



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**Высшего образования**

**«Российский государственный геологоразведочный университет**

**имени Серго Орджоникидзе»**

**(МГРИ)**

**на правах рукописи**

**ЗЫОНГ ВАН БИНЬ**

**ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ИЕРАРХИЧЕСКОГО УРОВНЯ**

Специальность 1.6.7 - инженерная геология,  
мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель  
Доктор геолого-минералогических наук  
Фоменко И.К.

Москва, 2023 г.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1 НАУЧНО-ПОНЯТИЙНАЯ БАЗА ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ</b> .....	12
1.1 Определение оползневого процесса .....	12
1.2 Основные типы гравитационных процессов .....	16
1.3 Факторы, определяющие развитие оползневого процесса .....	24
1.4 Оползневая опасность .....	28
1.5 Иерархическая система оценки оползневой опасности .....	32
1.6 История изучения оползневого процесса во Вьетнаме .....	36
<b>Выводы</b> .....	44
<b>ГЛАВА 2 УСЛОВИЯ И ПРИЧИНЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЗВИТИЕ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА В РАЙОНЕ ШАПА</b> .....	46
2.1 Климатические условия .....	47
2.2 Гидрография.....	49
2.3 Геоморфологические условия .....	50
2.4 Растительный покров .....	54
2.5 Техногенное воздействие.....	56
2.6 Особенности геологического строения и структурно-тектонические особенности .....	57
2.7 Сейсмическая активность .....	61
2.8 Особенности гидрогеологических условий .....	63
2.9 Современные экзогенные процессы в районе исследования.....	65
<b>Выводы</b> .....	71

ГЛАВА 3	МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ .....	74
3.1	Общие положения.....	74
3.2	Качественные подходы .....	80
3.3	Полуколичественные подходы.....	81
3.4	Количественные подходы.....	82
	<b>Выводы</b> .....	87
ГЛАВА 4	ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПТС РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ (РАЙОН ШАПА ПРОВИНЦИИ ЛАОКАЙ) .....	89
4.1	Региональная оценка оползневой опасности в районе Шапа .....	89
4.2	Влияние разрешения цифровой модели на оценку оползневой опасности (на основе моделирования оползневой опасности методом МАНР) .....	105
4.3	Влияние метода исследований и набора факторов оползнеобразования на оценку оползневой опасности.....	111
	<b>Выводы</b> .....	114
ГЛАВА 5	ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПТС ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ (КОММУНА ЧУНГЧАЙ РАЙОНА ШАПА) .....	117
5.1	Метод исследования.....	119
5.2	Исходные данные .....	122
5.3	Результаты исследования.....	129
	<b>Выводы</b> .....	148
ГЛАВА 6	ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПТС ЭЛЕМЕНТАРНОГО УРОВНЯ (ОПОЛЗНЕВОЙ СКЛОН В КОММУНЕ ЧУНГЧАЙ) .....	150
6.1	Методы исследования .....	151
6.2	Построение геотехнической модели. Исходные данные .....	162
6.3	Результаты исследования.....	167

<b>Выводы</b> .....	186
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	190
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	196

## ВВЕДЕНИЕ

Оползни являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий в мире, приводящих к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам [141]. Согласно исследованию Хака [114], выполненному на основе данных из 128 стран за два десятилетия (1995–2014 гг.), в результате 3876 оползней во всем мире, погибло 163658 человек и 11689 человек получили ранения. Общее число оползней со смертельным исходом, в период с 2004 по 2016 гг. (включительно), составило 4862 человек, исключая случаи, вызванные землетрясениями, и большинство оползней произошло в Азии (75%) [103]. Во Вьетнаме, особенно в северных горных провинциях, оползни так же часто приводили к значительным человеческим жертвам и материальным потерям.

Расположенный на восточной окраине материковой части Юго-Восточной Азии, Вьетнам считается одной из наиболее динамично развивающихся стран в мире. Три четверти его территории занимают горные регионы. Из-за тропического муссонного климата количество выпадающих во Вьетнаме осадков чрезвычайно велико и составляет от 3500 мм до 4500 мм в год. В таких условиях оползни, особенно в сезон дождей, значительно влияют на социально-экономическое развитие страны. Ежегодный ущерб от оползневых процессов во Вьетнаме оценивается в 100 миллионов долларов США [190].

Лаокай – одна из провинций на северо-западе Вьетнама с высокой оползневой опасностью. Поскольку 75% территории относится к горной местности, его устойчивое развитие поставлено под угрозу из-за воздействия многочисленных стихийных бедствий.

Среди районов провинции Лаокай район Шапа подвергся наибольшему разрушительному воздействию оползневых процессов. Существенные экономические и социальные потери, связанные с активизацией оползневых процессов, привели к пониманию необходимости их системного изучения.

Работа выполнялась автором, начиная с 2020 года, на кафедре инженерной геологии МГРИ им. Серго Орджоникидзе, научным руководителем работы

является доктор геолого-минералогических наук, Фоменко И. К.

**Актуальность диссертационной работы** объясняется тем, что системная оценка оползневой опасности является важнейшим компонентом стратегии Вьетнама по предотвращению стихийных бедствий.

### **Степень разработанности**

За последние годы в разных странах и разными исследователями были разработаны новые методы комплексного анализа природно-технических систем (ПТС) с целью прогнозирования развития оползней. Однако до настоящего времени не создано методологии оценки оползневой опасности, которая была бы признана как наиболее эффективная. Возникновение оползней является результатом взаимодействия между естественными и техногенными факторами, образующими природно-техническую систему. Для построения достоверной модели прогнозирования необходимо определить строение, состояние и динамику ПТС с учетом ее иерархического уровня.

**Целью диссертационной работы** является разработка комплексной методологии оценки оползневой опасности природно-технических систем различного иерархического уровня на примере района Шапа провинции Лаокай северного Вьетнама.

### **Основные задачи исследований:**

1. Определить научно-понятийную базу оценки оползневой опасности.
2. Оценить состояние исследований оползневого процесса во Вьетнаме.
3. Выполнить анализ основных факторов оползнеобразования на исследуемой территории.
4. Проанализировать существующие в мире методы и подходы оценки оползневой опасности.
5. Апробировать методику оценки оползневой опасности ПТС регионального уровня.
6. Апробировать методику оценки оползневой опасности ПТС локального уровня.
7. Апробировать методику оценки оползневой опасности ПТС элементарного

уровня.

**Объектом исследования** является оползневая опасность района Шапа, провинции Лаокай (Вьетнам).

### **Фактический материал**

В качестве исходных данных были использованы материалы дистанционного зондирования района исследований в сочетании с материалами традиционных полевых работ, полученные автором в процессе выполнения национального научно-технического проекта (код ĐТĐL.CN-81/21), при поддержке Института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, а также Вьетнамского института геонаук и минеральных ресурсов.

### **Личный вклад**

Автор принимал непосредственное участие в полевых работах, дешифрировании данных дистанционного зондирования, картировании и инвентаризации оползней, определении и анализе факторов оползнеобразования с оценкой их значимости. Лично автором построены все модели и выполнен комплексный анализ оценки оползневой опасности на региональном, локальном и элементарном уровне организации ПТС.

### **Научная и методическая новизна работы:**

1. Определена значимость основных факторов оползнеобразования на развитие оползневого процесса.
2. Разработан и апробирован алгоритм поэтапной оценки оползневой опасности с учетом уровня иерархии ПТС.
3. Модернизирована классификационная схема методов оценки оползневой опасности.
4. Доказана большая достоверность количественных статистических методов в сравнении с полуколичественным мультикритериальным подходом при оценке оползневой опасности.
5. Выявлено влияние разрешающей способности цифровой модели рельефа и корректности выбора факторов оползнеобразования на результаты оценки оползневой опасности.

6. Впервые (на примере оценки оползневой опасности коммуны Чунгчай) удалось оценить динамику изменение площади неустойчивой (оползнеопасной) зоны в зависимости от длительности ливневых осадков, в том числе с учетом интенсивности сейсмического воздействия.

7. Продемонстрирована целесообразность выполнения вероятностного анализа и определение индекса надежности при оценке оползневой опасности ПТС элементарного уровня.

8. Оценена значимость влияния на результаты моделирования устойчивости численным методом плотности конечноэлементной сетки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработанная автором поэтапная процедура оценки оползневой опасности с учетом иерархии ПТС доказала свою эффективность и может стать основой при разработке системы раннего предупреждения района Шапа провинции Лаокай. Результаты, полученные в процессе работы над диссертацией, могут быть использованы для оценки оползневой опасности в других горных районах Вьетнама, а также при разработке планов комплексного освоения района Шапа провинции Лаокай.

Таким образом, результаты диссертационной работы представляют теоретическую значимость, а также имеют практический выход в связи с активным инженерно-хозяйственным освоением горных районов Вьетнама. Кроме того, предложенные научно-методологические принципы оценки оползневой опасности могут быть использованы в учебных и научно-исследовательских целях.

### **Методы исследования**

Методы исследования включают анализ и обобщение общемирового опыта оценки оползневой опасности, а также применение современных программных продуктов и методик для решения поставленных задач. При оценке оползневой опасности ПТС регионального уровня были использованы современные методы статистического и мультикритериального анализа на основе геоинформационной системы ArcGIS. При оценке оползневой опасности ПТС локального уровня были использованы программные комплексы Scoops3D и ArcGIS. Математическое

моделирование при оценке оползневой опасности на элементарном уровне было выполнено методами предельного равновесия и конечных элементов в плоской и объемной постановке задачи посредством расчёта устойчивости склона с использованием программного комплекса Rocscience (Slide 2, Slide 3, RS 2, RS 3).

### **Защищаемые положения**

1. Эффективный подход к оценке оползневой опасности должен базироваться на комплексном применении современных методов, основанных на разных принципах, с учетом уровня иерархии ПТС, в том числе: состава и значимости учитываемых факторов, качества и типа исходной информации, а также допустимом уровне достоверности результатов исследования.

2. В основе оценки оползневой опасности на региональном уровне иерархии ПТС лежит специальное районирование территории, характеризующее распространение оползней или условия их проявления. Оптимальным подходом для решения этой задачи является применение методов с использованием ГИС, базирующихся на совместном анализе результатов комплекса количественных статистических методов с обязательной валидацией моделей путем сравнения полученных карт оползневой опасности с картой инвентаризации оползней.

3. В основе оценки оползневой опасности на локальном уровне иерархии ПТС лежит детальное районирование территории, характеризующее устойчивость оползневых склонов с количественной оценкой влияния основных факторов оползнеобразования. Оптимальным подходом для решения этой задачи является применение детерминистического подхода, основанного на вычислении коэффициента устойчивости с последующим анализом результатов в геоинформационной системе.

4. В основе оценки оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС лежит математическое моделирование, с учетом механизма оползневого процесса и количественной оценкой влияния факторов оползнеобразования. Оптимальным подходом для решения этой задачи является комплексное применение геотехнических методов (методов предельного равновесия в сочетании с численными методами), дополненных вероятностным

анализом.

**Достоверность научных положений и выводов** обосновывается высоким качеством исходной геологической информации об объекте исследований, строгостью исходных построений, используемых при решении поставленных задач, а также применением современных методов моделирования.

### **Научная апробация и публикации**

Основные результаты настоящей работы были представлены на следующих конференциях:

- XV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». (Москва, 01–02 апреля 2021 г.). Тема доклада: Анализ влияния изменения порового давления в период ливневых осадков на устойчивость склона (на примере оползня в микрорайоне Као Тханг города Халонг, Вьетнам).

- X Международная научная конференция молодых ученых «Молодые - Наукам о Земле» (Москва, 31 марта – 1 апреля 2022 г.). Тема доклада: Оценка оползневой восприимчивости в районе Батсат провинции Лаокай с применением метода соотношения частот.

- 7-я международная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике и географии-2022» (Севастополь, 06–08 июля 2022г.). Тема доклада: Анализ устойчивости склона под воздействием осадков с использованием метода конечных элементов: на примере коммуны Чунгчай (Шапа, Вьетнам).

- GЕoS 2022: I Ежегодная международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы геологии и геофизики в системе современного естественно-научного знания» (Москва, 10 марта 2022 г.). Тема доклада: Оценка подверженности оползням на основе ГИС в городе Лаокай, Вьетнам, с использованием метода многомерной логистической регрессии.

- Earth Sciences and Natural Resources for Sustainable Development (Ханой, 11 ноября 2022г.). Тема доклада: Earthquake-induced landslide hazard assessment in Trung Chai commune, Sapa, Vietnam using a deterministic method.

- Международная конференция ICL-KLC 2022 (Киото, 22–25 ноября 2022 г.). Тема доклада: Mathematical modeling of slope stability for the Mong Sen landslide

event in the Trung Chai commune, Sapa, Vietnam.

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 6 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России или входящие в международные наукометрические базы «Scopus» и «Web of Science».

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, она содержит 218 страницы текста, сопровождается 34 таблицами, 118 рисунками и списком литературы из 219 наименований.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, д.г.-м.н., Фоменко И.К., который поддерживал автора на протяжении всего процесса работы над диссертацией. Правильная ориентация и полезные идеи научного руководителя помогли автору сформулировать научные взгляды, выбрать соответствующее направление исследований, разработать методологию для решения поставленных задач и предложить направления будущих исследований. Автор выражает благодарность д.г.-м.н., профессору кафедры инженерной геологии МГРИ Ярг Л.А. за ценные комментарии при завершении диссертации. Также автор хотел бы поблагодарить старшего научного сотрудника кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ Сироткину О.Н., за поддержку в завершении диссертации. Кроме того, автор хотел бы поблагодарить весь профессорско-преподавательский состав кафедры инженерной геологии МГРИ за их ценные замечания при завершении работы. Автор также благодарен Институту геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий и Вьетнамскому институту геонаук и минеральных ресурсов за их помощь в сборе материалов, легших в основу выполненных исследований. Наконец, автор выражает благодарность своей жене и всей семье за их поддержку в процессе работы над диссертацией.

# ГЛАВА 1 НАУЧНО-ПОНЯТИЙНАЯ БАЗА ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ

## 1.1 Определение оползневой опасности

Для получения полного представления об оползневом процессе необходим синтез различных знаний. Без всестороннего понимания причин развития оползней прогноз оползневой опасности невозможен. Это обстоятельство подсказывает необходимость выделения специального научного направления – оползневедения [14].

**Объектом исследования при оценке оползневой опасности** является оползневой процесс или оползень.

Для начала необходимо провести различие между понятиями «склон» и «откос». По Емельяновой Е. П. склоном является наклонный участок поверхности литосферы, формирующийся под действием рельефообразующих процессов [14]. Характер склонов определяется составом и залеганием слагающих пород, абсолютными и относительными отметками местности и характером склоновых процессов. Существует зависимость склоновых процессов от климата, экспозиции склона, растительности и других компонентов природной среды.

Рисунок 1.1 показывает простой склон, который состоит из собственно склона (BC), бровки склона (B), подошвы склона (C) и его подножия (CD) [14, 48].

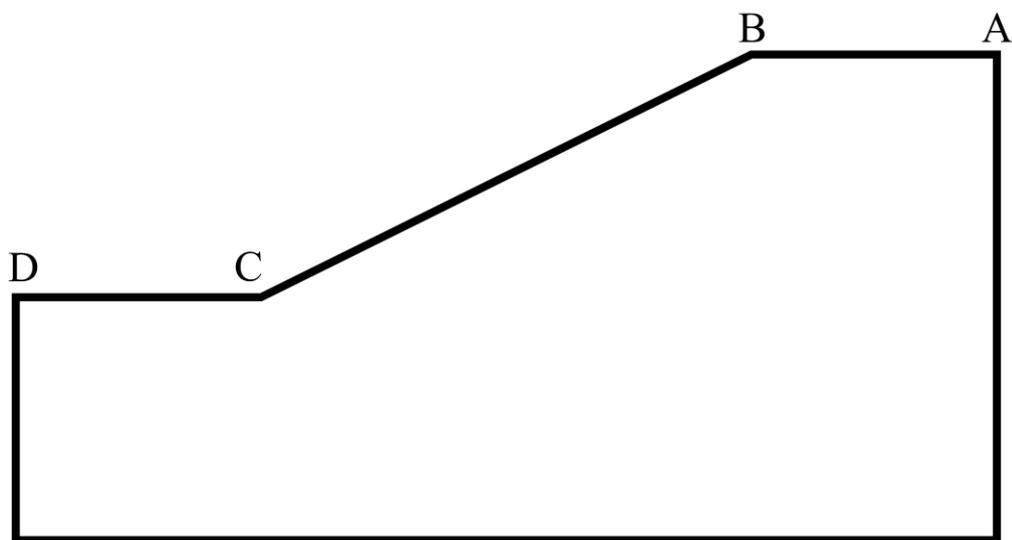


Рисунок 1.1 – Схема профиля простого склона по Емельяновой Е.П.

Для оценки степени устойчивости, согласно Маслову Н.Н. [33] все склоны могут быть разделены на три группы: склоны сноса, склоны обрушения (в частности склоны подмыва) и склоны накопления.

Откосом называется искусственная поверхность, ограничивающая природный грунтовый массив. Откосы формируются при строительстве различных насыпей (дорожное полотно, дамбы, земляные плотины и т.д.), выемок (котлованы, каналы, карьеры и т.п.) или при перепрофилировании территории [48].

Оползневый процесс является экзогенным гравитационным геологическим процессом. По Бондарику Г. К. [4] экзогенный геологический процесс представляет собой движение приповерхностной геосистемы в физическом времени, обусловленное её взаимодействием с внешними средами или между элементами литосистемы. Главным фактором развития гравитационных процессов является сила тяжести.

В соответствии с И. В. Поповым [52] теорию оползневых процессов можно определить как систему основных законов и закономерностей, определяющих их физическую сущность, возможность и условия возникновения, этапов активизации и затухания (протекание процесса во времени) в зависимости от взаимодействия с окружающей средой.

В настоящее время существует множество определений оползневого процесса (Таблица 1.1) [48].

