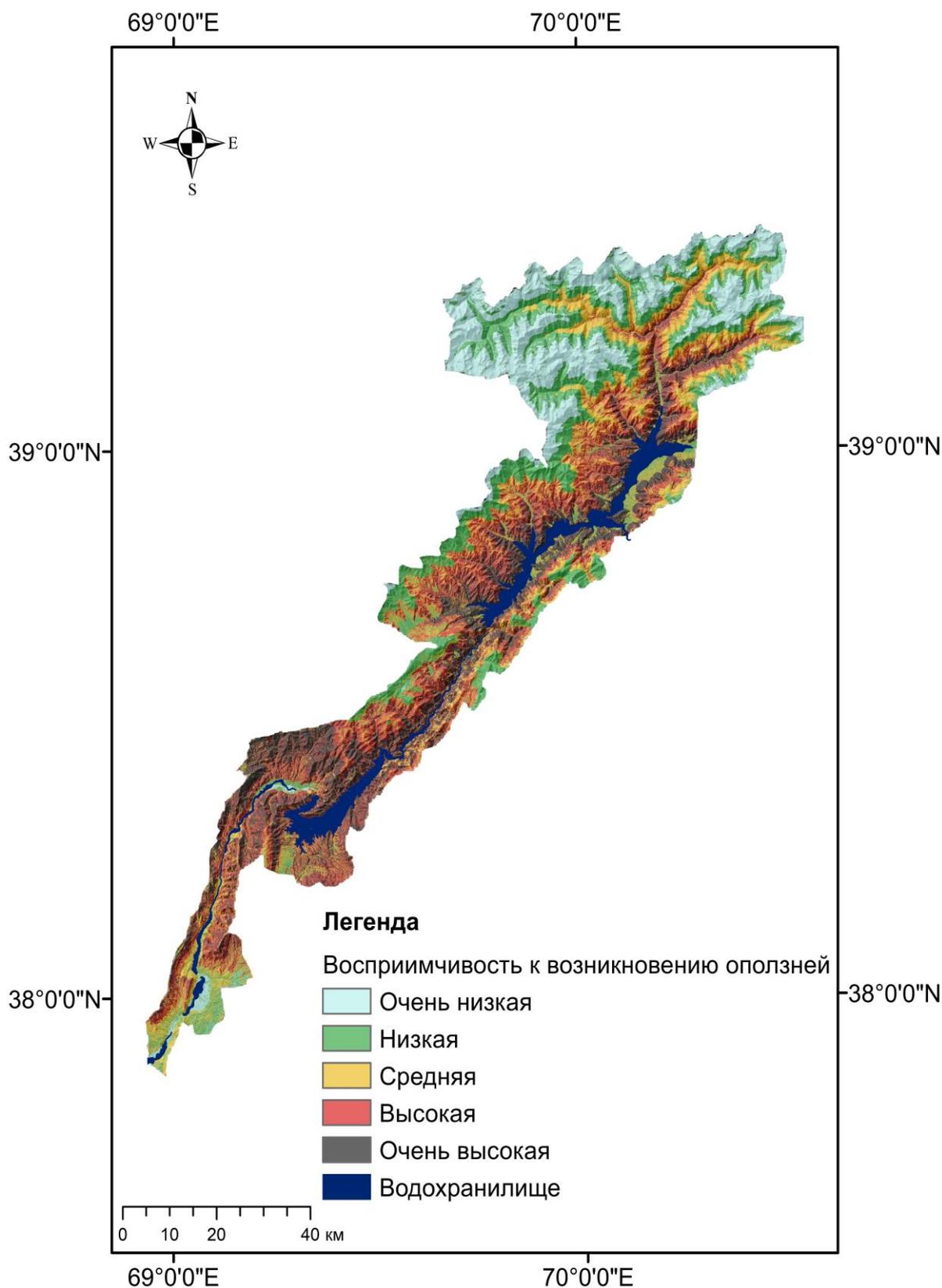


Рисунок 5.3.2. Модель восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш, построенная методом значения информативности

#### 5.4. Метод весомости признаков при моделировании восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш

Весомость признаков по сравнению с другими методами моделирования восприимчивости к оползням имеет более сложный алгоритм расчёта весов факторов. Несмотря на её сложность, в мировой практике этот метод моделирования наряду с другими методами используется широко и имеет весьма высокие результаты (рис. 5.4.1).