*Таблица 1.1 – Определения оползневого процесса*

Автор, источник	Определение оползня
Погребов Н. Ф., 1935 [51]	Движение масс горных пород вниз по склону под действием силы тяжести, часто при участии поверхностных и подземных вод
Попов И. В., 1959, с. 124 [52]	Скользящее смещение горных пород, слагающих склон, под действием их веса
Емельянова Е. П., 1972, с. 55, 57 [14]	Как процесс, «это смещение на более низкий уровень части горных пород, слагающих склон (а иногда также его основание, подножие и территорию за его бровкой) в виде скользющего движения, в основном без потери контакта между движущимися и неподвижными породами». Горные породы, оползающие в рассматриваемый момент или

	периодически, также называют оползнем
Геологический словарь, 1973, т. 2, с. 33 [1]	Отрыв земляных масс и перемещение их по склону под влиянием силы тяжести
Бранэден Д., 1973, с. 45	Термин «оползень» обычно означает движение вниз по склону рыхлых или скальных масс, которое происходит в основном в результате образования трещин отрыва на границах движущейся массы. Эти движения включают, как механизм оползания, так и механизм течения
Ломтадзе В. Д., 1977, с. 245 [31]	Оползнем следует называть массу горных пород, сползшую или сползающую вниз по склону или откосу (искусственный склон) под влиянием силы тяжести, гидродинамического давления, сейсмичности и некоторых других сил. Оползень есть результат геологического оползневого процесса, проявляющегося в вертикальном и горизонтальном смещениях масс горных пород вследствие нарушения их устойчивости – равновесия
Белый Л. Д., Попов В. В., 1975 [3]	Под оползнем в общем смысле понимают смещение земляных масс по склону, причем различной морфологии, строения и динамики
Варнс Д., 1981, с. 32 [8]	По существу, оползень представляет собой совокупность склоновых движений масс пород, в процессе которых происходит разрушение и сдвиг вдоль одной или нескольких характерных поверхностей. Термин «оползень» широко применяется и будет, несомненно, использоваться в дальнейшем как общее понятие почти для всех видов склоновых процессов, включая и те движения, в которых мало скольжения или вообще его нет
Сергеев Е. М., 1978, с. 223 [56]	В общем представлении оползень – это скользящее смещение горных пород на склонах под действием силы тяжести при участии поверхностных или подземных вод
Кюнтцель В. В., 1980, с. 15 [27]	Целесообразно под оползнем понимать часть геологической среды, ограниченной земной поверхностью и поверхностью смещения, по которой без потери контакта с неподвижным основанием происходит ее перемещение на новый, как правило, более низкий гипсометрический уровень. Тогда под оползневым процессом следует понимать последовательное изменение состава, состояния и свойств оползня с момента его зарождения и перемещения на другой уровень,

	вплоть до полного затухания, проявляющееся в деформациях, слагающих его горных пород
Инженерно-геологические изыскания, 1980, с. 191	Смещение горных пород, слагающих склон, представляющее собой скользящее движение вследствие механического разрушения или течения пород склона или его основания без потери контакта между смещающейся и неподвижной частью склона
Золотарев Г. С., 1983, с. 197-198 [17]	Оползнями называются такие смещения на склонах горных пород разного состава, сложения и объёмов, в которых преобладает механизм скольжения их по имеющейся или формируемой в процессе движения поверхности или зоне, когда сдвигающие усилия больше прочности пород
Петров Н. Ф., 1988, с. 28 [49]	Оползень – это процесс отделения и смещения части горных пород, слагающих склон (откос), с образованием стенки отрыва и сохранением материальной связи со средой
Григоренко А. Г., 1992, с. 48 [11]	Оползень или оползневый процесс – смещение части горных пород (грунтов) под влиянием прежде всего силы тяжести на более низкий гипсометрический уровень при сохранении контакта с неподвижным основанием. Нередко под термином «оползень» также понимают оползневое тело, т.е. геологическое тело, которое сформировано в оползневом процессе и ограничено снизу поверхностью или зоной смещения, а сверху земной поверхностью
Опасные экзогенные процессы, 1999, с. 99. [47]	Под гравитационными склоновыми процессами (ГСП) понимают денудационно-аккумулятивные экзогенные геологические процессы на естественных склонах и искусственных откосах, проявляющиеся в виде смещенного грунтового материала на более низкие гипсометрические уровни под действием силы тяжести без существенного влияния каких-либо транспортирующих агентов
Иванов И. П., Тржцинский Ю. Б., 2001, с. 263 [24]	Оползневые явления (оползни) – движение больших масс горных пород вниз со склона или откоса по поверхности (или поверхностям) скольжения под влиянием различных гравитационных сил (веса пород, давления воды, сейсмического воздействия, техногенной нагрузки)

Таблица 1.1 показывает что существуют различные взгляды на понятие «оползневой процесс», однако в большинстве определений общими являются следующие позиции [48]:

- оползневым процессом называется смещение масс горных пород вниз по склону;
- основной движущей силой является вес смещающихся пород;
- движение оползневых масс по склону происходит в виде скольжения или, в отдельных случаях, течения;
- смещение скользящей массы происходит без потери контакта с неподвижным основанием.

Синонимами термина «оползень» являются «массовое движение земляных масс», «разрушение склона» и т.д. Они часто используются для описания всех типов и размеров оползней. Рисунок 1.2 иллюстрирует положение основных элементов оползня [117].



Рисунок 1.2 – Основные элементы оползня

## 1.2 Основные типы гравитационных процессов

Оползни весьма разнообразны по размерам, строению, причинам образования и условиям, способствующим их возникновению и развитию, механизму, динамике процесса и др. В настоящее время существует большое количество различных классификаций оползневых процессов. В отличие от Российской практики классификации оползневых процессов, в мировой практике оползни рассматриваются в единой классификации гравитационных процессов. На

основе исследований разных авторов [93, 117, 210], гравитационные процессы можно разделить на следующие базовые типы (Рисунок 1.3):

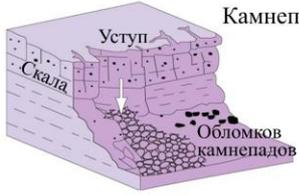
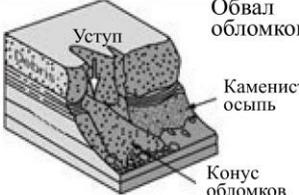
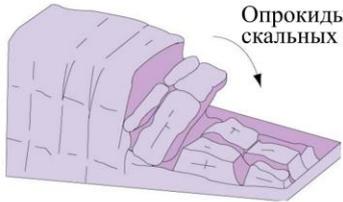
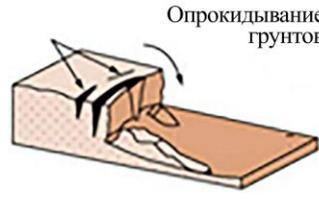
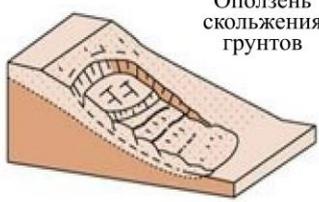
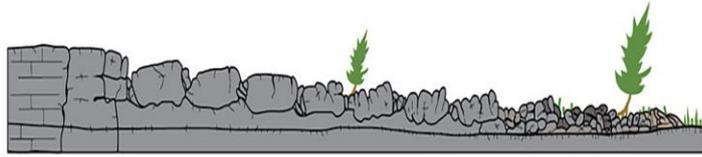
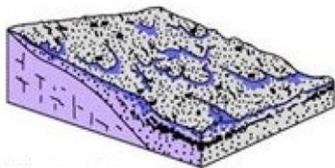
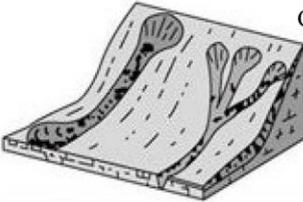
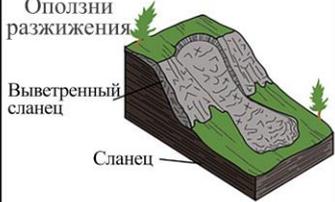
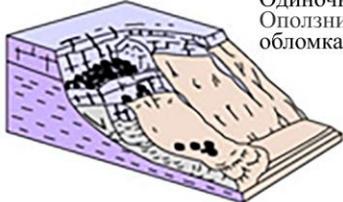
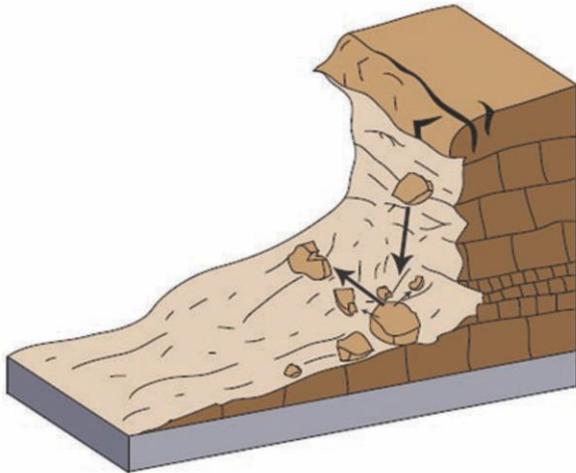
Материал		СКАЛЬНЫЕ	ОБЛОМОЧНЫЕ	ГРУНТОВЫЕ
Тип движения				
ОБВАЛЫ				
	БЛОКИ ОПРОКИДЫВАНИЯ			
ОПОЛЗНИ СКОЛЬЖЕНИЯ	Оползни вращения			
	Трансляционные оползни			
ОПОЛЗНИ РАЗДАВЛИВАНИЯ				
ОПОЛЗНИ ПОТОКИ				
КОМПЛЕКС				

Рисунок 1.3 – Классификация гравитационных процессов по Варнсу [8]

### 1.2.1 Обвалы и камнепады

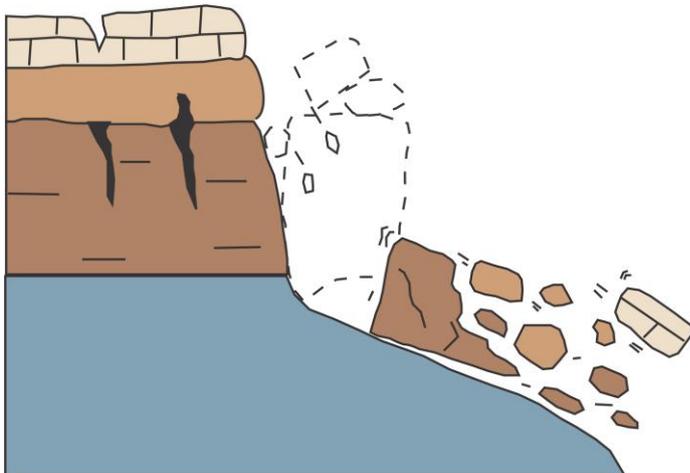
Обвалы и камнепады характеризуется отрывом грунта от крутого склона вдоль поверхности, на которой практически не было смещения сдвига. После этого материал движется вниз в основном за счет падения, отскакивания или перекатывания (Рисунок 1.4).



*Рисунок 1.4 – Схема обвала и фотография камнепада*

### 1.2.2 Блоки опрокидывания

Под данным термином подразумевается обрушение, переходящее во вращение вокруг оси ниже центра тяжести блока скальных грунтов (Рисунок 1.5). Причины активизации схожи с обвалами. Блоки опрокидывания могут быть сложными и составными.



*Рисунок 1.5 – Схема и фотография блока опрокидывания*

### 1.2.3 Оползни скольжения

Оползни скольжения – один из наиболее распространенных типов оползней

[15]. В оползнях скольжения движение представлено скалывающими деформациями и смещениями по одной или нескольким поверхностям. Оползни скольжения условно можно разделить на две группы – оползни вращения и трансляционные оползни.

### Оползни вращения

Оползень вращения (Рисунок 1.6) имеет поверхность скольжения близкую по форме к эллипсоидальной или сферической, с вращательным механизмом движения.



Рисунок 1.6 – Схема и фотография оползня вращения

### Трансляционные оползни

В трансляционном оползне (Рисунок 1.7) смещение происходит по плоской поверхности. Породы в данном случае смещаются по существующей в массиве поверхности ослабления т.е. определяется наличием структурно ослабленных зон, таких как тектонические разрывы, трещины и напластование.

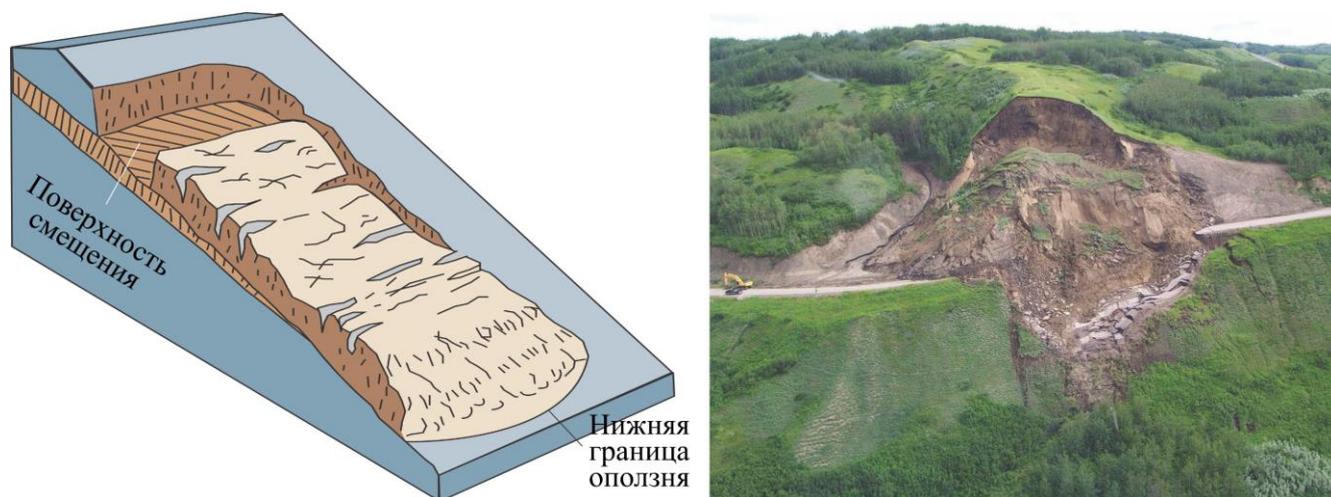
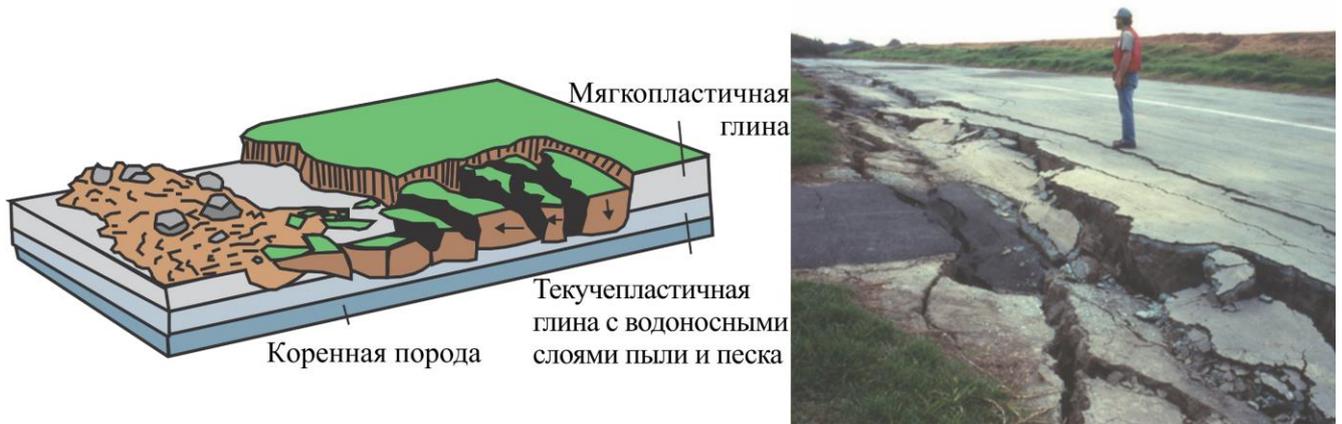


Рисунок 1.7 – Схема и фотография трансляционного оползня

### 1.2.4 Оползни раздавливания

Оползни раздавливания (Рисунок 1.8) распространены на очень пологих склонах. Основным условием развития оползней раздавливания является присутствие в основании склона выдержанных горизонтов пород, обладающих очень низкой прочностью, и перекрытых сверху относительно прочными породами. Оползни раздавливания могут возникать из-за разжижения более мягкого нижележащего материала. Оползни раздавливания подразделяются на оползни блочного выдавливания и оползни бокового выдавливания.



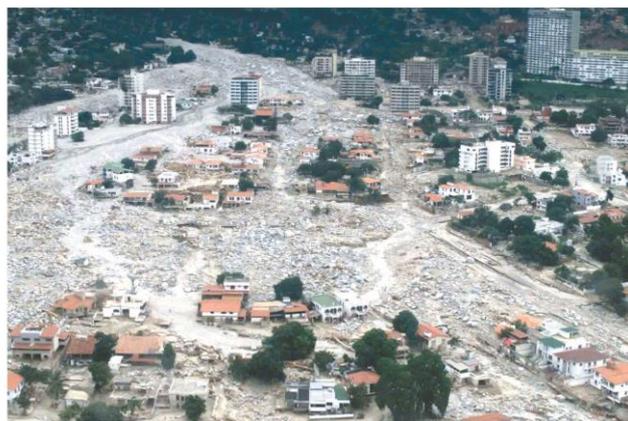
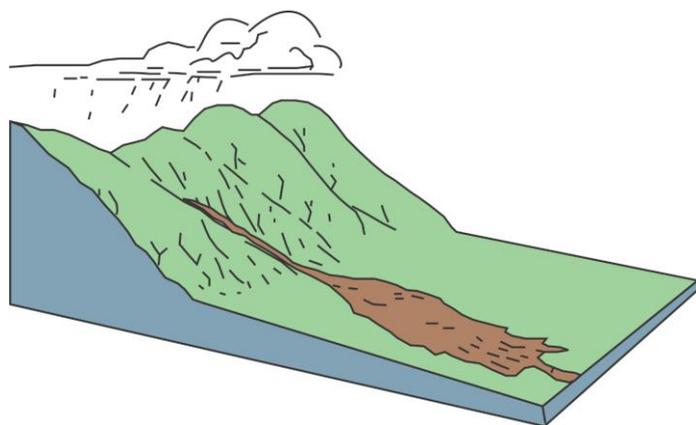
*Рисунок 1.8 – Схема и фотография оползня бокового выдавливания*

### 1.2.5 Оползни потоки

Оползни потоки – быстрое или медленное течение грунтов, без четко выраженной поверхности скольжения. Различают водонасыщенные или сухие потоки (каменные лавины). В отличие от Российской практики к оползням потокам также относятся сели.

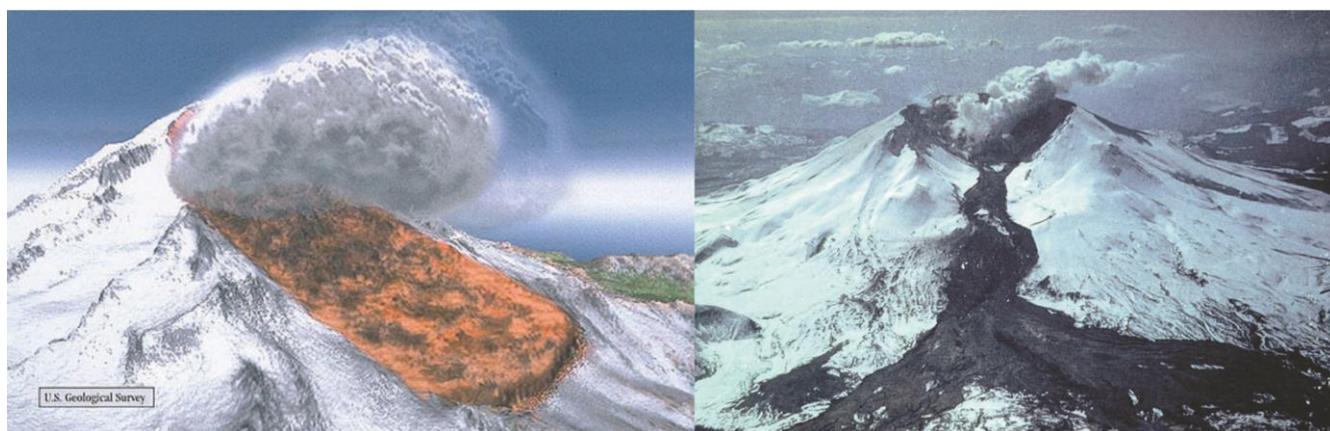
#### Сели

Селями (Рисунок 1.9) называются внезапные горные потоки, насыщенные твердым обломочным материалом и глинистой фракцией, формирующиеся в некоторых речных горных бассейнах в результате ливневых дождей, либо при интенсивном снеготаянии.



*Рисунок 1.9 – Схема и фотография селя*

Разновидностью селевых потоков являются лахары – вулканические грязевые потоки, которые возникают на склонах вулканов (Рисунок 1.10).



*Рисунок 1.10 – Схема и фотография лахара*

### **Оползни разжижения**

Оползни разжижения (Рисунок 1.11) распространены в областях развития молодых глинистых отложений, преимущественно морского генезиса, характерным свойством которых является высокая чувствительность. Они отличаются внезапностью проявления. Толчком к внезапному разрушению первичной структуры грунтов и их быстрому разжижению могут служить землетрясения. Объемы разжижающихся масс достигают нескольких тысяч кубических метров, а скорости движения оползневых потоков составляют несколько метров в секунду.



*Рисунок 1.11 – Схема и фотография оползня разжижения*

### **Крип (Ползучесть)**

Крип (ползучесть) (Рисунок 1.12) это процесс медленного, сползания рыхлого покрова грунтов вниз по склону, происходящий под воздействием силы тяжести. Деформации возникают, когда внутреннее касательное напряжение достаточно велико, чтобы вызвать смещение, но недостаточно велико, чтобы вызвать сдвиговое разрушение. Существуют три типа ползучести: сезонная, при которой перемещение возникает в пределах слоя грунта, подверженного сезонным изменениям влажности и температуры; непрерывная, при которой касательные напряжения превышают порог ползучести и тем самым постоянно вызывают медленные деформации; и прогрессирующая, при которой ползучесть становится причиной разрушения склона и развития других типов перемещений грунтовых масс.



*Рисунок 1.12 – Схема и фотография крипа*

## Потоки в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов

Оползни-потоки в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов (Рисунок 1.13) развиваются при оттаивании сильнольдистых грунтов или подземных льдов. В результате переувлажнения грунтов в процессе оттаивания происходит снижение их прочности на сдвиг, что становится причиной перехода их в текучее состояние.



Рисунок 1.13 – Схема и фотография потока в вечной мерзлоте

## Каменные лавины

Каменные лавины (Рисунок 1.14) представляют собой сухие (в большинстве случаев) обломочные потоки, характеризующиеся определенным сочетанием геоморфологических (формы рельефа) и седиментологических (состав и строение отложений) признаков.

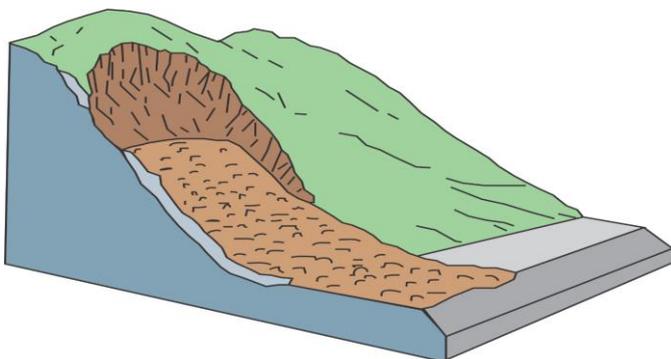


Рисунок 1.14 – Схема и фотография каменной лавины

### 1.3 Факторы, определяющие развитие оползневого процесса

Устойчивый склон – это тот, который поддерживает баланс между приложенными напряжениями и прочностью грунта (Рисунок 1.15).

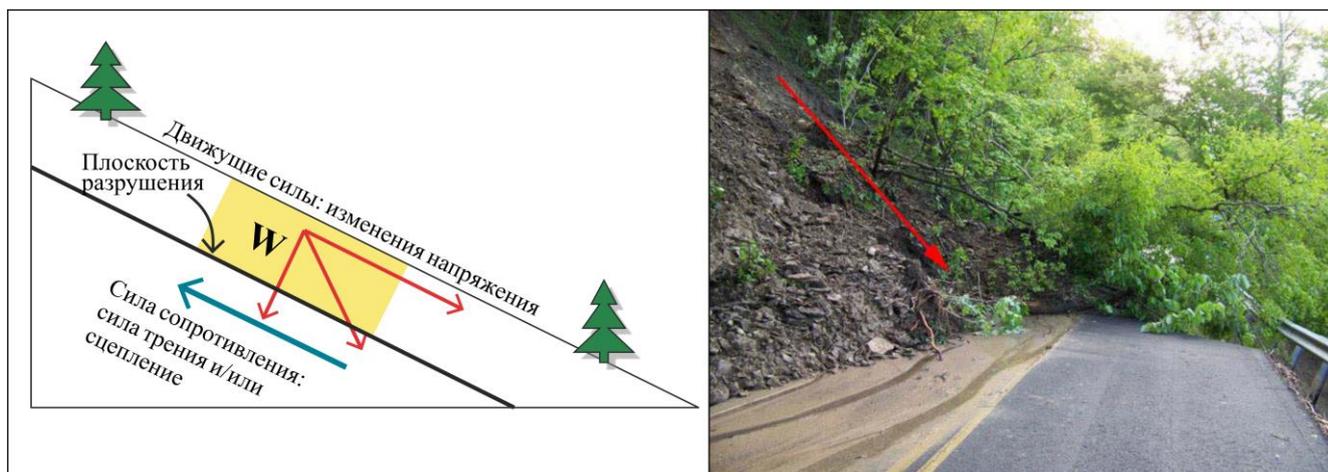


Рисунок 1.15 – Слева: Движущие силы и сила сопротивления на склоне.  $W$  – вес блока. Справа: Оползень вдоль дороги Биг-Эдди округа Франклин

Склон будет терять устойчивость, если условия равновесия нарушены увеличением нагрузки или уменьшением прочности на сдвиг. Разрушение склона возможно, когда спусковые механизмы совпадают с ранее существовавшими причинами [91].

Причины изменений нагрузки и сопротивления включают (Рисунок 1.16):

1. Увеличение веса в верхней части склона в результате засыпки, строительства здания или сильных осадков.
2. Удаление грунта у основания склона за счет срезки (например, при строительстве дорог) или естественной эрозии.
3. Увеличение порового давления в грунтах из-за сильных осадков и подъема уровня подземных вод, или быстрого снижения уровня воды в водохранилищах.
4. Удаление растительности.
5. Процессы набухания и усадки глинистых грунтов в зависимости от циклов влажной и сухой погоды.
6. Процессы выветривание горных пород.
7. Динамические, в том числе и сейсмические воздействия на склон.

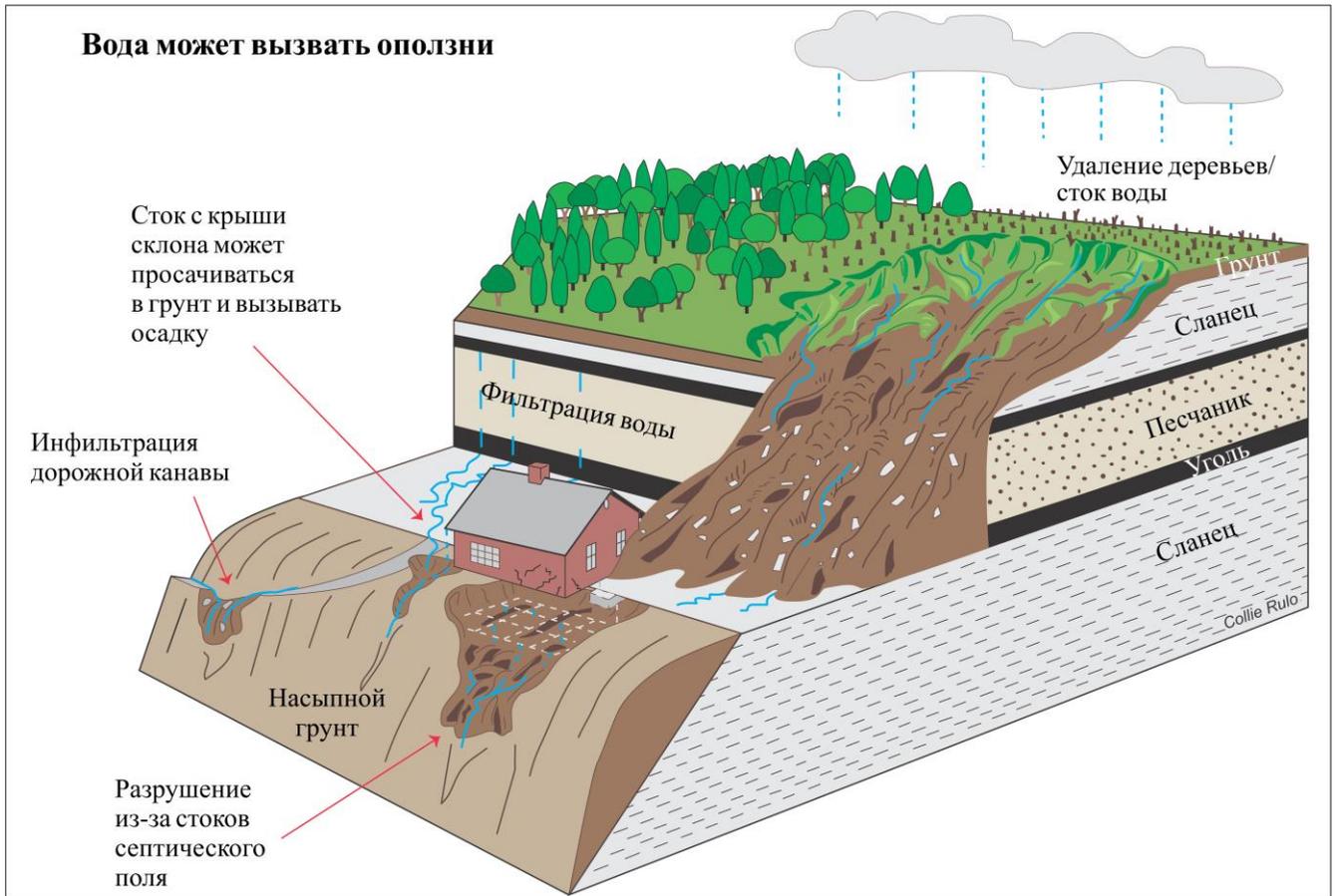


Рисунок 1.16 – Множество причин и триггеров оползней

Глейд Т. и Крозье М. [92, 106] определили три теоретических уровня устойчивости, основанных на способности внешних сил вызывать разрушение, включая «устойчивое состояние», «маргинально устойчивое состояние» и «активно неустойчивое состояние» (Рисунок 1.17). Одновременно можно выделить четыре группы факторов, способствующих неустойчивости склона (также известные как «дестабилизирующие факторы»).



Рисунок 1.17 – Состояния устойчивости и дестабилизирующие факторы

Факторы предварительных условий – это статические, внутренние факторы,

которые не только влияют на устойчивость, но, что более важно, выступают в роли катализаторов для более эффективного действия других дестабилизирующих факторов. Например, уменьшение прочности грунтов при повышении их влажности способствует разрушению склона во время ливня с ураганом; или пространственная ориентация структуры грунтов может увеличить дестабилизирующие эффекты подрезки склона.

За счет подготовительных факторов устойчивость склона уменьшается со временем без начала движения. Они отвечают за переход состояния склона от «устойчивого» к «маргинально устойчивому». Одни факторы, такие как выветривание, изменение климата и тектонические движения, действуют в течение длительных периодов. Другие, такие как эрозия и техногенное воздействие, могут быть эффективными в течение более коротких промежутков времени.

Факторами причинами (триггерами) являются те, которые вызывают начало движения склона, то есть приводят к переходу склона из «маргинально устойчивого» в «активно неустойчивое» состояние. Наиболее частыми спусковыми факторами являются сильные ливни с ураганом, длительные периоды влажной погоды или быстрое таяние снега, сейсмические события и подрезка склонов.

Поддерживающие факторы определяют поведение «активно неустойчивых» склонов, например, продолжительность, скорость и направление движения оползневых масс. Они связаны с прогрессирующей стадией движения оползня.

Основным количественным показателем, характеризующим устойчивость склонов, является коэффициент устойчивости. Поскольку каждое обстоятельство лишь в той мере является фактором оползневого процесса, в какой оно влияет на коэффициент устойчивости склона, для оценки оползневых факторов имеют значения только те классификации, которые определяют характер этого влияния. [48].

Согласно В.В. Пендину и И.К. Фоменко [48] наиболее полной является классификация, основанная на подходах предложенных Е.П. Емельяновой и И.П. Ивановым. Согласно ей, факторы оползнеобразования можно разделить на две группы [13, 24]:

1. Группа факторов, объединяющих условия, приводящие к образованию оползня (группа факторов, определяющая среднее значение коэффициента устойчивости), которая включает в себя следующее:

- Рельеф местности;
- Геологическое строение склонов и откосов;
- Особенности физико-механических свойств горных пород;
- Гидрогеологические условия;
- Современные и новейшие тектонические движения и сейсмические явления;
- Климатические особенности района;
- Гидрологический режим водоемов и рек для береговых оползневых участков;
- Развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и явлений;
- Инженерная деятельность человека.

2. Группа факторов, объединяющих процессы, изменяющие значение коэффициента устойчивости. Его можно разделить на следующие подгруппы:

\* Подгруппа факторов, которые влияют на состав, состояние, структуру и свойства горных пород, составляющих откос или склон, следовательно, изменяя их прочность и деформируемость, которая включает в себя следующее:

- Процессы выветривания;
- Увлажнение грунтов дождевыми, тальными, подземными и хозяйственными водами;
- Процессы промерзания и протаивания грунтов;
- Процессы длительной ползучести грунтов;
- Процессы выщелачивания и суффозии.

\* Подгруппа факторов, которые изменяют напряженное состояние склона или массива горных пород на склоне, которая включает в себя следующее:

- Процессы эрозии и абразии.
- Изменение базиса эрозии.
- Изменение уровня грунтовых вод и связанные с этим эффекты

гидростатического и гидродинамического давления фильтрационного потока.

- Аккумуляцию аллювиальных и делювиальных отложений, пригрузка склонов обвальными массами.

- Техногенное воздействие, связанное с подрезкой пригрузкой и изменением профиля склона.

Исследования оползней показали, что факторы, как правило, могут усиливать друг друга на протяжении времени их взаимодействия, т.е. проявляется синергетический эффект. Тем не менее, в каждом случае один из факторов оказывает решающее влияние на возникновение или активизацию оползневого процесса в конкретных геолого-геоморфологических условиях. Этот фактор часто называется «причиной» процесса (триггер в зарубежной литературе) [52].

#### **1.4 Оползневая опасность**

Оползневая опасность определяется как вероятность развития оползневого процесса.

Согласно системе национальных стандартов Российской Федерации, в том числе ГОСТ Р 51898 – 2002 [57], опасность представляет собой «потенциальный источник возникновения ущерба». Акимовым В. А. [2] был предложен термин «источник опасности», под которым он понимал «ограниченный в некоторой области пространства процесс, деятельность или состояние определенного объема окружающей человека среды, способные привести к реализации опасности и возникновению в окружающей среде негативных воздействий на людей, объекты техносферы и природную среду».

Согласно Осипову В. И [47] не существует однозначного понимания опасности. Для ее комплексного определения необходимо систематизировать различные виды опасностей как техногенного, так и природного происхождения, которые создают угрозу жизни и имуществу людей. Классификация природных опасностей может проводиться на основе различных критериев, таких как происхождение, механизм поражающего действия, продолжительность развития и действия, регулярность во времени, регулярность в пространстве, механизм возникновения и др. Классификация опасных природных явлений, предложенная

Акимовым В. А. [2] приведена на Рисунок 1.18. Следует заметить, что корректнее рассматривать не опасные явления, а опасные процессы, так как явление есть результат процесса.

Одной из важнейших задач при оценке опасности является достоверный прогноз возникновения и развития процессов. Шеко А. И. [64] определил прогноз геологических процессов как «научное, основанное на анализе закономерностей развития, предсказание места, времени, характера, типа и масштаба проявления тех или иных процессов, а также подверженности территории и объектов народного хозяйства их воздействию».



Рисунок 1.18 – Классификация опасных природных явлений

«Прогнозирование опасности оползней» [50] – это термин, используемый для обозначения предсказаний возможности или пространственного распределения оползней в конкретном регионе под влиянием изменения природных условий и деятельности человека. Важным компонентом прогноза является оценка оползневой опасности, под которой понимается «вероятность проявления (или степени распространения), возникновения и развития оползневого процесса» [58].

При оценке оползневой опасности помимо изучения рельефа, геологического строения, сейсмотектонических, геоморфологических, гидрогеологических и экологических условий, состава, состояния и свойств грунтов, выявления геологических и инженерно-геологических процессов, должны быть освещены следующие принципиальные вопросы:

- Типы оползней, возраст, стадии оползневого процесса, положения базисов, морфометрические параметры, форма и положение поверхности смещения, основной деформирующийся горизонт, его мощность, механизм смещения;

- Приуроченность оползневых процессов к определенным геологическим образованиям, тектоническим структурам и геоморфологическим элементам;

- Роль отдельных природных и антропогенных оползнеобразующих факторов в снижении устойчивости склонов и откосов (на основе установления зависимости между активностью оползневых подвижек и интенсивностью проявления факторов оползнеобразования);

- Современное состояние исследуемого склона (откоса) и сооружений на нем, степень устойчивости склона или откоса, прогноз дальнейшего поведения (возможности активизации старых или возникновения новых оползней, определение стадии развития действующих и др.);

- Опыт осуществленной в данном районе противооползневой защиты с анализом ее эффективности;

- Моделирование устойчивости в различных условиях для определения причин возникновения и активизации оползня, а также прогноза развития оползневого процесса.

По результатам необходимо дать прогноз оползневой опасности и

разработать рекомендации по мониторингу и рациональным защитным мерам.

На Рисунок 1.19 [12], методы прогнозирования разделяются на две группы: региональное и локальное прогнозирование. В зависимости от формы представления результатов прогноза каждая группа подразделяется на количественное прогнозирование и качественное прогнозирование. Количественное прогнозирование, в свою очередь, делится на детерминистическое и вероятностное.

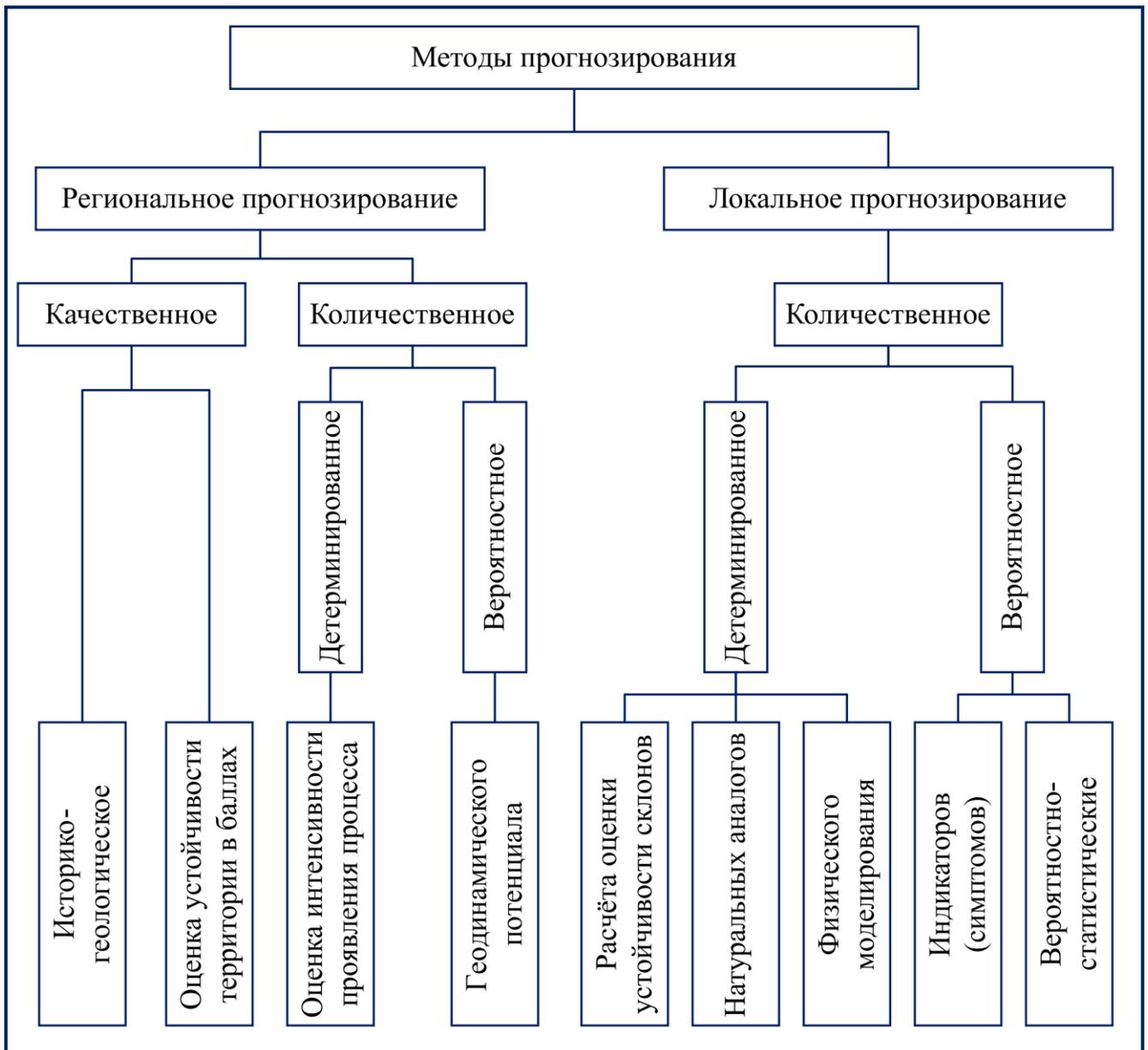


Рисунок 1.19 – Классификация методов прогнозирования оползневых процессов

Методы прогноза постоянно развиваются, что, в свою очередь вызывает необходимость обновление системы их классификации. Это позволит выбрать

наиболее совершенные и эффективные методы и, тем самым, повысит достоверность моделей прогнозирования.