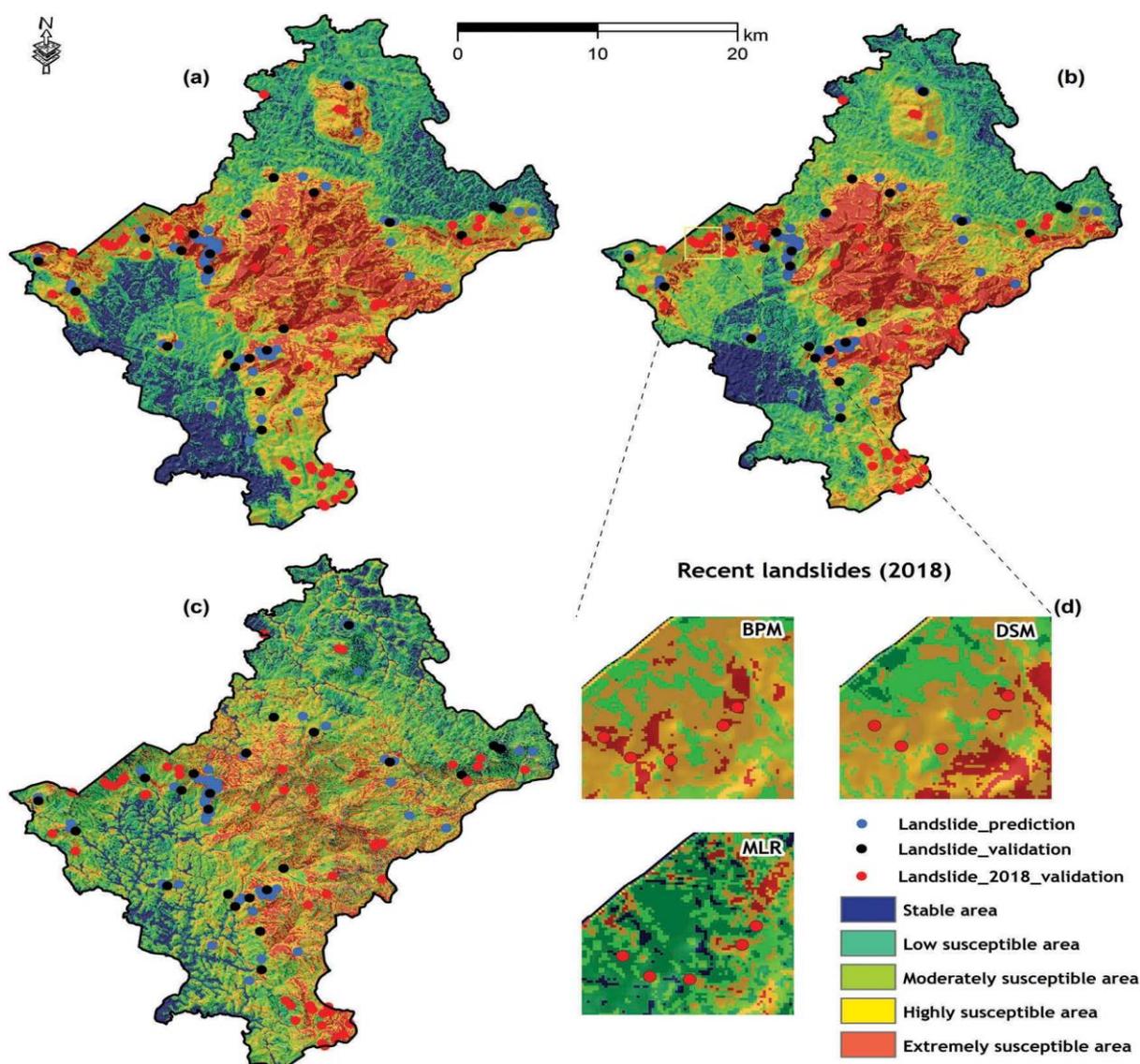


Рисунок 5.4.1. Модели восприимчивости к возникновению оползней для региона Гатт Штата Кералы, Индия, с использованием а) весомости признаков, б) теории Дампстера-Шафера и в) логистической регрессии [33]

Карта восприимчивости к возникновению оползней района Гатт позволяет сделать вывод, что данная методика наряду с другими методами даёт положительные результаты. Из рисунка 5.4.1 видно, что большинство оползневых явлений попадают в зоны с высокой восприимчивостью.

В этом методе положительные и отрицательные веса присваиваются каждому пикселю карт факторов оползнеобразования, которые, согласно работе [56], определяются следующими уравнениями:

$$W_i^+ = \log_e \frac{P\{B_i / S\}}{P\{B_i / \bar{S}\}} \quad (5.4.1)$$

$$W_i^- = \log_e \frac{P\{\bar{B}_i / S\}}{P\{\bar{B}_i / \bar{S}\}} \quad (5.4.2)$$

Где:  $B_i$  - наличие потенциального фактора, обуславливающего оползень,

$\bar{B}_i$  - отсутствие потенциального фактора, обуславливающего оползень,

$S$  - наличие оползня,

$\bar{S}$  - отсутствие оползня.

Метод выполняется с использованием независимых карт процессообразующих факторов, которые содержат только два класса, представляющих наличие или отсутствие фактора.

$W_i^+$  указывает на важность присутствия фактора при возникновении оползней. Если  $W_i^+$  имеет позитивное значение, то наличие фактора благоприятно для возникновения оползня, и если  $W_i^+$  имеет негативное значение, то фактор неблагоприятен.

$W_i^-$  используется для оценки важности отсутствия фактора при возникновении оползня. Когда  $W_i^-$  имеет позитивное значение, то отсутствие

фактора благоприятно при возникновении оползней, а при негативном значении – наоборот. Значительные цифры весов являются индикатором того, что фактор является весьма приемлемым при оценке восприимчивости к возникновению оползней, в то время, как значение, близкое к нулю, не имеет никакого отношения к возникновению оползней.

Основываясь на уравнениях (5.4.1) и (5.4.2), для практического применения уравнения весомости признаков пишутся следующим образом:

$$W_i^+ = \log_e \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_3}{Npix_3 + Npix_4}}, \quad (5.4.3);$$

$$W_i^- = \log_e \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_4}{Npix_3 + Npix_4}}, \quad (5.4.4);$$

где:

$Npix_1 = Nslclass$

$Npix_2 = Nslide - Nslclass$

$Npix_3 = Nmap - Nslclass$

$Npix_4 = Nmap - Nslide - Nclass + Nslclass$

На таблице 5.4.1 представлены необходимые значения для подсчёта весов.

Таблица 5.4.1- Необходимые значения для подсчета весов

$Nmap$ - количество пикселей в карте
$Nslide$ - количество пикселей с оползнями в карте
$Nclass$ - количество пикселей в классе
$Nslclass$ - количество пикселей с оползнями в классе

Веса вычисляются следующим образом:

$$W^+ = \ln \left( \frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}} \right) / \left( \frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}} \right) \quad (5.4.5);$$

$$= \ln \left( \frac{N_{pix1} * (N_{pix3} + N_{pix4})}{(N_{pix1} + N_{pix2}) * N_{pix3}} \right)$$

$$W^- = \ln \left( \frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}} \right) / \left( \frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}} \right) \quad (5.4.6);$$

$$= \ln \left( \frac{N_{pix2} * (N_{pix3} + N_{pix4})}{(N_{pix1} + N_{pix2}) * N_{pix4}} \right)$$

Контрастность вычисляется следующим образом:

$$C_w = W^+ - W^- \quad (5.4.6);$$

Выявленные корреляций факторов оползнеобразования методом весомости признаков приведены на таблице 5.4.2.