### **1.5 Иерархическая система оценки оползневой опасности**

С конца 70-х годов XX столетия Г.К. Бондариком был введен термин «природно-техническая система» (ПТС) с целью рассмотрения возникающих в процессе взаимодействия человека и природы особых образований – систем. «ПТС – это особые целостные системы, упорядоченные в пространственно-временном отношении совокупностью взаимодействующих компонентов, включающих орудия, продукты и средства труда, естественные и искусственно измененные природные тела, а также естественные и искусственные информационно-энергетические поля» [6].

По В.Д. Ломтадзе [32] природно-технической системой, называется «природный комплекс, в пределах которого размещены искусственные объекты, созданные в результате выполнения строительных и других инженерных работ. В географии (а теперь и в инженерной геологии) такую систему рассматривают как модель, характеризующую взаимодействие природы (геологической среды) с сооружениями. Такое название особых возмущений не вызывает, так как оно связано с общими закономерностями развития тех или иных явлений в природе. Здесь понятия геологическая среда, геологические условия кодируют словом, имеющим более широкое значение, - природная, а понятие сооружения или инженерные работы – словом техническая, отражающим также более широкое понятие, связанное с техникой. В инженерной геологии используют понятие о бинарной системе геологическая среда – сооружения, отражающее функционирование реальных бинарных систем: фундаменты – естественные основания; подземное сооружение – геологическая среда; выемка, котлован, карьер – геологическая среда и т. д». ПТС формируется в процессе взаимодействия технической системы (ТС) с природными системами (ПС) посредством обмена вещества и энергии.

ПТС являются объектом исследования, объединяющим интересы геологов, географов и экологов. Изучение их основных компонентов и вещественно-

энергетических связей между ними, определяющих структуру природно-технической системы, служит основой оптимального управления, а также прогноза и контроля состояния природной среды, что, в конечном счёте, приводит к рациональному экономически и экологически сбалансированному освоению природных ресурсов.

При оценке опасности оползневые системы целесообразно рассматривать как компоненты природно-технических (ПТС) систем.

Иерархия ПТС включает снизу вверх следующие категории [6]:

- Элементарная ПТС - «система, область взаимодействия которой, называемая сферой взаимодействия, не взаимодействует и не граничит с другими сферами (например, отдельно стоящие сооружения, одна отдельно расположенная эксплуатационная скважина (депресссионная воронка которой не захватывает другие скважины и не влияет на их производительность))».

- Локальная ПТС - система, включающая «комплекс сооружений, сферы взаимодействия которых граничат или пересекаются (например, зоны уплотнения под рядом расположенных зданий или депрессионные воронки соседних эксплуатационных скважин). Иногда такие системы организуют целенаправленно, их функционирование обеспечивается взаимодействием входящих в нее элементарных ПТС».

- Региональной ПТС называется «система, включающая дискретно расположенные локальные ПТС, области взаимодействия которых не граничат. В них наряду с прямыми реализуются косвенные (техноплагенные взаимодействия)».

- Национальной ПТС называется «совокупность природно-технических систем регионального уровня, замкнутую национальными (государственными) границами. Выделение ПТС национального уровня обусловлено социальной стороной решения экологической проблемы».

- Глобальной ПТС (высший уровень иерархий) является «полная совокупность всех ПТС на планете. Искусственная часть глобальной ПТС составляет техносферу Земли, а её сфера взаимодействия с литосферой называется геологической средой».

Некоторые характеристики различных категорий ПТС представлены в Таблица 1.2 [7].

Таблица 1.2 – Характеристики категорий ПТС

Характеристика ПТС	Категория ПТС		
	Элементарная	Локальная	Региональная
Компоненты подсистемы «область геологической среды»	Зоны, сферы взаимодействия. Однородные в отношении инженерно-геологических процессов. Составляют связную область геологического пространства	Сферы взаимодействия элементарных ПТС. Неоднородные в отношении инженерно-геологических процессов. Составляют связную область геологического пространства	Области взаимодействия локальных ПТС, природные геосистемы. Неоднородные в отношении инженерно-геологических процессов. Совокупность областей взаимодействия не образует связной области геологического пространства
Взаимодействия	Прямые	Преимущественно прямые и отчасти косвенные	Преимущественно косвенные и природные возмущающие
Экзогенные геологические процессы	Техногенные	Техногенные, отчасти техноплагенные	Преимущественно техноплагенные, на отдельных участках в границах локальных ПТС – техногенные
Границы ПТС	Условные, устанавливаемые на	Комбинаторные; в общем случае –	Комбинаторные, устанавливаемые с

	основании результатов расчета инженерно-геологических процессов, и геологические	огнибающая внешние границы элементарных ПТС, расположенных в краевой зоне локальных ПТС	учетом границ технополаженных взаимодействия
Режим функционирования	Одинаковые в пределах всей ПТС (переходные или относительной стабилизации)	Различные в соответствии с состоянием отдельных элементарных ПТС. В целом – режим относительной стабилизации	Различный
Методы прогноза функционирования ПТС	Детерминированные	Стохастические и детерминированные	Стохастический
Организационная структура, в рамках которой осуществляется прогноз функционирования и управление ПТС	Служба эксплуатации сооружения	Служба мониторинга города (промышленного комплекса) и его блока – лито-мониторинга	Служба регионального мониторинга окружающей среды

Природно-технические системы функционирующие под влиянием взаимодействия между искусственными объектами и некоторой областью литосферы находятся в поле зрения инженерной геологии, так как их движение обусловлено инженерно-геологическими процессами.

Подход к оценке оползневой опасности для ПТС различных иерархических уровней так же будет различен. Таким образом, иерархический уровень ПТС определяет методику оценки и прогноза оползневой опасности.

На Рисунок 1.20 приведена иерархическая структура ПТС для оценки оползневой опасности района Шапа провинции Лаокай.



*Рисунок 1.20 – Иерархическая структура ПТС оценки оползневой опасности (на примере района Шапа провинции Лаокай)*

Научно-обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды естественных и искусственных взаимодействий и составление на этой основе оценки оползневой опасности с учетом иерархии ПТС дает возможность правильно спланировать мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных природно-технических систем (ПТС), создать инженерно-геологическую основу для разработки плана народно-хозяйственного освоения территорий.

Доказательству этого тезиса с апробацией соответствующих методов на примере района Шапа провинции Лаокай и посвящена данная диссертационная работа.

## **1.6 История изучения оползневой процесса во Вьетнаме**

### **1.6.1 Предпосылки изучения оползневой процесса во Вьетнаме**

Вьетнам – страна, вытянутая с севера на юг на 1700 км. Три четверти ее территории занимают горные регионы. Из-за тропического муссонного климата количество выпадающих во Вьетнаме осадков чрезвычайно велико и составляет от

3500 мм до 4500 мм в год. Согласно статистике Министерства транспорта Вьетнама (МОТ) на 2000 год, 30% от общего количества национальных автомагистралей проходили через горную местность, при этом 3/4 из них было построено на склонах. В таких условиях оползни, особенно в сезон дождей, значительно влияют на социально-экономическое состояние страны [124].

Согласно данным Управления по борьбе со стихийными бедствиями Вьетнама (Ханой, октябрь 2019 года), в период с 1953 по 2006 год во Вьетнаме произошло 448 ливневых паводков и вызванных ими оползней (в среднем по семь событий в год). При этом, в период с 2000 по 2015 год произошло 250 ливневых паводков и вызванных ими оползней (в среднем 15–16 событий в год), т.е. наблюдается увеличение интенсивности оползневой оползневой процесса. Эти события стали причиной значительного социально-экономического ущерба: 779 человек погибли, 426 человек получили ранения, было разрушено 9700 домов, пострадало около 75000 гектаров сельскохозяйственных земель.

Статистические данные о причиненном ущербе, в период с 2000 по 2017 год представлены в Таблица 1.3.

*Таблица 1.3 – Ущерб, причиненный людям и домам в результате стихийных бедствий (2000 – 2017)*

Год	Количество стихийных бедствий	Количество погибших/пропавших без вести людей	Количество раненых	Количество поврежденных домов	Количество пострадавших домов
2000	9	80	44	267	2305
2001	14	45	15	33	6228
2002	13	98	137	7596	71178
2003	4	16	3	15	69
2004	11	92	41	206	2988
2005	17	99	25	664	9057
2006	8	26	17	55	6861
2007	17	38	6	92	198
2008	9	31	22	62	190

2009	6	19	5	349	1061
2010	8	16	6	53	764
2011	38	23	8	102	692
2012	64	89	27	123	1817
2013	23	57	37	89	1399
2014	9	19	12	35	141
2015	8	20	18	202	4530
2016	16	31	7	39	795
2017	14	71	41	420	6228
<b>Сумма</b>	<b>288</b>	<b>870</b>	<b>471</b>	<b>10.402</b>	<b>116.501</b>

Одним из самых серьезных стихийных бедствий, связанных с оползневой процессом во Вьетнаме, является разрушение плотины, вызванное оползнем, сошедшим во время ливневого паводка в Муонг Лэй в 1996 году [197]. Сформировавшаяся оползневая плотина образовала озеро длиной 1 км и глубиной 15 м на реке Нам Хе, в результате прорыва которой был смыт город Муонг Лэй.

В 2018 году в северных горных регионах Вьетнама произошло 14 событий, связанных с оползнями, в результате которых погибли и получили ранения 82 человека, что составило 70% всех погибших и раненых от ливневых паводков и оползней по всей стране. Лаокай – одна из провинций на северо-западе Вьетнама с высокой оползневой опасностью [193], которая определяется особенностью геологических и геоморфологических условий [153]. С 2005 по 2015 год, в этом районе был идентифицирован 641 активный оползень. На основе исследования Нгуен Ч. Й. (2006) [44], с 1965 до 2006 гг., в данном регионе от схода оползней погибло 150 человек и был разрушен 361 дом. Наиболее серьезные ливневые паводки и оползни произошли в провинции Лаокай в 1996, 2000, 2004, 2008, 2011, 2012, 2013, и 2016 год [124, 204].

Существенные экономические и социальные потери, связанные с активизацией оползневых процессов, привели к пониманию необходимости их системного изучения и, начиная с 90-х годов прошлого столетия к решению проблемы по минимизации рисков от оползневых процессов были привлечены

ведущие профильные центры в области исследования оползней: Институт геологических наук Вьетнама, Институт географии (Вьетнамская академия наук и технологий), Национальный центр гидрометеорологического прогнозирования, Институт геологии и минералов, Ханойский университет науки (Вьетнамский национальный университет, Ханой), Ханойский университет горного дела и геологии [45].

В 2018 году правительство Вьетнама отметило, что в горных регионах на севере Вьетнама необходимо определить регионы с высокой оползневой опасностью, чтобы запланировать мероприятия по борьбе со оползневыми процессами, с целью минимизации социально-экономического ущерба. В результате было выполнено большое количество исследований, направленных на оценку оползневой опасности. Например, по результатам работ, выполненных с 2012 до 2017 гг., специалисты определили более 500 коммун в 17 горных провинциях и 10266 оползневых участков в 10 горных провинциях на севере Вьетнама, с высокой и очень высокой оползневой опасностью.

На основе факторов возникновения и активизации оползни в провинции Лаокай делятся на четыре типа: вторичные оползни, оползни, связанные с ливневыми осадками, оползни сейсмогенной природы и эндогенные оползни.

Исследование Нгуена и Дао [154] выявило 8 основных причин активизации оползней в Северо-Западном регионе Вьетнама:

- Уклон рельефа: оползни происходят при уклоне более 25 градусов и большинство в интервале от 30 до 45 градусов.
- Выветривание: Поверхность скольжения большинства оползней находится на границе коренных пород и зоны выветривания.
- Современные тектонические движения, вызванные землетрясениями и активными разломами: оползни, как правило, приурочены к активным разломам.
- Гидросистема (поверхностные и грунтовые воды): оползни часто приурочены к склонам речных долин и оврагов. Опасность возникновения и активизации оползней увеличивается в сезон дождей.
- Растительный покров: оползни часто возникают в местах нарушения

растительного покрова.

- Ориентировка элементов залегания пород: падение трещин или сланцеватости пород в направлении уклона рельефа способствует развитию оползневого процесса.

- Физические свойства и структура грунтов: поверхность скольжения обычно появляется в слабых и сильно разрушенных зонах.

- Человеческая деятельность: техногенные факторы прямо или косвенно влияют на оползневую опасность.

Буй Т. З. (2017) [195] проанализировав 340 оползней в провинции Лаокай показал, что площадь самого большого оползня - 65.5 тыс. м<sup>2</sup>, минимальный размер оползневых проявлений составляет 417 м<sup>2</sup>. Наиболее крупные оползни (> 10.000 м<sup>2</sup>) составляют 11% от общего числа выявленных оползней, на средние (1000-10.000 м<sup>2</sup>) приходится 65,6%, а на оползни с размерами менее 1000 м<sup>2</sup> - 23,4%.

### **1.6.2 Основные этапы изучения оползневого процесса во Вьетнаме**

Во Вьетнаме оползни начали изучать с 1960-х годов. С 1990 до 2000-х годов направления исследований были, в основном сосредоточены на ситуационном анализе преимущественно в мелком масштабе и разработке типовых решений по противооползневой защите. К наиболее значимым исследованиям данного периода следует отнести следующие работы:

- Ву К. М. (1996) [9] проанализировал оползневые и селевые процессы в Лайчау и сделал прогноз их активации и развития. Также он показал связь между оползнями и селями.

- Нгуен Ч. Й. (1998, 1999) [42, 43] показал что оползень – важный экологический инцидент, происходящий в различных регионах Вьетнама. На основе изучений он разработал противооползневые мероприятия.

- Чан Ч. Х. (1999) [61] создал карты зонирования оползней в северном и центральном регионах Вьетнама.

- Ву К. М. (2000) [10] выделил на севере Вьетнама регионы с высокой оползневой опасностью, такие как Мьонглэй – Лайчау, северный район Хоанглиеншон, Баккуанг – Хоангшуфи.

С 2001 по 2010-х годы началось систематическое исследование оползней при дорожном строительстве. На этом этапе, были проанализированы геологические, геоморфологические и техногенные факторы активизации оползневого процесса. Работы выполнялись в крупном масштабе с применением современных методов, в том числе метод на основе ГИС.

Типичными работами на данном этапе является следующие:

- Чан Ч. Х. (2004) [62] создал карты оползневой опасности для горных провинций северного Вьетнама.

- Чан Т. Х. (2004) [60] на основе ГИС, создала карты зонирования и оценки риска от оползней и селей для провинции Лаокай.

- Нгуен Ч. Й. (2006) [44] выполнил детальные изучения оползней и создал 25 карт для ключевых регионов: Батсат, Шапа и г. Лаокай (Провинция Лаокай); Йенминь, Хоангшуйф и Синман (Провинция Хазанг). Для определения факторов оползнеобразования в исследованиях широко использовался метод логистической регрессии. Анализ результатов позволил предложить эффективные противооползневые мероприятия.

- Чан Ч. Х. (2010) [63] анализировал причину, механизм образования и мотивацию развития оползневого процесса района исследования, а также показал уровни оползневой опасности и предсказал оползневый процесс.

- Нгуен Т. Л. (2010) [41] создал математическую модель при изучении РС (RS) и ГИС (GIS), чтобы оценить уровень риска геологического бедствия в горных городских районах на севере Вьетнама. Это новое направление исследования во Вьетнаме для применения сбора данных по идентификациям и оценкам рисков геологических бедствий.

Карта районирования оползневой опасности Вьетнама, разработанная под руководством Нгуен Ч. Й., в 2006 [44] приведена на Рисунок 1.21.

Начиная с 2011 г. в исследованиях оползневых процессов методики, основанные на ГИС комбинируется с другими современными методами. В районах с высокой оползневой опасностью активно выполняются детальные исследования оползней, с применением методов математического и физического моделирования

устойчивости склонов [35, 169, 195, 197, 200] как основы для разработки эффективных противооползневых мероприятий. В этот период началась интенсивная разработка мер по раннему предупреждению.

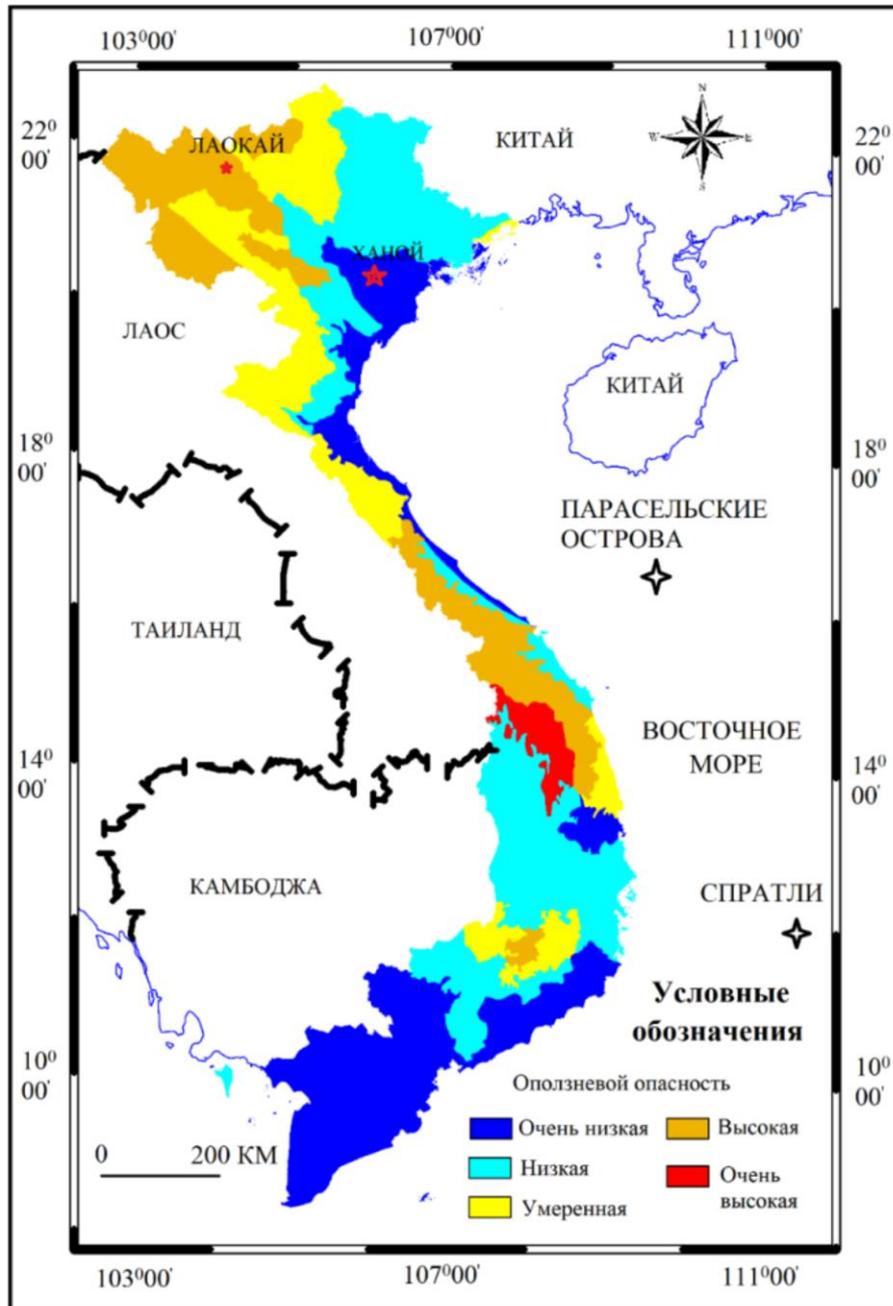


Рисунок 1.21 – Карта районирования оползневой опасности во Вьетнаме

Примерами работ на данном этапе является следующие:

- Нгуен К. Т. (2015) [37] разработал методику создания карт стихийных бедствий и издал первый набор таких для территории Вьетнама (Проект VT/UD-03/13-15).
- Фама К. Ш. – изучении геологических бедствий северо-западного Вьетнама

методами дистанционного зондирования.

- Проект SRV-10/0026 Норвежского геотехнического института и Ханойского университета (Вьетнамский национальный университет, Ханой) – детальная оценка оползневой опасности в масштабе 1:10.000, некоторые крупные оползни – в масштабе 1:1000. Числовые модели, были сформированы на основе комбинации данных БПЛА, дождемерных станций и станций наблюдения за горизонтальными смещениями, что позволило оценить движение оползневых масс в реальном времени.

- Нгуен К. Х. (2016) [38] применил многопараметрический статистический метод для оценки оползневой опасности в общине Намзан уезда Симан, провинции Хазьанг. В оценке были использованы следующие параметры: свойства грунтов, высота склонов и их уклон, горизонтальная и вертикальная расчлененность рельефа, расстояние до дорог и разломов, состояние землепользования.

- Самое представительное исследование этого периода – проект исследования, оценки и зонирования оползневой опасности в горных регионах Вьетнама. Исследования выполнялись в масштабе 1:50.000 начиная с 2012 г. К 2018 г. были созданы карты зонирования оползневой опасности для 17 горных провинций. К 2020 г. было выполнено создание карт оползневой опасности 25 провинций (Тханьхоа, Нгеан, Лаокай, Баккан, Шонла, Йенбай, Лайчау, Дьенбьен, Каобанг, Туенкуанг, Хазьанг, Бакзьанг, Хоабинь, Куангнинь, Лангшон, Хатинь, Куангбинь, Хюэ, Куангнам, Дананг, Куангнгай, Футхо, Виньфук и Тхайнгуен).

В этот период были получены положительные результаты мониторинга за оползневыми процессами. Созданы и успешно функционируют станции мониторинга Намзан (Хазьанг) [105], станция в г. Хоабинь (Хоабинь) [36], станция Кокпай (Хазьанг) [63] и др.

Использование широкого комплекса передовых методик при оценке оползневой опасности, внедрение систем мониторинга за оползневыми процессами позволяет сделать вывод о том, что данное направление исследований во Вьетнаме соответствует современному уровню достижений мировой науки в данной области знаний. Однако, не смотря на достигнутые результаты, исследования по оценке

оползневой опасности во Вьетнаме всё ещё сталкивается со многими трудностями, такими как: отсутствие метеорологических станций, систем передачи данных в реальном времени, высокоточных прогностических моделей и т.д. Прогноз оползневой опасности – сложная задача, имеющая высокий уровень неопределенности. Ее решение лежит на нечеткой границе между наукой, технологией и принятием решений.

Перспективным направлением совершенствования методологии оценки и прогноза оползневой опасности во Вьетнаме является расширение международного сотрудничества [45].

### **Выводы**

Для получения полного представления об оползневом процессе необходим синтез различных знаний. Без всестороннего понимания причин развития оползней прогноз оползневой опасности невозможен. Теоретическим базисом данной диссертационной работы является определение следующих понятий:

**Объектом исследования при оценке оползневой опасности** является оползневой процесс.

При оценке опасности оползневые системы целесообразно рассматривать как компоненты природно-технических (ПТС) систем с учетом иерархии ПТС.

Подход к прогнозу оползневой опасности для ПТС различных иерархических уровней так же будет различен.

**Цель исследования** – разработка комплексной методологии оценки оползневой опасности для ПТС регионального, локального и элементарного уровней.

Научно-обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды естественных и искусственных взаимодействий и составление на этой основе оценки оползневой опасности с учетом иерархии ПТС дает возможность правильно спланировать мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных природно-технических систем (ПТС).

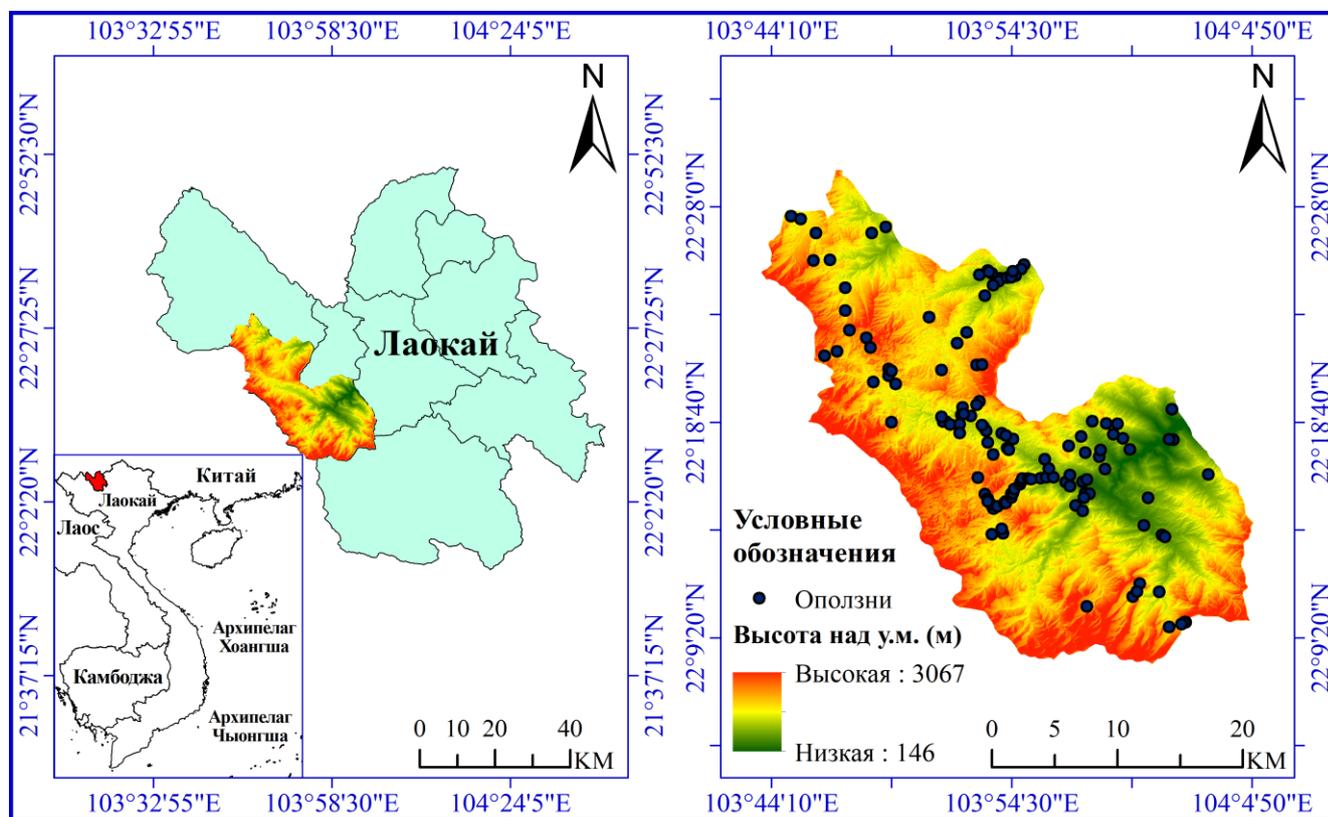
Большинство оползней во Вьетнаме происходит под воздействием осадков. Таким образом, выявление связи устойчивости склонов и количеством

атмосферных осадков является важной проблемой при оценке оползневой опасности и ее решению в диссертационной работе уделено особое внимание.

Как показала история изучения оползневых процессов, использование широкого комплекса передовых методик при оценке оползневой опасности, внедрение систем мониторинга за оползневыми процессами позволяет сделать вывод о том, что данное направление исследований во Вьетнаме соответствует современному уровню достижений мировой науки в данной области знаний.

## ГЛАВА 2 УСЛОВИЯ И ПРИЧИНЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЗВИТИЕ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА В РАЙОНЕ ШАПА

Лаокай – одна из северных провинций Вьетнама, наиболее подверженная оползневому процессам [193]. Расположенный на ее северо-западе район Шапа (Рисунок 2.1) находится примерно в 38 км от города Лаокай и в 376 км от Ханоя. Он покрывает площадь 675,8 км<sup>2</sup> и имеет высоту над уровнем моря от 150 м до более чем 3000 м. Район Шапа столкнулся с проблемой активизации оползневых и эрозионных процессов вследствие сельскохозяйственного освоения и развития туризма [95].



*Рисунок 2.1 – Расположение района исследования*

Оценка оползневой опасности является важнейшим компонентом национальной стратегии предотвращения и уменьшения последствий стихийных бедствий. Главной задачей при проведении анализа оползневой опасности является определение условий оползнеобразования, под которыми следует понимать всю совокупность природных и антропогенных факторов, нарушающих равновесие масс горных пород [45]. Для каждой территории набор таких условий может

существенно отличаться. Среди множества факторов, оказывающих влияние на склоновые процессы, к основным можно отнести особенности рельефа местности и неровностей поверхности Земли, климатические, геологические, гидрологические и антропогенные факторы. Их выбор для применения в анализе устойчивости территории к склоновым процессам в первую очередь должен основываться на характерных условиях региона исследования, учитывая важные исторические аспекты и сложившийся режим функционирования антропоэкосистемы региона [25]. В качестве «основных», для района Шапа, на основе опыта региональных оценок оползневой опасности территории Вьетнама были выбраны следующие факторы-условия:

- Климатические условия;
- Гидрография;
- Геоморфологические условия;
- Растительный покров;
- Техногенные воздействия;
- Особенности геологического строения и структурно-тектонические особенности;
- Сейсмическая активность;
- Особенности гидрогеологических условий;
- Современные экзогенные процессы.

## **2.1 Климатические условия**

Климат в районе Шапа тропический муссонный. Результатом этого является наличие двух сезонов: влажного (май-октябрь) и сухого (ноябрь-апрель). Район исследования находится в центре сильных дождей Хоанг Лиен Шон. Среднегодовое суммарное количество осадков составляет 2000–3600 мм. Наибольшее количество осадков приходится на летний период, составляя 70-85% от общего годового количества осадков [195] (Рисунок 2.2).

Карта среднемесячного количества осадков района Шапа показана на Рисунок 2.3. Осадки распределены не равномерно в пространстве: в горах, на высоте более 1000 м., количество осадков превышает 2400мм в год, в районах

речных долин, среднее количество осадков составляет 2000 мм в год.

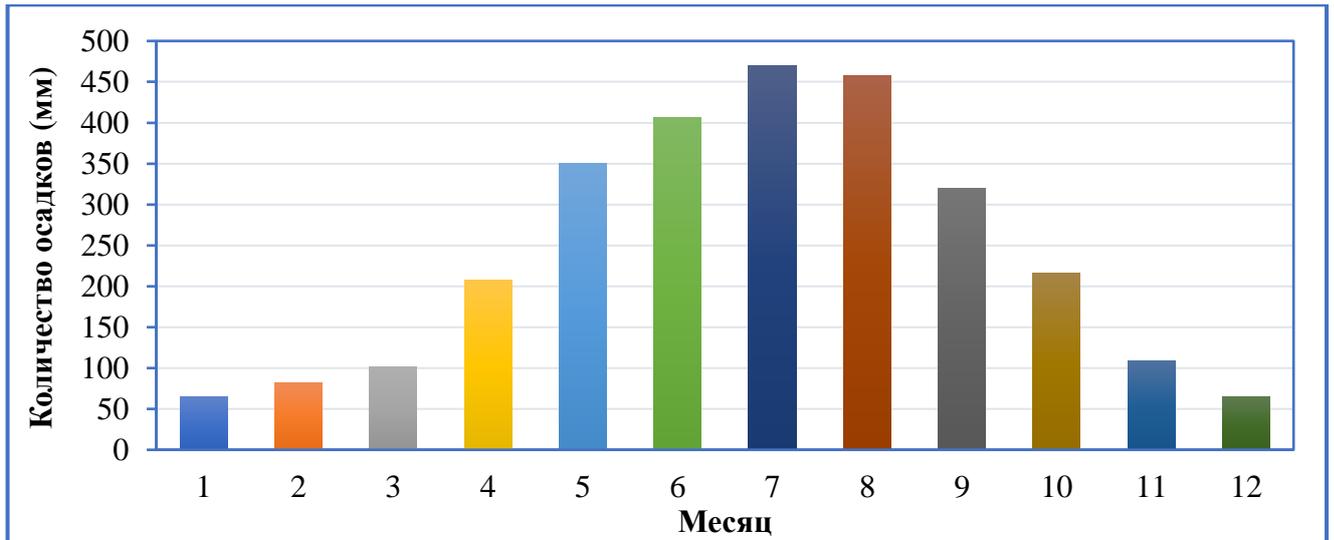


Рисунок 2.2 – Диаграмма распределения количества осадков в районе Шапа

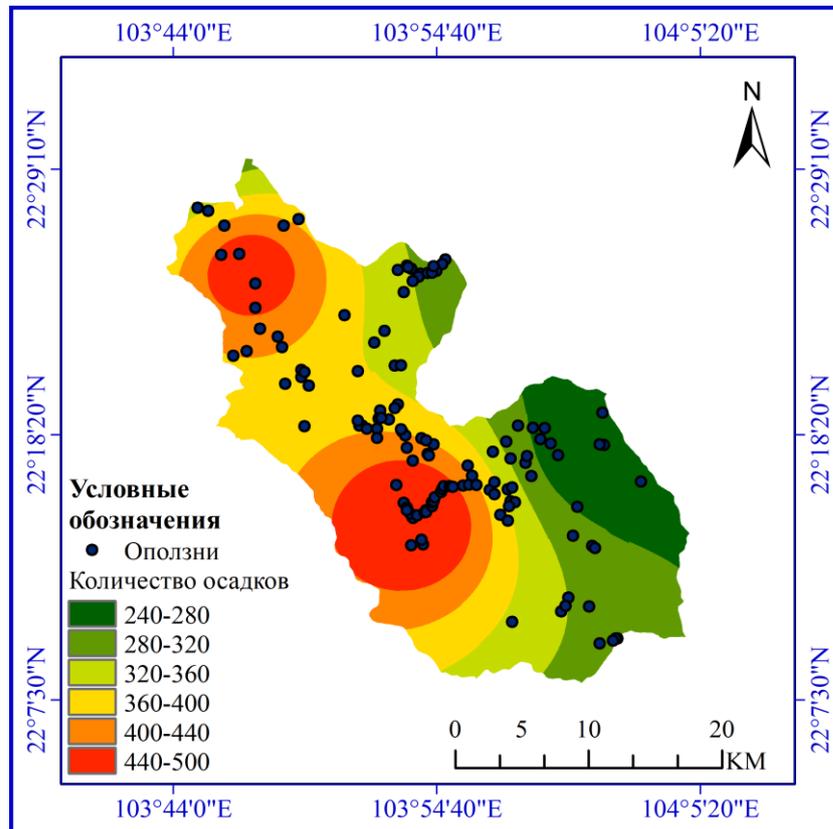


Рисунок 2.3 – Карта среднемесячного количества осадков

Периоды образования и активизации оползней совпадают с периодами дождей (Таблица 2.1). Это в первую очередь связано с изменением состояния и свойств грунтов, слагающих склоны в процессе их избыточного увлажнения, а также с подъемом уровня грунтовых вод, и как следствие с возрастанием порового давления.

Таблица 2.1 – Связь между среднемесячным количеством осадков и распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползней
Среднемесячное количество осадков (мм)	240 - 280	11,94	7,69
	280 - 320	16,51	17,69
	320 - 360	15,25	15,38
	360 - 400	24,88	23,85
	400 - 440	16,16	13,85
	440 - 500	15,27	21,54

## 2.2 Гидрография

Гидрология играет значительную роль в формировании и развитии оползневой системы [160]. Расстояние до эрозионной сети и ее плотность рассматривается как важные контролирующие факторы для составления карт оползневой опасности. В районах, прилегающих к долинам рек и оврагам, активизируются процессы эрозии, водонасыщение грунтов, увеличивается поровое давление и снижаются прочностные свойства, что способствует развитию оползневой системы [165]. Эрозионная сеть в районе исследования (Рисунок 2.4) имеет общую протяженность 509,33 км и плотность 0,75 км/км<sup>2</sup>.

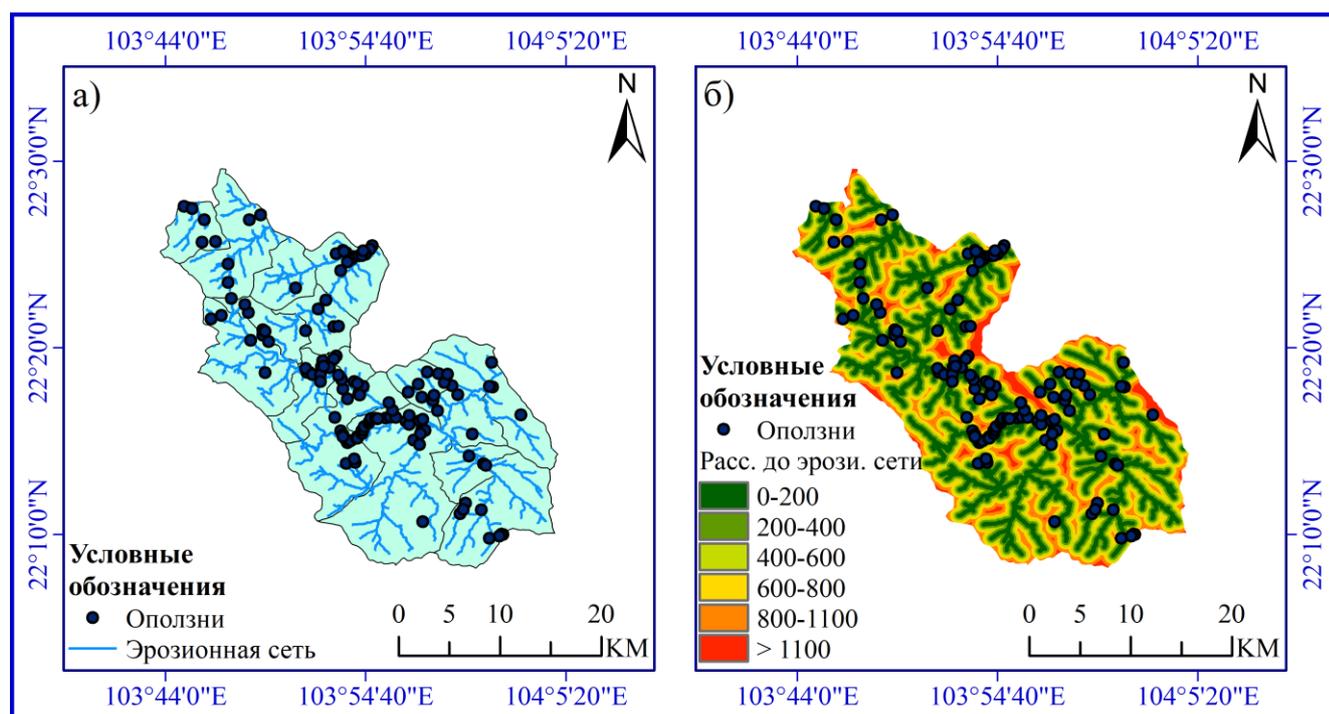


Рисунок 2.4 – Карты эрозионной сети (а) и расстояния до эрозионной сети (б)

Связь между расстоянием до эрозионной сети и распределением оползней приведена в Таблица 2.2. Ее анализ показывает, что большинство оползней (68,46% от общего количества) произошло в пределах расстояния 400 м от эрозионной сети.

*Таблица 2.2 – Связь между расстоянием до эрозионной сети и распределением оползней*

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Расстояние до эрозионной сети (м)	0 - 200	28,02	40,77
	200 - 400	22,99	27,69
	400 - 600	19,11	16,93
	600 - 800	14,32	6,15
	800 - 1100	11,84	6,15
	> 1100	3,73	2,31

### **2.3 Геоморфологические условия**

Рельеф рассматриваемой территории является сильно расчлененным. В целом геоморфологические условия района исследования находятся в соответствии с его геологической структурой. В рамках структурной зоны Фан Си Пан горные хребты, как правило, простираются с северо-запада на юго-восток.

#### **2.3.1 Высота над уровнем моря и крутизна склонов**

Высота над уровнем моря в районе исследования колеблется от 150 м до 3000 м (Рисунок 2.5а). Данный параметр косвенно связан с другими факторами, влияющими на возникновение оползней, включая: годовое количество осадков, изменения температуры, распределение растительности, процессы физического и химического выветривания грунтов [147].

Взаимосвязь между высотой над уровнем моря и распределением оползней показана в

Таблица 2.3. Анализ

Таблица 2.3 показывает, что большинство оползней происходило в районах с высотой над уровнем моря не более 1700 м (88,47%). Выше отметки 2000 м над уровнем моря оползни отсутствуют.

*Таблица 2.3 – Связь между высотой над уровнем моря и распределением оползней*

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Высота над уровнем моря (м)	< 800	9,69	22,31
	800 - 1100	13,19	20,77
	1100 - 1400	22,43	24,61
	1400 - 1700	23,83	20,77
	1700 - 2000	16,61	11,54
	> 2000	14,26	0

Крутизна склонов так же оказывает значительное влияние на оползневую опасность территории. Возрастание крутизны склонов, как правило, увеличивает вероятность их разрушения, в том случае если склоны сложены однородными, изотропными грунтами [176]. Карта крутизны склонов (Рисунок 2.5б) показывает, что зона с крутизной склонов от 20° до 40° покрывает 62,38% площади района исследования.