Таблица 5.4.2 – Результаты взвешивания факторов оползнеобразования методом весомости признаков

<b>Крутизна склонов</b>							
<b>Класс</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W<sup>+</sup></b>	<b>W<sup>-</sup></b>	<b>C<sub>w</sub></b>
<b>0-5</b>	1474	178871	357238	5602584	-1,99	0,0536	-2,046
<b>5-10</b>	6236	174109	432324	5527498	-0,74	0,0401	-0,781
<b>10-20</b>	39216	141129	1194383	4765439	0,08	-0,0215	0,103
<b>20-30</b>	61951	118394	1684440	4275382	0,2	-0,0887	0,284
<b>30-40</b>	50861	129484	1543322	4416500	0,09	-0,0316	0,117
<b>40-50</b>	18146	162199	617395	5342427	-0,03	0,0033	-0,032
<b>&gt;50</b>	2461	177884	130720	5829102	-0,47	0,0084	-0,483
<b>Экспозиция склонов</b>							
<b>Класс</b>	<b>Npix1</b>	<b>Npix2</b>	<b>Npix3</b>	<b>Npix4</b>	<b>W<sup>+</sup></b>	<b>W<sup>-</sup></b>	<b>C<sub>w</sub></b>
<b>Ровная</b>	3	180342	74375	5885447	-6,62	0,0125	-6,633
<b>Северная</b>	21657	158688	636739	5323083	0,12	-0,0149	0,132
<b>Северо-восточная</b>	18090	162255	607892	5351930	-0,02	0,0019	-0,019
<b>Восточная</b>	29117	151228	759148	5200674	0,24	-0,0398	0,277
<b>Юго-восточная</b>	33710	146635	896083	5063739	0,22	-0,044	0,262
<b>Южная</b>	24116	156229	794475	5165347	0	-0,0005	0,004
<b>Юго-западная</b>	14166	166179	703461	5256361	-0,41	0,0438	-0,451
<b>Западная</b>	18260	162085	769445	5190377	-0,24	0,0315	-0,275
<b>Северо-западная</b>	21226	159119	718204	5241618	-0,02	0,0032	-0,027
<b>Высотная зональность</b>							

Продолжение Таблица 5.4.2

Класс	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C <sub>w</sub>
<b>452-1000</b>	19399	160946	631369	5328453	0,02	-0,0018	0,017
<b>1000-1500</b>	51034	129311	1135566	4824256	0,4	-0,1213	0,517
<b>1500-2000</b>	60572	119773	1144773	4815049	0,56	-0,196	0,755
<b>2000-2500</b>	34725	145620	887205	5072617	0,26	-0,0527	0,31
<b>2500-3000</b>	12071	168274	721318	5238504	-0,59	0,0597	-0,652
<b>300-3500</b>	2186	178159	661134	5298688	-2,21	0,1054	-2,319
<b>3500-4000</b>	358	179987	623566	5336256	-3,96	0,1085	-4,073
<b>4000-4500</b>	0	180345	144205	5815617	0	0,0245	0
<b>4500-5196</b>	0	180345	10686	5949136	0	0,0018	0
<b>Спектральное ускорение грунтов</b>							
Класс	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C <sub>w</sub>
<b>0.90-0.96</b>	19625	160281	1063591	4899707	-0,49	0,0809	-0,573
<b>0.96-1.002</b>	66006	113900	2479879	3483419	-0,13	0,0805	-0,206
<b>1.002-1.04</b>	94275	85631	2419828	3543470	0,26	-0,2219	0,478
<b>Атмосферные осадки мм/год</b>							
Класс	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C <sub>w</sub>
<b>341-400</b>	0	179841	44875	5923850	0	0,0075	-0,008
<b>400-500</b>	3791	176050	183046	5785679	-0,37	0,0098	-0,385
<b>500-600</b>	18932	160909	386734	5581991	0,49	-0,0442	0,53
<b>600-700</b>	80967	98874	1726411	4242314	0,44	-0,2568	0,699
<b>700-800</b>	65363	114478	1715292	4253433	0,23	-0,1129	0,348
<b>800-900</b>	10136	169705	1116558	4852167	-1,2	0,1491	-1,349
<b>900-1000</b>	652	179189	683795	5284930	-3,45	0,118	-3,571
<b>1000-1100</b>	0	179841	112014	5856711	0	0,0189	0
<b>Топографический индекс влажности</b>							
Класс	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C <sub>w</sub>
<b>1,4-2,3</b>	1	180344	116	7106704	-1,08	0	-1,08
<b>2,3-3,1</b>	311	180034	21003	7085817	-0,539	0,001	-0,54
<b>3,1-4</b>	17585	162760	731065	6375755	-0,054	0,006	-0,059
<b>4-5,5</b>	84351	95994	3141360	3965460	0,057	-0,047	0,104
<b>&gt;5,5</b>	78096	102249	3213276	3893544	-0,043	0,034	-0,077
<b>Индекс мощности потока</b>							