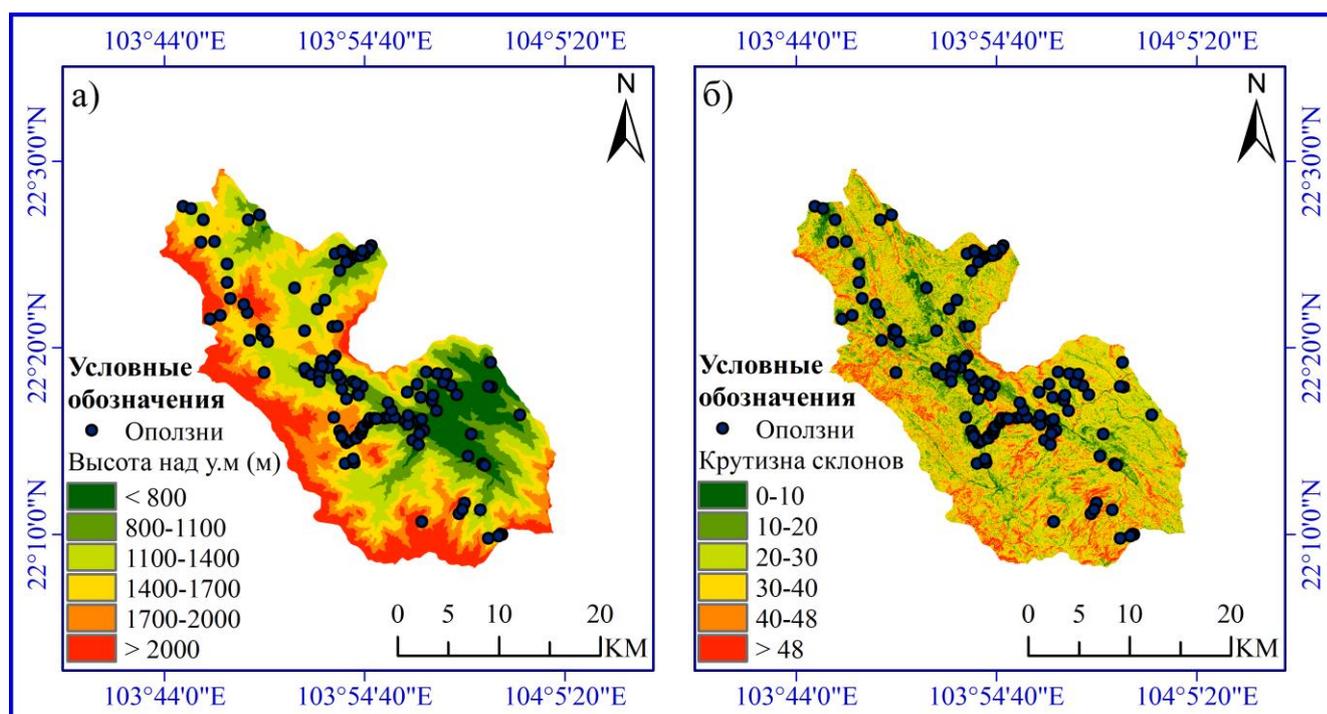


Рисунок 2.5 – Карты высоты над уровнем моря (а) и крутизны склонов (б)

Взаимосвязь между крутизной склонов и распределением оползней приведена в Таблица 2.4. Ее анализ показывает, что оползни происходили в основном в районах с крутизной склонов от 20° до 40° (61,54%), на зоны с крутизной склонов менее 20° приходится 26,15% от общего количества оползней.

Таблица 2.4 – Связь между крутизной склонов и распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Крутизна склонов (град.)	0 - 10	4,41	8,46
	10 - 20	14,34	17,69
	20 - 30	29,01	38,46
	30 - 40	33,37	23,08
	40 - 48	13,19	4,62
	> 48	5,69	7,69

### 2.3.2 Экспозиция и вертикальное расчленение рельефа

Экспозиция склона – морфометрическая характеристика рельефа, характеризующая пространственную ориентацию направления уклона. Карта экспозиции склонов в районе исследований приведена на Рисунок 2.6а.

Она влияет на влажность грунтов, их степень выветрелости, преобладающий на склоне тип растительности, количество осадков и солнечного излучения.

Ю. Горохович (2021) [107] указывал, что экспозицию склона следует учитывать в моделях оценки риска оползней, особенно в регионах, подверженных ураганам. Связь между экспозицией склонов и распределением оползней приведена в Таблица 2.5. Анализ карты экспозиции склонов и проявлений оползневых процессов (Рисунок 2.6а) показывает, что оползни происходят главным образом на склонах восточной, юго-восточной и южной экспозиции (47%).

*Таблица 2.5 – Связь между экспозицией склонов и распределением оползней*

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползней
Экспозиция склона	Плоский (П)	0,01	0
	Северный (С)	15,15	7,69
	Северо-восточный (С-В)	16,57	9,23
	Восточный (В)	13,80	18,46
	Юго-восточный (Ю-В)	11,28	13,85
	Южный (Ю)	10,05	14,61
	Юго-западный (Ю-З)	11,28	12,31
	Западный (З)	10,63	12,31
	Северо-западный (С-З)	11,23	11,54

Многочисленные исследования учитывают вертикальную расчлененность рельефа в качестве одного из важнейших факторов, определяющих оползневую опасность. Она определяется по разности высот водоразделов к глубине эрозионных врезов [67]. Карта вертикальной расчлененности рельефа в районе исследований приведена на Рисунок 2.6 б. Связь между вертикальной расчленённостью рельефа и распределением оползней показана в Таблица 2.6. Ее анализ позволяет сделать вывод, что оползни сосредоточены в районах с вертикальным расчленением рельефа менее 520 м/км<sup>2</sup> (78,46%).

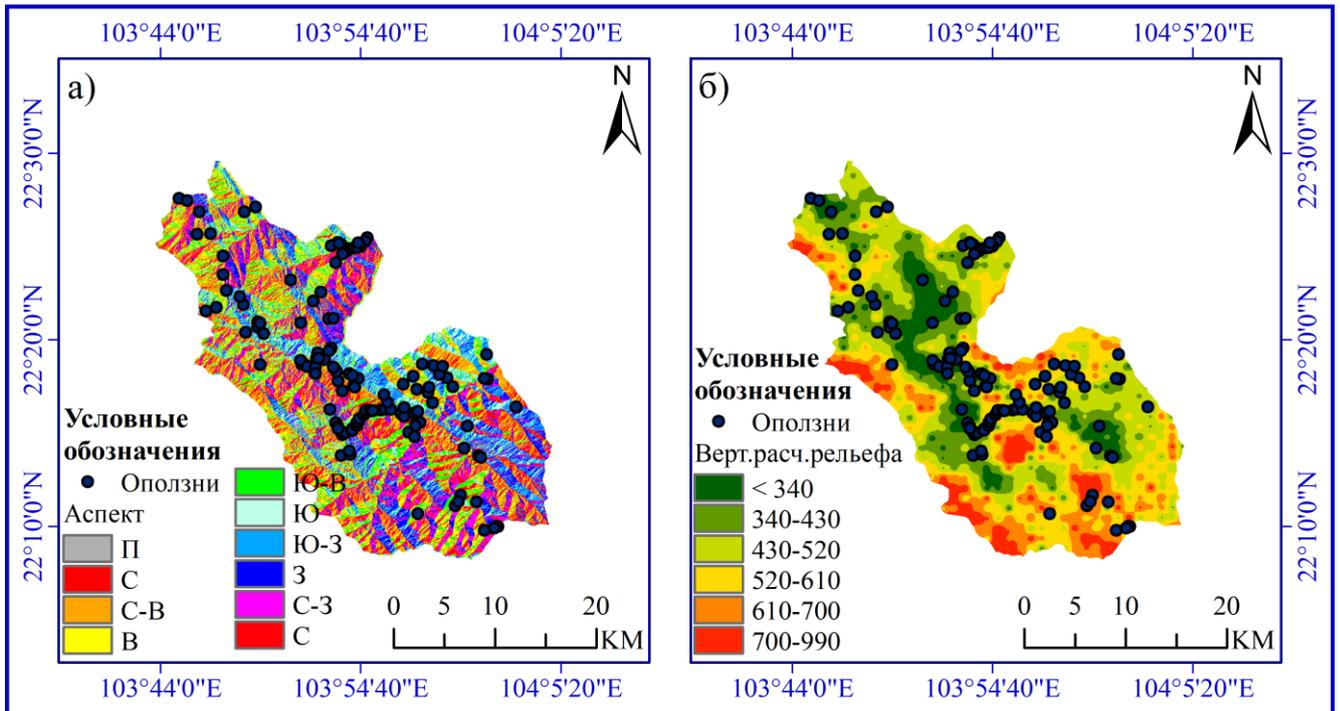


Рисунок 2.6 – Карты экспозиции склонов (а) и вертикального расчленения рельефа (б)

Таблица 2.6 – Связь между вертикальной расчленённостью рельефа и распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Вертикальное расчленение рельефа (м/км <sup>2</sup> )	<340	9,80	14,62
	340 - 430	19,81	28,46
	430 - 520	28,93	35,38
	520 - 610	22,26	16,15
	610 - 700	12,88	3,08
	700 - 990	6,31	2,31

## 2.4 Растительный покров

Растительный покров увеличивает устойчивость склонов за счет армирующего эффекта корневой системы на грунты, а также ограничивает развитие эрозионных процессов и контролирует избыточное переувлажнение грунтов на склоне. В последнее время естественные экосистемы в районе Шапа были значительно изменены в процессе землепользования [95]. Оползневые процессы, с одной стороны существенно снижают экологический и ресурсный потенциал при освоении территорий, с другой стороны, виды землепользования

являются фактором активизации оползневой процесс. Карта растительности и землепользования представлена на Рисунок 2.7. Связь между растительным покровом и распределением оползней приведена в

Таблица 2.7. Анализ таблицы показывает, что наибольшая плотность оползней наблюдается на техногенноизмененных территориях.

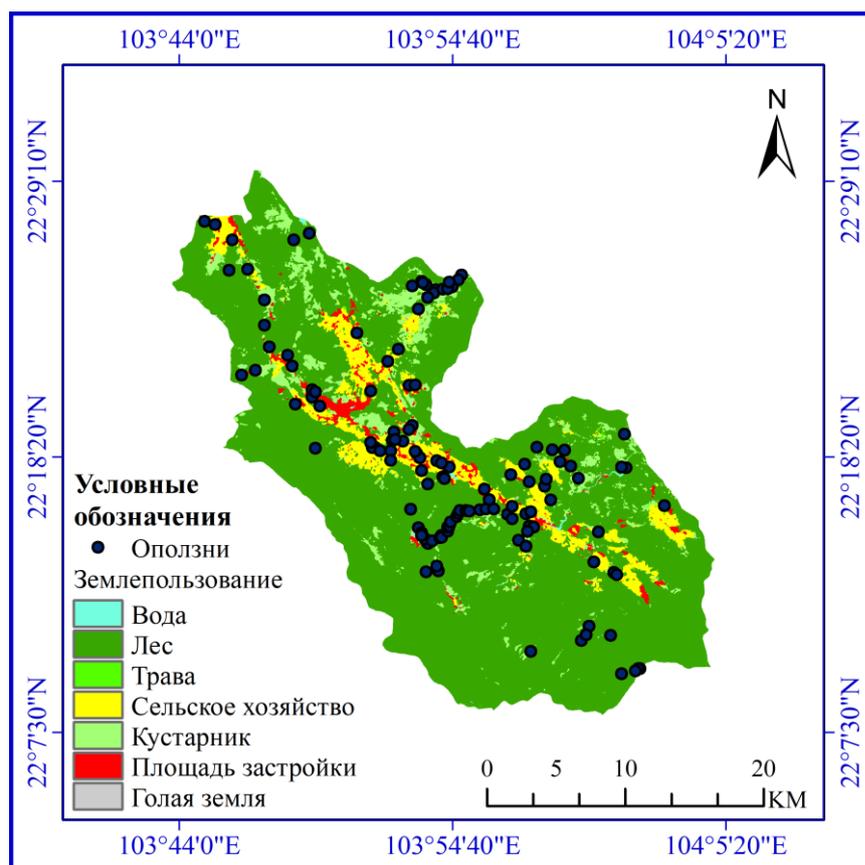


Рисунок 2.7 – Карта растительности

Таблица 2.7 – Связь между растительным покровом и распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Землепользование	Вода	0,24	0
	Лес	80,72	57,69
	Трава	0,12	0
	Сельское хозяйство	8,44	9,23
	Кустарник	7,73	18,46

	Площадь застройки	2,70	14,62
	Голая земля	0,05	0

## 2.5 Техногенное воздействие

Фруд и др. [103] показали, что количество оползней, вызванных деятельностью человека, увеличивается, особенно в связи со строительством, незаконной добычей полезных ископаемых и вырубкой лесов. Таким образом, техногенное воздействие увеличивает интенсивность оползневой опасности [210].

В районе исследования строительство дорог играет значительную роль в возникновении оползней, особенно в сезон дождей (Рисунок 2.8).

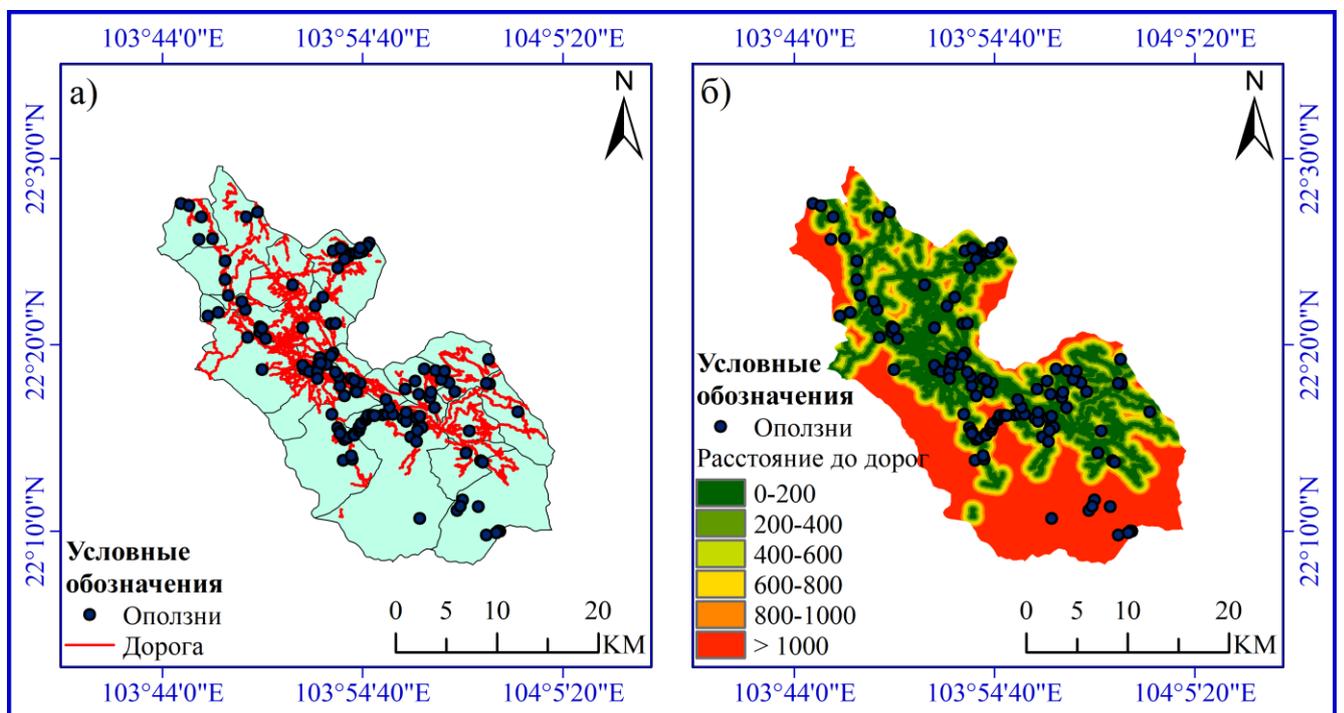


Рисунок 2.8 – Карты дорог (а) и расстояния до дорог (б)

Согласно Таблица 2.8, 72,31% от всех оползней произошло в пределах 200 м от дорог. Это демонстрирует, что земляные работы на склоне во время дорожного строительства значительно увеличили оползневую опасность в районе Шапа.

Таблица 2.8 – Связь между расстоянием до дорог и распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Расстояние до дорог (м)	0 - 200	30,78	72,31
	200 - 400	14,33	8,46
	400 - 600	9,04	3,08

	600 - 800	6,52	3,84
	800 - 1000	4,95	1,54
	> 1000	34,38	10,77

## 2.6 Особенности геологического строения и структурно-тектонические особенности

Северная часть Вьетнама образована следующими крупными тектоническими структурами – Катазиатской складчатой системой, подвижной частью Южно-Китайской платформы, Восточно-Индокитайской (Северо-Вьетнамской) складчатой системой.

На изучаемой территории преобладают геологические свиты и комплексы, сложенные магматическими и метаморфическими породами возрастом от протерозоя до четвертичного периода. В геологическом строении района было выделено девять геологических структур, основные характеристики которых, приведены в Таблица 2.9. На пять из них приходится более 97% площади района исследования: комплекс Йе Йен Сун (50,01%), комплекс По Сен (33,32%), свита Бан Нгуон (5,16%), свита Да Динь (4,50%) и свита Синь Куен (4,02%) (Рисунок 2.9 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

Таблица 2.9 – Характеристика геологических комплексов района исследования

Геологические свиты и комплексы	Возраст	Петрографический состав
Свита Суой Чиенг	PR <sub>1sc</sub>	Биотитовый гнейс, амфиболитовый гнейс с линзами амфиболита; железный кварцит, биотитовый гнейс с линзами амфиболита
Свита Синь Куен	PR <sub>2sq</sub>	Полевошпат-биотитовый сланец, биотит с кварцевой слюдой, слюдяно-графитовый сланец, биотит, полевошпатово-слюдяной сланец, тремолитовый мрамор
Свита Ша Па	PR <sub>3sp</sub>	Серицитовый сланец, серицитовый кварцевый сланец, серицит-талково-хлоритовый сланец, тальковый сланец с тонкими слоями мрамора, тремолитовый мрамор
Свита Да Динь	PR <sub>3dd</sub>	Мрамор, доломит и тремолитовый мрамор
Свита Кам Дыонг	ε <sub>1cd</sub>	Песчаник, кварц-карбонатный сланец, актинолитовый

		сланец, кварцит, конгломерат, кварц-сланцевый сланец и черный сланец
Свита Бан Нгуон	D <sub>1bn</sub>	Гравийный песчаник, кварц-полевошпатовый песчаник, серицитовый кварцевый сланец, полевошпатовый кварцевый серицитовый сланец
Свита Бан Пап	D <sub>2bp</sub>	Серый известняк, сланец, кремнистый сланец
Комплекс По Сен	$\gamma/PZ_{1ps}$	Аплит, полосчатый плагиогранит, диорит, гранодиорит, пегматитовые жилы
Комплекс Йе Йен Сун	$\gamma/E_{1ys}$	Биотитовый гранит, биотит-амфиболитовый гранит, пегматитовый гранит.
Четвертичные отложения	Q	Галька, гравий, песок, глина

В петрографическом составе пород преобладают: биотитовый гранит, биотит-амфиболитовый гранит, пегматитовый гранит, аплит, полосчатый плагиогранит, диорит, гранодиорит. Большинство оползней произошло в районах, сложенных комплексами По Сен и Йе Йен Сун (75,38%). Вероятно, это связано с особенностями процесса выветривания в этих комплексах (Таблица 2.10). В пределах зоны выветривания оползневой процесс развивается наиболее активно.

Таблица 2.10 – Связь геологического строения с распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползней
Геологические свиты и комплексы	PR <sub>1sc</sub>	0,01	0
	PR <sub>2sq</sub>	4,02	4,62
	PR <sub>3sp</sub>	1,69	1,54
	PR <sub>3dd</sub>	4,50	10,77
	$\epsilon_{1cd}$	0,60	1,54
	D <sub>1bn</sub>	5,16	5,38
	D <sub>2bp</sub>	0,66	0,77
	$\gamma/PZ_{1ps}$	33,32	28,46
	$\gamma/E_{1ys}$	50,01	46,92
	Q	0,04	0

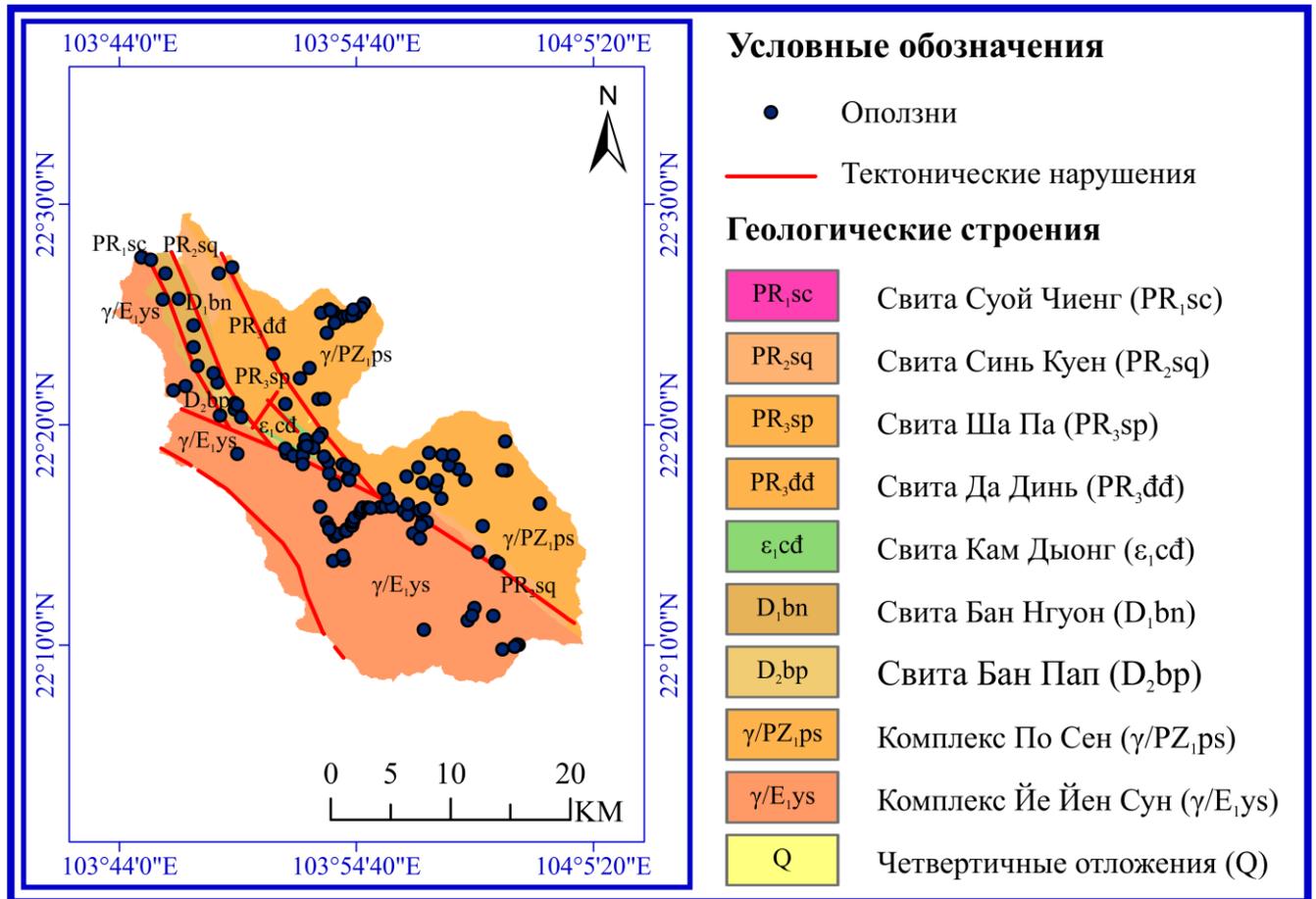
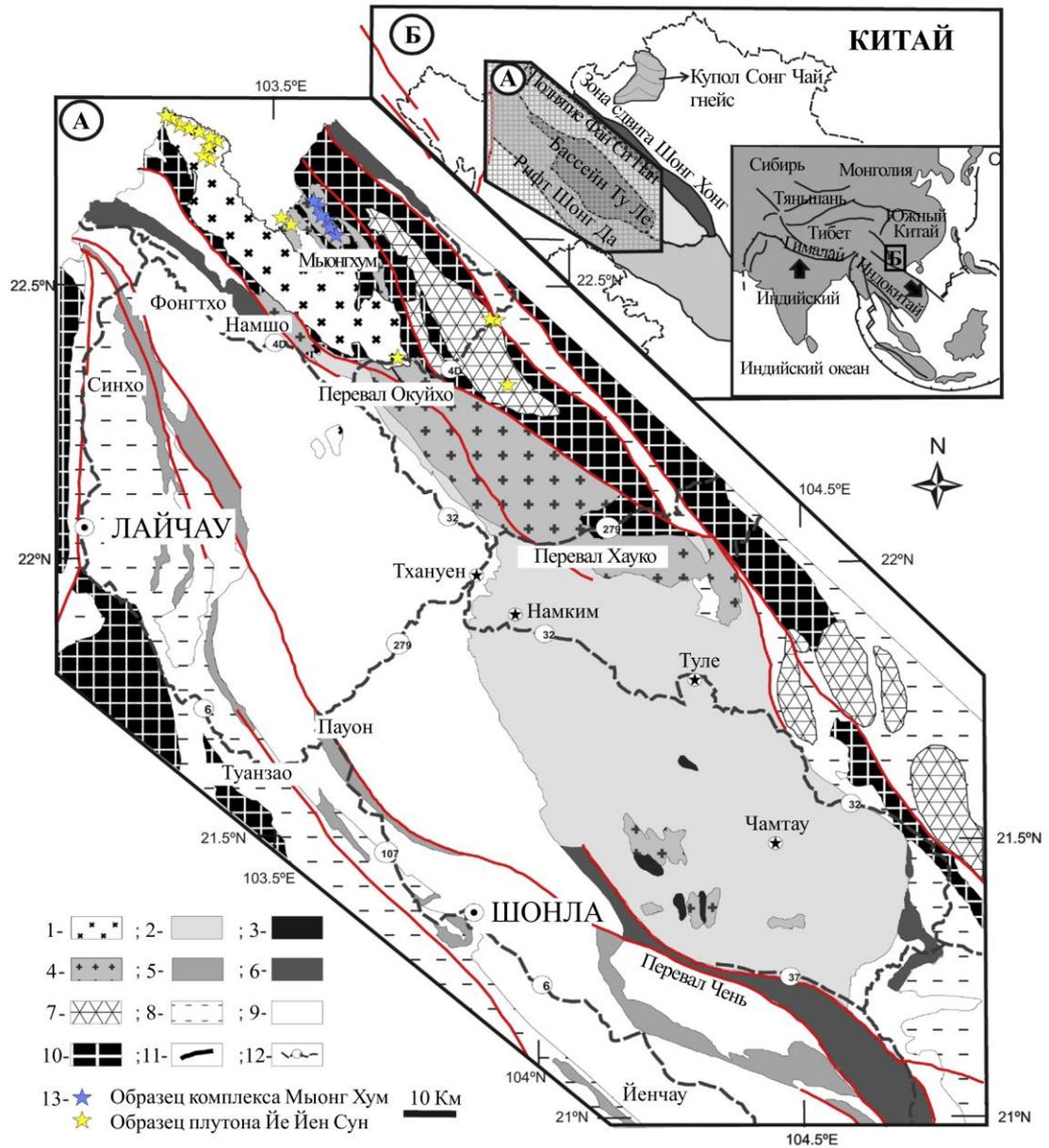


Рисунок 2.9 – Схема геологического строения района исследования (на основе геохронологической шкалы ICS-2018)

Северо-Западный Вьетнам представляет собой горный регион со сложной тектонической структурой, характеризующейся множеством активных разломов.

Район исследования находится в пределах поднятия Фан Си Пан [28]. Зона поднятия Фан Си Пан на северо-западе Вьетнама, является частью архейско-палеопротерозойского блока Янцзы (Южный Китай), который был смещен вдоль разлома Айлаошань – Шонг Хонг и связанных с ним структур зоны Шонг Да. Регион ограничен: на севере - зоной сдвига Айлаошань – Шонг Хонг (ASRR); на юге – бассейном Шонг Ма и бассейном Ту Ле [163].

Геологическая история региона сложна. Она состоит из архейских и неопротерозойских магматических комплексов, а также пермских и кайнозойских магматических комплексов. Местоположение и структурно-тектоническая схема поднятия Фан Си Пан показаны на Рисунок 2.10 (модифицированная по данным Чана и др., 2015г. [198] и Фама и др., 2020 г. [163]).



1 – Плутон Йе Йен Сун; 2 – Ту Ле риолиты; 3 – Пермские Фан Си Пан габбро и долерит; 4 – Комплексы Муонг Хум и Фан Си Пан; 5 – Пермский базальт Шонг Да с низким содержанием  $Ti$ , коматит; 6 – Пермский базальт Шонг Да с высоким содержанием  $Ti$ ; 7 – неопротерозойский гранит По Сен; 8 – Мезозойские образования; 9 – Палеозойская формация; 10 – Докембрийские метаморфические породы (Сом Зау, Део Кхе и Ка Винь Комплексы); 11 – Разломы; 12 – Дорога; 13 – Местоположение отбора образцов.

Рисунок 2.10 – Структурно-тектоническая схема поднятия Фан Си Пан

Тектоническая активность в регионе является одним из факторов развития оползневой процесса. Кроме того, зоны разломов могут являться областями повышенного водопритока, что так же способствует развитию оползневой процесса [164]. Связь оползней с разломной тектоникой в районе Шапа показана

на Рисунок 2.11. Согласно Таблица 2.11, оползневой процесс наиболее активен на расстоянии до 1000 м от зон разломов.

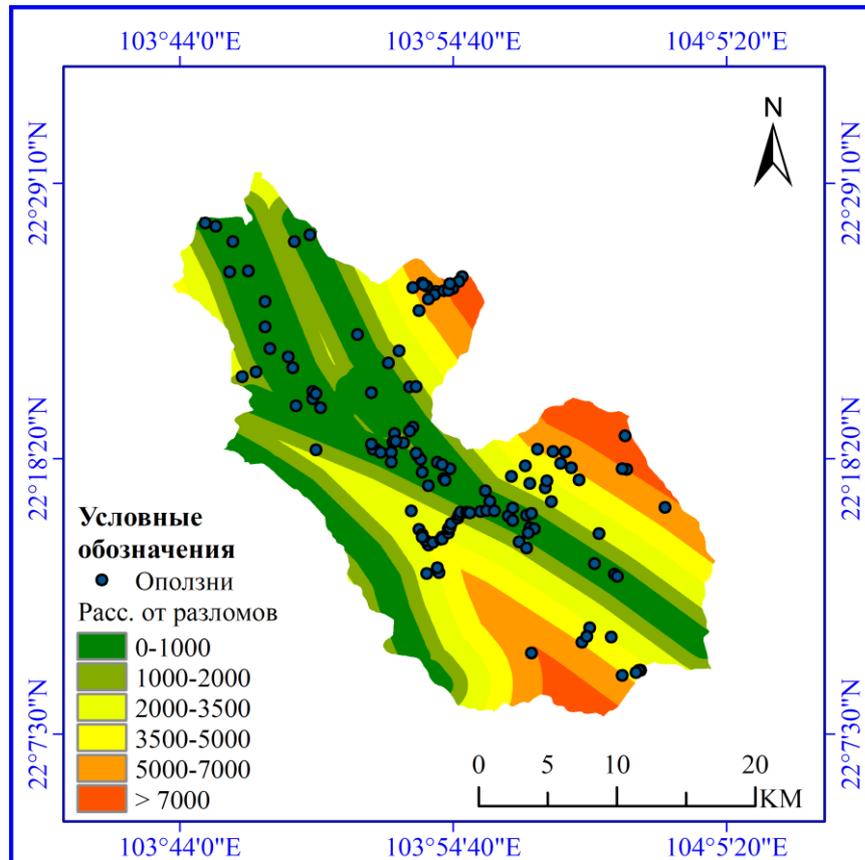


Рисунок 2.11 – Связь оползней с разломной тектоникой

Таблица 2.11 – Связь между расстоянием от разломов и распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Расстояние от разломов (м)	0 - 1000	32,12	43,08
	1000 - 2000	20,72	11,54
	2000 - 3500	17,45	10,77
	3500 - 5000	12,12	16,92
	5000 - 7000	11,91	12,31
	> 7000	5,68	5,38

## 2.7 Сейсмическая активность

Вьетнам расположен в Юго-Восточной Азии и граничит с Тихоокеанской и Средиземноморско-Гималайской сейсмическими зонами соответственно. Сейсмичность Вьетнама считается средней. Наиболее сейсмически активным

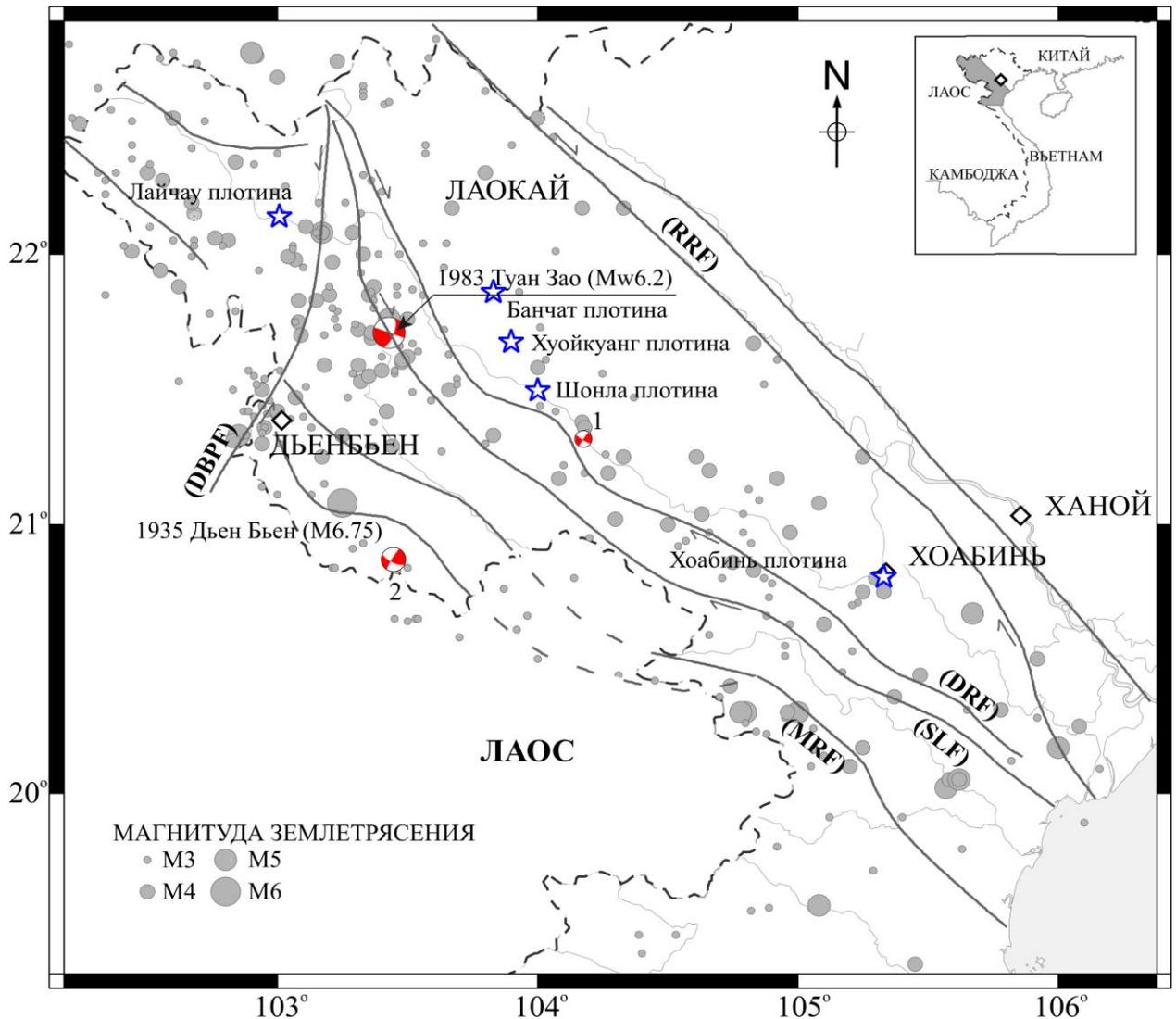
является Северо-Западный Вьетнам [152]. Как правило, эпицентры землетрясений в данном регионе приурочены к зонам активных разломов включая: Дьен Бьен Фу (DBPF), Шон Ла (SLF), Шонг Ма (MRF), Шонг Да (DRF) и Шонг Хонг (RRF).

Карта системы разломов и сейсмичности Северо-Западного Вьетнама (с 1903 по апрель 2012 года) приведена на Рисунок 2.12 [151].

Согласно Шону (2012 г.) [30] и базе данных землетрясений Вьетнамского института геофизики, в период с 1903 по апрель 2012 года в окрестностях зон активных разломов произошло 332 землетрясения с локальными магнитудами от 3,0 до 6,8. Крупнейшими из них являются - землетрясение Дьен Бьен 1935 года ( $M_{6,75}$ ) на северо-западе MRF близ города Дьенбьенфу и землетрясение Туан Зао ( $M_{6,2}$ ) 24 июня 1983 года на северо-западе SLF близ города Туанзао. В результате этих землетрясений был зафиксирован значительный ущерб зданиям и инфраструктуре, а также была отмечена активизация оползневой процесса [39].

Многочисленные землетрясения интенсивностью порядка VII- VIII баллов (по шкале MSK) такие как: Лай Чау в 1914 году, Дьен Бьен Фу в 1920 году, Шон Ла в 1926 году, Хоа Бинь в 1989 году, Та Кхоа в 1991 году, Лай Чау в 1993 году и Муонг Луан в 1996 году [29], стали причиной развития опасных геологических процессов, включая оползни, на обширных территориях.

Следует отметить и возросшую активность техногенных землетрясений. Например, землетрясение Хоа Бинь  $M_{4,9}$ , произошедшее в 1989 году, через несколько месяцев после заполнения водохранилища [40], и землетрясение Та Кхоа  $M_{5,1}$  1991 года. Таким образом, крайне важно уделять пристальное внимание явлениям индуцированной сейсмичности в районе исследования.



(1) землетрясение Муонг Ла в 2009 году  $M_w 3,6$ ; (2) землетрясение Соп Коп в 2010 году  $M 4,8$ . Толстые сплошные и пунктирные линии - основные разломы, тонкие линии – реки, символы в виде ромбов и звезд обозначают города и плотины гидроэлектростанций соответственно, серые круги – эпицентры землетрясений.

*Рисунок 2.12 – Карта разломов и сейсмичности Северо-Западного Вьетнама (1903 по 2012 гг)*

## 2.8 Особенности гидрогеологических условий

Подземные воды играют решающую роль в образовании и развитии оползней за счет снижения прочности грунта и увеличения порового давления [215].

В районе исследований выделяются следующие основные водоносные комплексы:

1. Мало-обводненные массивы грунтов.
2. Средне-обводненные массивы грунтов.

### 3. Сильно-обводненные массивы грунтов.

Связь оползней с гидрогеологическими особенностями приведена на Рисунок 2.13 и в Таблица 2.12, анализ которой показывает, что наибольшее количество оползней связано с мало обводненными массивами грунтов. Этот факт может быть объяснен тем, что обводненность скальных массивов мало влияет на развитие оползневого процесса, приуроченного к отложениям элювиально-делювиального генезиса, содержание воды в которых определяется главным образом атмосферными осадками.