Продолжение Таблица 5.4.2

Класс	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C <sub>w</sub>
<b>0-6</b>	48541	131804	2325790	4781029	-0,2	0,0828	-0,278
<b>6-12</b>	6073	174272	280714	6826105	-0,16	0,006	-0,166
<b>12-18</b>	10276	170069	390776	6716043	0,04	-0,0021	0,038
<b>18-24</b>	10263	170082	388000	6718819	0,04	-0,0024	0,044
<b>24-30</b>	8031	172314	298253	6808566	0,06	-0,0027	0,062
<b>&gt;30</b>	97160	83185	3423287	3683532	0,11	-0,1166	0,229
<b>Кривизна склонов</b>							
	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C <sub>w</sub>
<b>Вогнутая</b>	89060	90846	2863344	3099954	0,03	-0,029	0,06
<b>Ровная</b>	6598	173308	308464	5654834	-0,34	0,0157	-0,36
<b>Выпуклая</b>	84687	95219	2788014	3175284	0,01	-0,006	0,013
<b>Нормализованный вегетационный индекс</b>							
Класс	Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C <sub>w</sub>
<b>-0,39 - -0,27</b>	5	180354	2824	5957064	-2,84	0,0004	-2,839
<b>-0,27 - -0,15</b>	108	180251	30423	5929465	-2,14	0,0045	-2,147
<b>-0,15 - -0,03</b>	300	180059	667400	5292488	-4,21	0,1171	-4,327
<b>-0,03- 0,08</b>	11469	168890	506275	5453613	-0,29	0,0231	-0,313
<b>0,08 - 0,2</b>	53348	127011	1277376	4682512	0,32	-0,1095	0,432
<b>0,2 - 0,31</b>	50832	129527	1399838	4560050	0,18	-0,0633	0,246
<b>0,31 - 0,43</b>	40788	139571	1192322	4767566	0,12	-0,0332	0,156
<b>0,43- 0,55</b>	19604	160755	695099	5264789	-0,07	0,0089	-0,079
<b>0,55 - 0,67</b>	3780	176579	176408	5783480	-0,35	0,0089	-0,354
<b>0,67 - 0,79</b>	125	180234	11923	5947965	-1,06	0,0013	-1,061

Результаты взвешивания факторов оползнеобразования методом весомости признаков в виде карт представлены на рисунке 6.4.2.

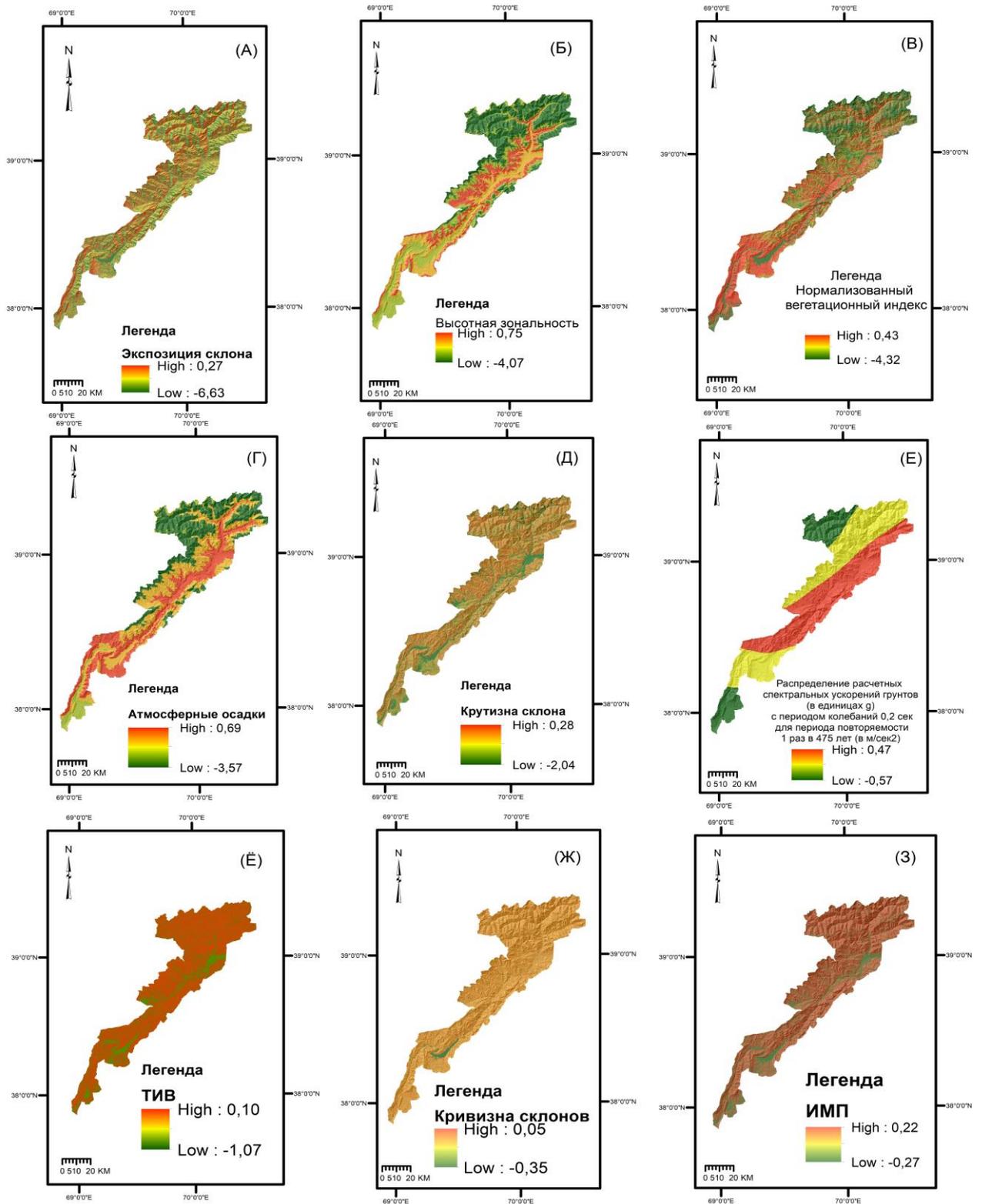


Рисунок 5.4.2. Результаты взвешивания процессообразующих факторов в виде карт (методом весомости признаков)

На рисунке 6.4.3 представлена построенная нами модель восприимчивости к возникновению оползней методом весомости признаков.

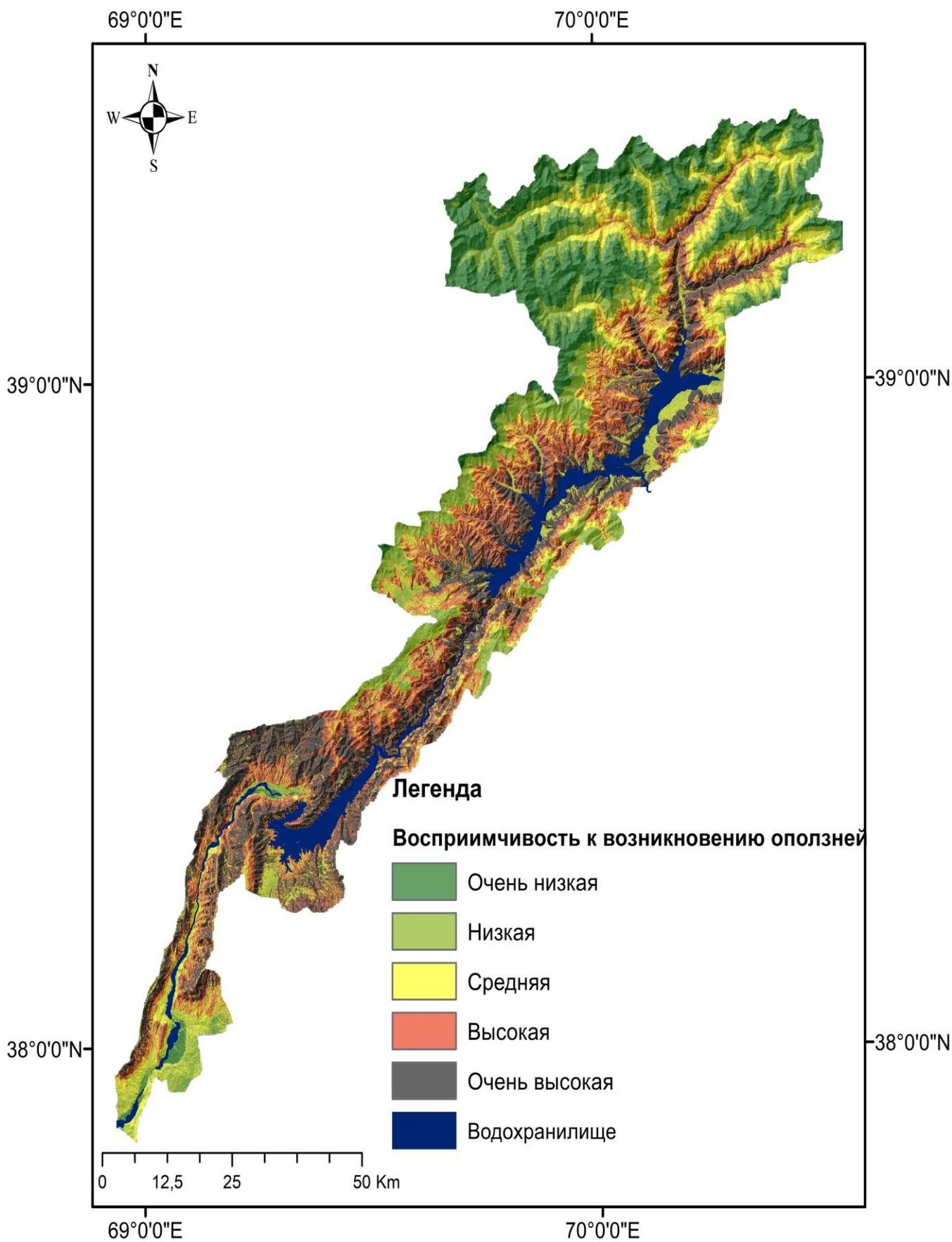


Рисунок 5.4.3. Модель восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш, построенная методом весомости признаков

## 5.5. Валидация модели восприимчивости к возникновению оползней

Оценка точности и сравнение результатов моделирования четырьмя методами для района каскада ГЭС на реке Вахш были реализованы с использованием ROC-кривой (рис.5.5.1). Результаты показали, что модель весомости признаков имеет более высокую точность, однако и другие модели имеют высокую точность и к тому же у всех моделей близкие к друг другу значения AUC, таким образом, можно сказать, что они все очень хорошо работают.

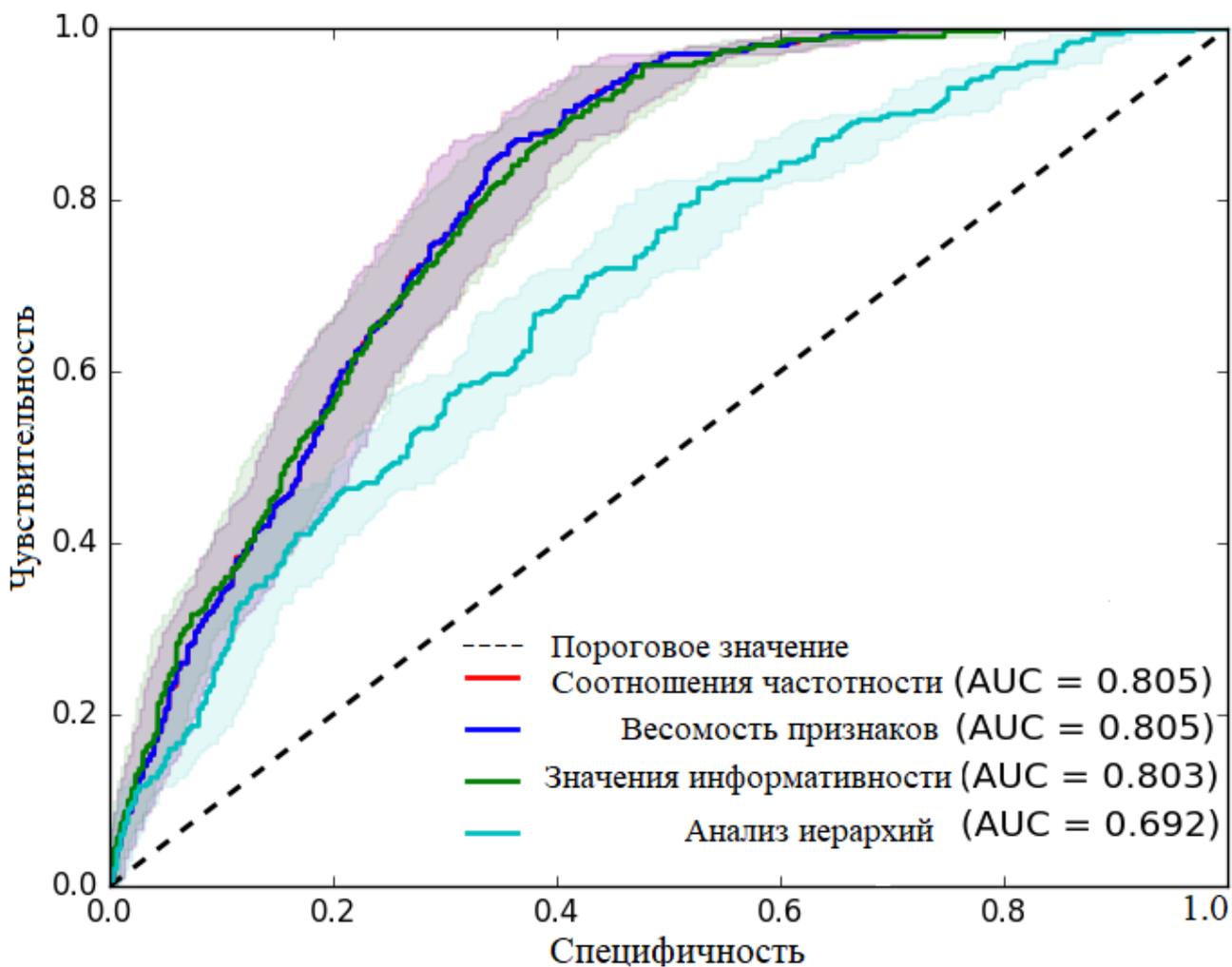


Рисунок 5.5.1. Сравнение моделей восприимчивости к возникновению оползней

Точность карт восприимчивости к возникновению оползней трудно оценить визуально. Поэтому данная процедура делается с использованием специальных методов. Самым широко используемым методом оценки точности модели восприимчивости к возникновению оползней является ROC-анализ. Оценка точности, или валидации результатов моделирования, пусть и не

111

полностью, но частично решает вопрос по точности результатов моделирования и тем самым даёт законное право для дальнейшего использования карт восприимчивости к возникновению оползней. ROC-анализ был введён для оценки точности всех четырёх моделей восприимчивости к возникновению оползней. Результаты показывают, что модели соотношения частотности и весомость признаков имеют более высокую точность в отображении восприимчивости к возникновению оползней. Значения AUC у этих моделей равны (0,805). Модель значения информативности, занимая третье место среди моделей, имеет  $AUC=0,803$ . Карта, построенная методом анализа иерархий, показывает самые низкие значения AUC (0,692), которые, согласно таблицы статистической характеристики значения AUC, имеют среднюю прогностическую способность.

#### **Выводы по пятой главе:**

Картирование восприимчивости к возникновению оползней является предварительной подготовкой к прогнозированию и предупреждению оползней. Поэтому это очень важно для предотвращения оползней и планирования землепользования. Для картирования восприимчивости к оползням района каскада ГЭС на реке Вахш в настоящей диссертационной работе были использованы методы анализа иерархий, соотношения частотности, значения информативности и весомости признаков. Для построения модели были выбраны в общей сложности 9 факторов, представляющие максимальные риски для возникновения оползней: высотная зональность, крутизна склонов, экспозиция склонов, кривизна склонов, нормализованный вегетационный индекс-NDVI, сейсмические воздействия, количество осадков, топографический индекс влажности и индекс мощности потока. Все использованные методы показали прямые зависимости проявления оползней от выбранных факторов. При визуальной оценке карт восприимчивости к возникновению оползней все имеют одинаковые прогностические способности. Исключением является карта, построенная с

помощью МАИ, результаты взвешивания факторов которой отличаются от результатов других используемых методов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Как показывает анализ международных данных, для разных регионов или разных участков местности оптимальный при использовании ЦМР являются разные разрешения это обусловлено целым рядом факторов: рельефом местности, наличием растительного покрова, обширных водных пространств и т.д. Поэтому напрашивается вывод, что для каждой конкретной местности выбор оптимального разрешения должен устанавливаться опытным путём. С этой целью нами были составлены модели с разными типами разрешения. В результате было установлено, что для территории, включающей часть долины реки Вахш с расположенными на ней ГЭС, оптимальным является разрешение, равное 30 м, а разрешение в 90м не может удовлетворять требованиям детальности.

2. В данной работе изучен вопрос о влиянии разрешения цифровой модели рельефа на постобработку самой цифровой модели рельефа. Неправильный выбор разрешения может привести к неправильной интерпретации данных, что и показывают результаты наших исследований в этом направлении. Таким образом, было выявлено, что разрешения цифровой модели рельефа влияют не только на качество карт восприимчивости к возникновению оползней, но и на постобработку самой цифровой модели рельефа. Установлено, что выбранные разрешения не оказывают негативное влияния на большинство факторов оползнеобразования, а исключительно на индекс мощности потока и топографический индекс влажности.

3. Использование количественных и полуколичественных методов выявления коррелятивов между факторами оползнеобразования и карты инвентаризации оползневых явлений дают возможность анализировать вопрос логически и статистически и дать прогноз возникновения оползней, проведя моделирование восприимчивости к возникновению оползней. Преимущество проведенных работ заключается в том, что есть возможность добавления новых

данных и тем самым усовершенствования построенных нами карт восприимчивости к возникновению оползней.

4. Несмотря на то, что в работе использованы десять факторов оползнеобразования, построенные нами модели имеют высокие результаты, что подтверждается фактическими данными при сравнении валидации карт восприимчивости к возникновению оползней и выявленных взаимоотношений между факторами оползнеобразования (крутизны склонов, экспозиции склонов, кривизны склонов, высотной зональности, индекса NDVI, атмосферных осадков, индекса мощности потока, сейсмического воздействия и топографического индекса влажности) и оползневыми явлениями. Интересно отметить, что при визуальной оценке карты, созданные с использованием количественных методов, имеют одинаковые результаты. Наиболее точная прогностическая способность модели и сравнение моделей между собой выявляется с сопоставлением конечной карты с картой инвентаризации оползней для валидации, с использованием ROC-анализа.

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

Основываясь на результатах проведенных исследований, можно дать следующие рекомендации:

1. Для моделирования восприимчивости к возникновению оползней из ЦМР открытого доступа (30 и 90 м) использовать ЦМР с разрешением 30 м. При этом с целью построения более точной ЦМР и карты земельного покрова района работ использовать снимки с более высоким пространственным разрешением, которые получают с использованием дронов, данные которых имеют 5см разрешение.

2. Из построенных нами моделей восприимчивости к возникновению оползней района каскада ГЭС на реке Вахш рекомендуется использовать модель, построенную методом соотношения частотности и весомости признаков, так как эти модели имеют относительно высокую прогностическую способность. Однако при моделировании других территорий, из-за высокой результативности и несложного алгоритма выполнении расчётов,

рекомендуется использовать метод соотношения частотности. Кроме того, построенные нами модели имеют большое практическое значение при планировании строительства новых сооружений, к тому же, принимая во внимания тот факт, что в пределах изучаемого района планируются строительство двух новых ГЭС (Шуробская и Нурекская-2), где наблюдаются зоны с очень высокой и высокой восприимчивостью к возникновению оползней, рекомендуется продолжать моделирования для территории каждой спроектированной ГЭС по отдельности с использованием высококачественных данных дистанционного зондирования и, следовательно, верификаций результатов непосредственно в полевых условиях. Такой масштаб работы даст возможность анализировать закономерности развития оползневых явлений по их типам и включать в модель дополнительные факторы.

3. Построенная нами карта инвентаризации оползневых явлений района каскада ГЭС на реке Вахш не включает в себя всю информацию об оползнях. Кроме локализаций оползней, большую ценность имеют частота и время проявления оползневых процессов, с помощью которых возможно сделать временную и частотную привязку к картам восприимчивости к возникновению оползней и тем самым создать модель оползневой опасности. Для усовершенствования исследований рекомендуется проводить мониторинг оползневых склонов и детализировать карту инвентаризации оползневых явлений района работ не только по времени и частотности, но и их типам.

## Литература

### Монографии, учебники, учебные пособия:

1. Ананьев, В.П. Инженерная геология: Учебное пособие / В.П. Ананьев, В.И. Коробкин. – М.: Издательство Высшая школа, 1973. - 215 и 224 с.
2. Варенцов М.И. Тектоника и нефтегазоносность Таджикской впадины: Учебное пособие / М.И. Варенцов, З.И. Алешина, Г.Е. Корниенко – М.: Наука, 1977. - 108с.
3. Бабаев, А.М. Новейший тектогенез зоны сочленения Гиссаро-Алая и Таджикской депрессии: учебник / Бабаев, А.М. Душанбе: Дониш 1975, 151 с.
4. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов: учебник/ Е.П. Емельянова – М.: Издательство «недра». Москва 1972. 312 с.
5. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. Санкт-Петербург. Наука 2001. - 416с.
6. 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. Стр.5.
7. Оползни и сели в двух томах. Том 1. Центр международных проектов ГКНТ. Москва 1984. 351 стр.
8. Виниченко С.М. Сейсмогенные оползни и обвали зоны сочленения южного Тянь-Шаня и Памира и их инженерно-геологическое значения: Диссертация на соискания ученой степени кандидата геолого-минералогических наук/ С.М. Виниченко – Москва,1989. 319 с.
9. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. \ Токарева О.С.\| Учебное пособие. Издательство Томского национального университета, 2010. 147стр.
10. Boyd D.S. Physical basis of remote sensing. / Boyd D.S. // School of Earth Sciences and Geography, Kingston University, U.K.

11. Pimento E. Shallow landslide susceptibility modelling and validation: A thesis submitted in partial fulfilment for the degree of Master in Geographical Information Science/ E. Pimento - 2010. 119 p.

12. Lucas L.F. Principles of remote sensing. / Lucas L.F., Janssen, G.C., Huurneman, W.H., Bakker B.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 ITC.

#### **Статьи и доклады:**

13. Кучай В.К. О статистическом отборе критериев оползневого прогнозирования Таджикистана. / Кучай В.К.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология Таджикистана», -Душанбе, 1971. - Стр. 100-108.

14. 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. -Стр 94-103. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3341>

15. Лысков Л.М. Возраст рельефа и четвертичная тектоника Северного и Центрального Таджикистана. / Лысков Л.М.// Сб.: Тектоника Тянь-Шаня и Памира. -М.: Наука.1983. - Стр.149-155.

16. Лысков Л.М. Геоморфология и новейшая тектоника района Верхнего Вахша. / Лысков Л.М.// В кн.: Неотектоника и сейсмоструктура Таджикистана. -Душанбе: Дониш,1969. -Стр.62-96.

17. Поршняков Г.С. Этапы формирования тектонических структур различных сегментов герцинид Южного Тянь-Шаня. / Поршняков Г.С.// Тектоника Тянь-Шаня и Памира.: Душанбе. Наука 1983. Стр. 66-73.

18. Преснухин В.И. Влияние крутизны склонов на развитие оползней в Таджикистане. / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология». -Душанбе, 1975. - Стр. 224-228.

19. Преснухин В.И. Влияние основных природных факторов на развитие оползней в Таджикистане. / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология», -Душанбе, 1975. -Стр. 209-223.

20. 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. -Стр. 87-99.

21. 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. - Стр. 94-99.

22. 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. -Стр. 169-177.

23. Преснухин В.И. Роль сейсмических воздействий при оползневых явлениях. / Преснухин В.И.// Сб. «гидрогеология и инженерная геология» - Душанбе 1972. -Стр. 239-253.

24. 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.

25. 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. -Стр. 239-253

26. 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. -Стр. 184-190.

27. 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. -Стр. 99-109.

28. 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. -Стр. 231-235.

29. 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. -Стр.163-175.

30. Шварц А.В. Строения и динамика Куккутальского оползня. / Шварц А.В., Ишук Н.Р.// Геология и вопросы сейсмичности территории Таджикистана. -Душанбе, 2013. -Стр. 170-186.

#### **Электронные источники [Электронный ресурс]**

31. 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

32. 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>

33. 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

34. 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

35. 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
36. 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
37. 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.
38. 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
39. 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
40. 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.
41. 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
42. 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

43. 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>

44. 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>

45. 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>

46. 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

47. 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>

48. 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

49. 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>.

50. 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

51. 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>

52. Eastman, J.R. *Guide to GIS and Image Processing*. / Eastman, J.R.// 14, 239-247. Clark University Manual, USA (2003).

53. 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>

54. 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>

55. Foody G.M. Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment. \ Foody G.M.// *Remote Sensing of Environment* 80. Pp. 185-201, (2001).

56. 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>

57. Ghimire, G. Landslide Distribution and Processes in the Hills of Central Nepal: Geomorphic and Statistical Approach to Susceptibility Assessment. / Ghimire, G., Timalisina, N.// *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 276-302. (2020). <https://doi.org/10.4236/gep.2020.812017>

58. 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>

59. 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
60. 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.
61. 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>
62. 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
63. 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
64. 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>
65. 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
66. 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

67. 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>

68. 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>

69. 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>

70. 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>

71. 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

72. 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>

73. 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

74. 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
75. 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
76. 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
77. 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
78. 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>
79. 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.
80. Moradi M. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping by AHP Method, A Case Study, Dena City, Iran. / Moradi M., Baziyar M.H., Mohammadi Z.// Basic. Appl. Sci. Res., 2(7)6715-6723. 2012.
81. 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

82. 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

83. 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

84. 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>

85. 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

86. 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

87. 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.

88. 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

89. 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
90. 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
91. 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
92. 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
93. 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
94. 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
95. 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

96. 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

97. 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

98. 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>

99. 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>

100. 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

101. 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

102. 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>

103. 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

104. 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.

105. 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>

106. Trigila, A. Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). / Trigila A., Iadanza, C., Esposito, C., Scarascia-Mugnozza, G.// Geomorphology. (2015). doi: 10.1016/j.geomorph.2015.06.001

107. 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

108. 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

109. 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

110. 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.

111. 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

112. 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

113. 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.

114. 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

#### **Фондовая**

115. Геологические критерий сейсмичности Душанбе-Вахшского района. Отчёт. 1990г. Фонды ИГССС.

116. Ишук А.Р. Оценка устойчивости склонов при сильных землетрясениях в связи с безопасностью каскада ГЭС на р. Вахш. / Ишук А.Р., Шварц А.В., Ишук Н.Р., Ильясова З.Г., Муродкулов Ш.Е // Отчет научно-исследовательской работе. Душанбе 2015 г.

## ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

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

[1-А] Файзуллоев Ш.А. Исследования зон возможного развития экзогенных геологических процессов при сейсмических явлениях на территории Лахшского района в Таджикистане. [Текст] / 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. – 2020. - №1. - С. 101-107.

[2-А] Файзуллоев Ш.А. Оценка точности классификации данных дистанционного зондирования в ГИС-технологии на примере района каскада ГЭС на реке Вахш. [Текст] / Файзуллоев Ш.А.// Известия Академии наук Таджикистана. - 2020. - №1 (178). - С. 96-103.

[3-А] Файзуллоев Ш.А. Проблема выбора пространственного разрешения цифровой модели рельефа при моделированиях восприимчивости к возникновению оползням. [Текст] / Файзуллоев Ш.А.// Наука и инновация, таджикский национальный университет серия геологических и технических наук. – 2020. - №3. - С. 34-43.

[4-А] Файзуллоев Ш.А. Прогноз возникновения неглубоких оползней района каскада ГЭС на реке Вахш. [Текст]/ 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. - 2020. - №2. - С. 38-43.

[5-А] Файзуллоев Ш.А. Моделирования восприимчивости к оползням района каскада ГЭС на реке Вахш с использованием метода анализа иерархий в ГИС-технологий. [Текст] /Файзуллоев Ш.А., Байгенов Д.Ф., Аламов Б.А., Олимов.

Ш.А., Ёкубов Ш.А.// Известия Академии наук Таджикистана. – 2020. - №4 (181). - С. 121-128.

[6-А] Файзуллоев Ш.А. 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.

[7-А] Shohnavaz, F. 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.

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

[8-А] Файзуллоев Ш.А. Неоднородности геологического строения мезокайнозойских межгорных прогибов Тяньшань-Памирского региона на примере Афгано-таджикской депрессии. [Текст] / Минаев В.Е., Гадоев М.Л., Оймухаммадзода И.С., Файзуллоев Ш.А., Каримов А.М., Сайдалиев И.М.// Труды института геологии сейсмостойкого строительства и сейсмологии. – 2019. -выпуск 2. - С. 12-17.

[9-А] Файзуллоев Ш.А. 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 2022г. – 2022. - С.214-219.

[10-А] Файзуллоев Ш.А. Моделирование восприимчивости к возникновению оползней методом соотношения частотности в Лахшском районе. [Текст] / Файзуллоев Ш.А.// Труды института геологии сейсмостойкого строительства и сейсмологии. – 2021. - выпуск 4. - С. 226-233.

[11-А] Файзуллоев Ш.А. Корреляционный анализ некоторых факторов оползнеобразования среднего и верхнего течения р.Вахш. [Текст] /Файзуллоев Ш.А.//Труды института геологии сейсмостойкого строительства и сейсмологии. – 2021. - выпуск 4. - С. 234-243.