Таблица 2.12 – Связь между обводненностью скальных массивов и распределением оползней

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Гидрогеология	Мало обводненные	46,42	62,31
	Средне обводненные	19,77	12,31
	Сильно обводненные	33,81	25,38

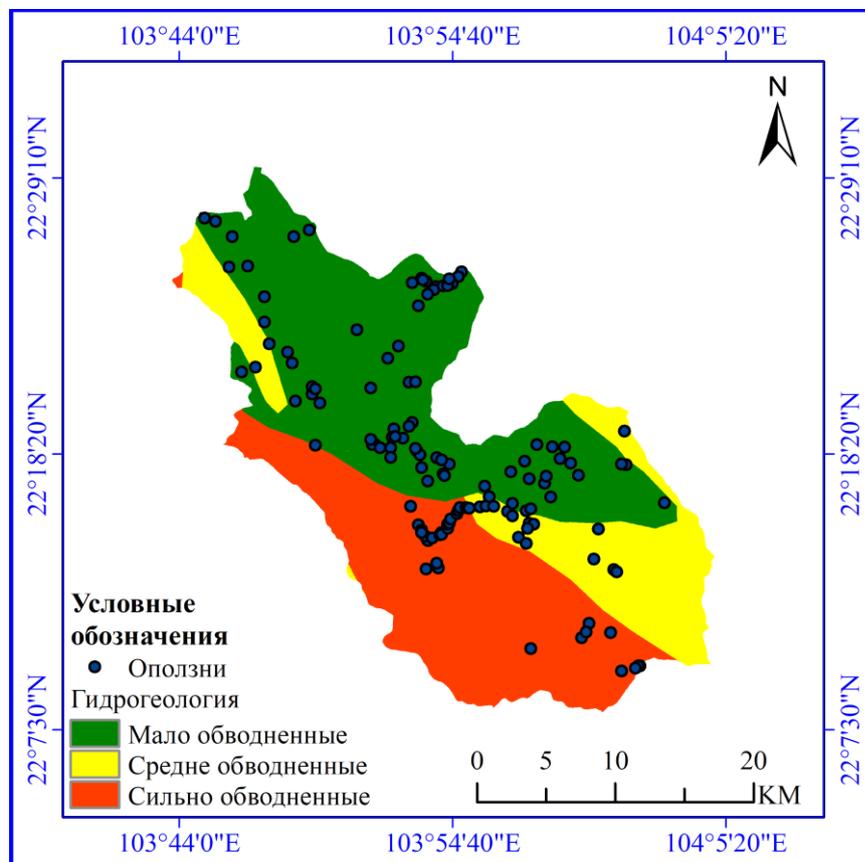


Рисунок 2.13 – Связь оползней с гидрогеологическими особенностями

## 2.9 Современные экзогенные процессы в районе исследования

Геологическое строение и климатические условия северо-западного Вьетнама благоприятны для развития разнообразных геологических процессов, таких, как выветривание, эрозия, оползни, осыпи, обвалы, сели и др.

### 2.9.1 Выветривание

Согласно Г. К. Бондарик и др., [5] активизация и развитие вторичных геологических процессов, включая гравитационные, значительно зависят от первичного геологического процесса – выветривания (Рисунок 2.14).

Выветривание – геологический процесс взаимодействия горных пород, слагающих приповерхностную часть земной коры, с космосом, атмосферой, биосферой и искусственными компонентами природной среды. Несмотря на явную зависимость оползневого процесса от выветривания, прямые и не прямые связи между ними все еще до конца не определены [80].

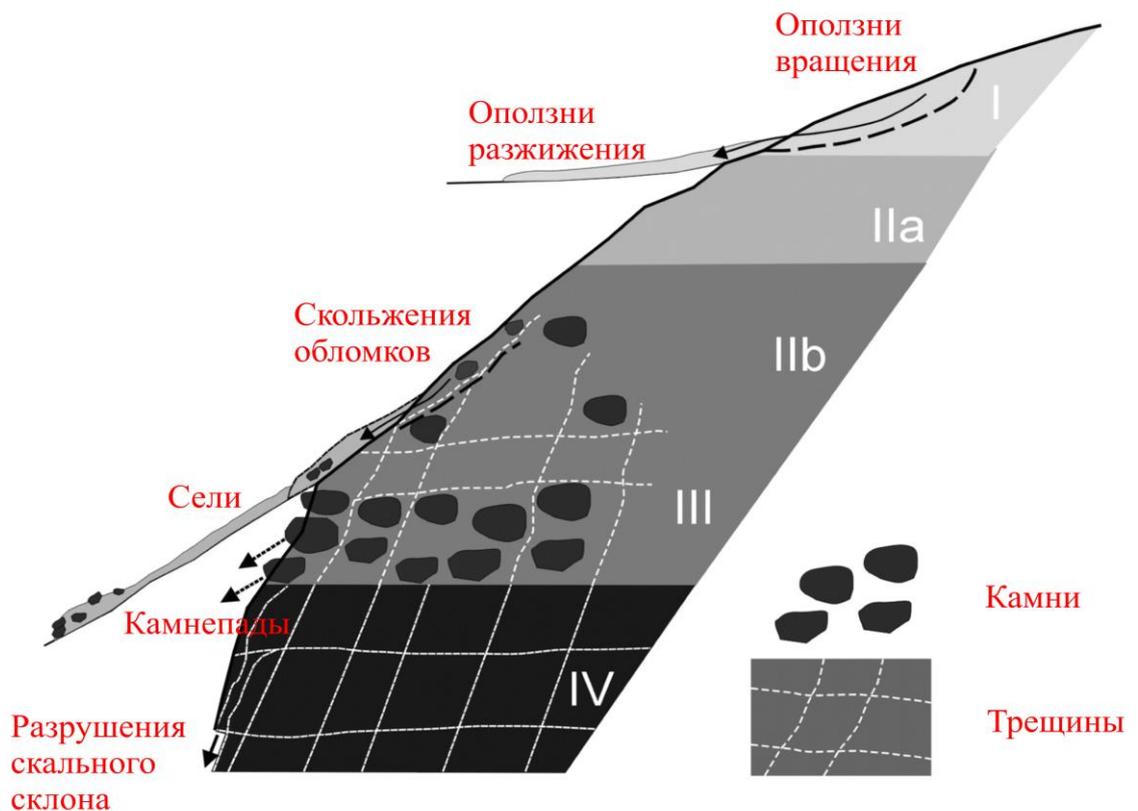


Рисунок 2.14 – Выветривание и вторичные геологические процессы

В условиях тропического климата изменение горных пород при выветривании происходит за счет химических процессов, развитию которых

благоприятствуют климатические условия [45]. При этом характер пространственной изменчивости мощности коры выветривания определяется рядом факторов: условиями формирования, составом и структурно-текстурными особенностями материнских пород; раздробленностью последних в пределах зон тектонических нарушений, ландшафтом местности, от которого зависят условия инфильтрации поверхностных вод и поверхностного сноса материала.

В районе Шапа с геохимической точки зрения развиты четыре типа коры выветривания (Рисунок 2.15):

- Сапролитовая кора выветривания: измененная в результате химического выветривания, потерявшая первоначальную прочность, но сохранившая свои структурные признаки материнская горная порода.
- Сиалитовая кора выветривания: каолинит – гидрослюда.
- Сиалферритовая кора выветривания: гиббсит – гётит – гидрослюда – каолинит – монтмориллонит.
- Ферросиалитовая кора выветривания: каолинит – гётит – монтмориллонит.

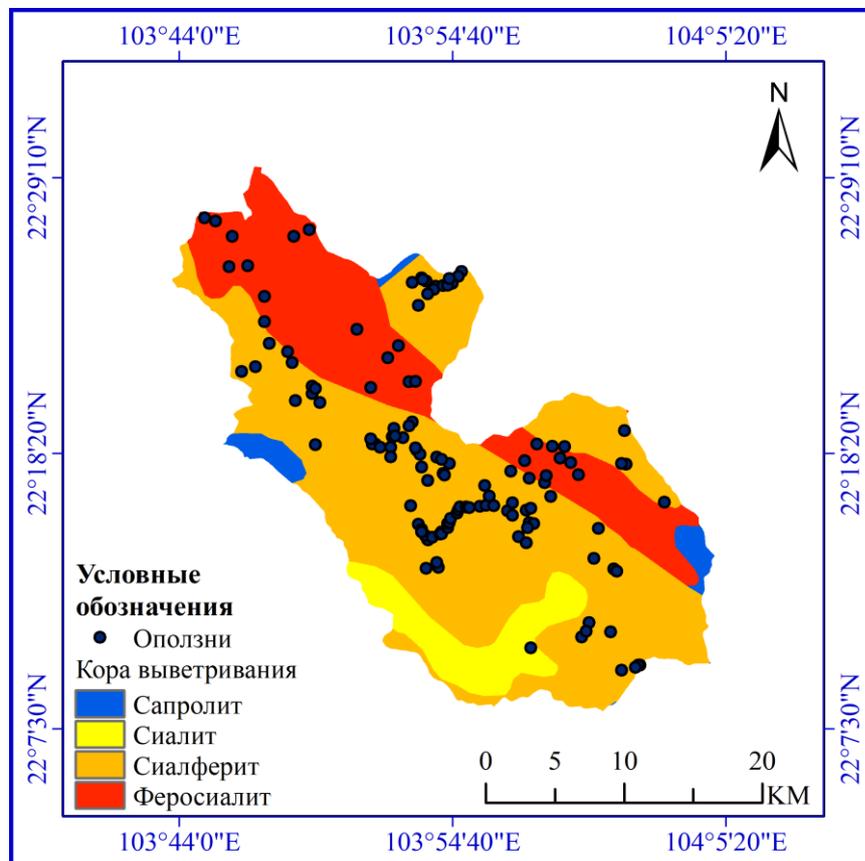


Рисунок 2.15 – Связь оползней с типом коры выветривания

Тип коры выветривания - важный фактор, влияющий на возникновение оползней [119]. В большинстве горных районов Вьетнама оползни происходят в результате обводнения коры выветривания в процессе выпадения атмосферных осадков. Анализ Таблица 2.13 показывает, что большинство оползней связано с сиалферитной корой выветривания (82,31%).

*Таблица 2.13 – Связь между типом коры выветривания и распределением оползней*

Фактор	Класс	% площадь класса	% оползень
Кора выветривания	Сапролит	2,60	0
	Сиалит	8,26	0,77
	Сиалферит	62,62	82,31
	Феросиалит	26,52	16,92

### **2.9.2 Эрозионные процессы**

Процессы эрозии широко распространены во всем мире и оказывают прямое влияние на продуктивность всех природных экосистем, а также сельского и лесного хозяйства [133].

Согласно Дангу и др. [95], в районе Шапа эрозия происходит в основном вдоль небольших ручьев. Площадная пораженность территории эрозионным процессом на некоторых участках (например, вокруг горы Хам Ронг и в национальном парке Хоанг Лиен) достигает 15%. Почти треть террасных рисовых полей находится в районах с высоким и очень высоким риском поражения процессом эрозии. Очень высокий риск эрозии также был спрогнозирован на крутых склонах, соединяющих деревню Хаутхао с национальной дорогой 4D в восточной части горы Хам Ронг. Риск эрозии значительно снижается в равнинной местности, например центр Шапа и деревня Тафин.

Эрозия определяет горизонтальную расчлененность рельефа и, в перспективе, способствует активизации оползневых процессов.

### **2.9.3 Селевые процессы**

Сели являются одной из наиболее разрушительных геологических опасностей в мире. Селевой процесс характеризуется внезапностью, большой скоростью и может приводить к катастрофическим последствиям [181]. В Таблица

2.14 приведена статистика по селям в районе исследования, которые привели к социальному и материальному ущербу.

*Таблица 2.14 – Статистика селевых процессов в районе исследования*

Район	Дата	Количество разрушенных зданий	Социальный ущерб (число погибших и пострадавших)
Коммуна Тазянгфинь	08.1993	-	8 погибших
Коммуна Тазянгфинь	08.1993	13 домов	18 погибших
Коммуны Шупан, Банхо, Тханьким, Банфунг, Тханьфу, Шуойтхау, Намшай	15.07.2000	60 домов	20 погибших
Тханьким	08.2000	-	-
Коммуна Чунгчай	09.2004	-	-
Коммуна Банкхоанг	04.09.2013	10 домов	11 погибших
Коммуна Таван	12.08.2017	-	3 погибших
Коммуна Банхо	24.06.2019	20 домом	-
Перевал Окуйхо	15.07.2021	-	-
<b>Сумма</b>		<b>103 дома</b>	<b>60 погибших</b>

Согласно результатам обследования и анализу полученной информации, возникновению селей в районе исследования способствуют следующие факторы:

- Большое непрерывное количество осадков;
- Крутизна склонов;
- Наличие рыхлых пылевато-глинистых размываемых пород;
- Интенсивное выветривание;
- Склоновые процессы;
- Сейсмичность;
- Уничтожение растительности;
- Строительные работы на селеопасных участках.

Селевая опасность в районе исследования очень высокая (Рисунок 2.16). Это делает необходимым разработку превентивных мероприятия для минимизации ущерба.



Рисунок 2.16 – Сели в коммуне Банхо (2019) (а) и на перевале Окуйхо (2021) (б)

#### 2.9.4 Оползневые процессы

Район Шапа подвергся наибольшему разрушительному воздействию оползневых процессов по сравнению с другими районами северного Вьетнама. Большинство оползней были вызваны сильными осадками и произошли на крутых горных склонах, в небольших и узких долинах и вдоль системы дорог [195]. Оползни в Шапе, привлекли значительное внимание в последние десятилетия из-за большого числа смертей и ущерба инфраструктуре которые они вызвали. Хотя возникновение оползней вызвано различными факторами, именно инженерно-хозяйственная деятельность человека, значительно увеличила оползневую опасность в районе исследований [95].

Оползень Монгсен (Рисунок 2.17а), активизировавшийся в 1998, 2000, 2002, 2009 гг., является наиболее известным оползнем в районе исследования. Он расположен на национальной дороге 4D, соединяющей город Лаокай и район Шапа.

5 августа 2019 г. на км 9+100 провинциальной дороги 152, соединяющей районный центр Шапа с коммуной Хаутхао, произошел оползень, в результате которого погиб один человек (Рисунок 2.17б). 19 августа 2020 г. в результате оползня в деревне Тачунгхо коммуны Банхо также погиб один человек.

Наряду с осадками техногенная деятельность (перенаправление систем поверхностного дренажа, земляные работы на склонах в процессе дорожного строительства) также способствует активизации оползней в районе исследования. Примером является оползневой массив вдоль провинциальной дороги 152, на км

12+600–км 12+900, в районе коммуны Чунгчай (Рисунок 2.17в). На момент обследования в пределах оползневого массива наблюдались трещины и смещения.

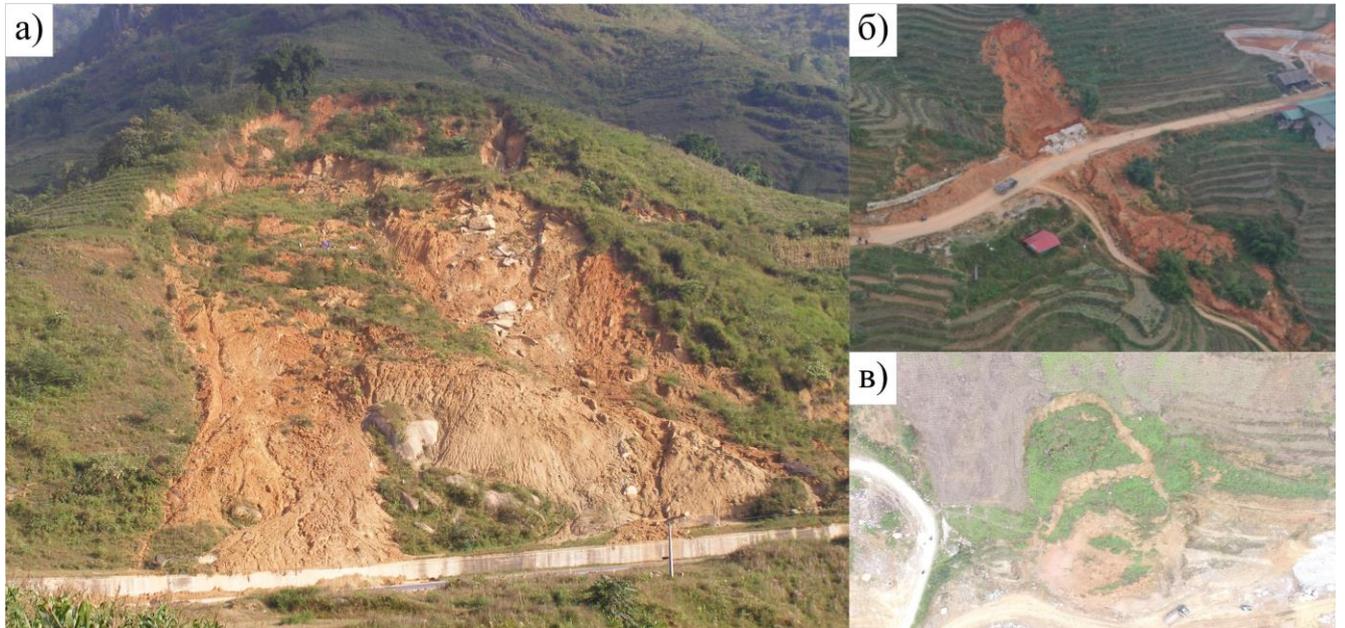
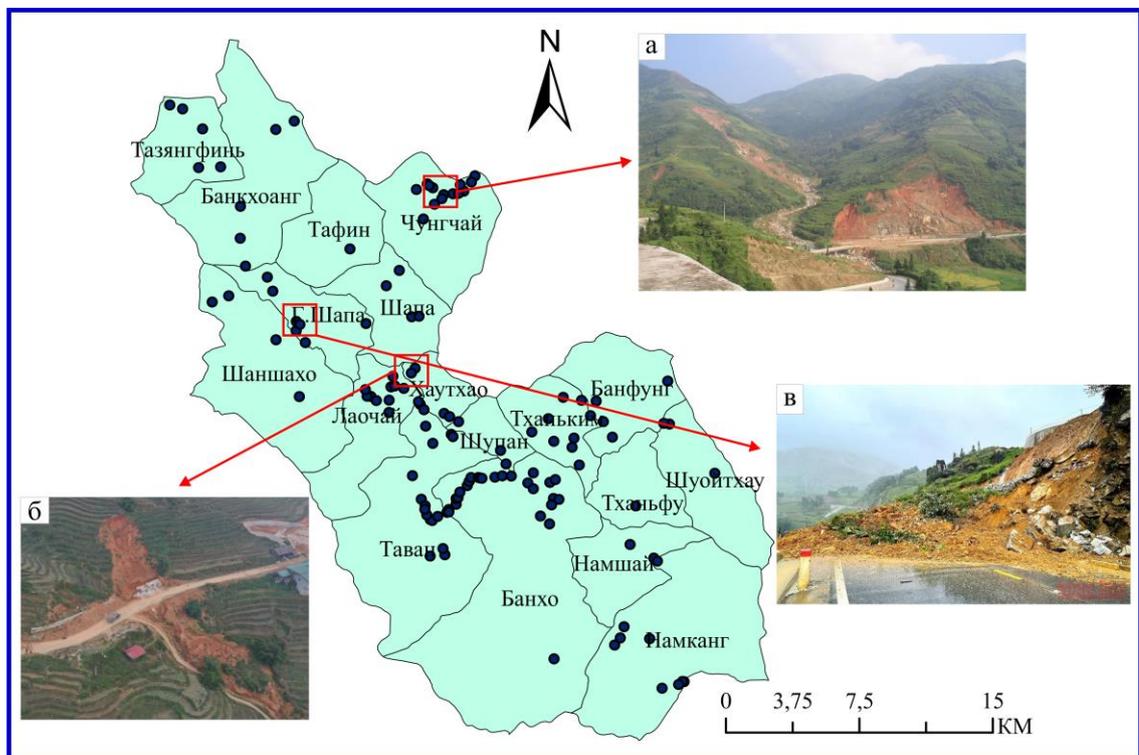


Рисунок 2.17 – Фотографии оползня Монгсен (а), оползня в коммуне Хаутхао (б) и оползня в коммуне Чунгчай (в)

В районе исследования было выявлено и нанесено на карту инвентаризации 130 местоположений оползней (Рисунок 2.18).



(а) Оползень в коммуне Чунгчай, (б) Оползень в коммуне Хаутхао, (в) Оползень в г. Шапа

Рисунок 2.18 – Карта инвентаризации оползней в районе Шапа

Статистический анализ данных об оползнях показал, что площадь самого большого оползня составляет около 70.447,4 м<sup>2</sup>, в то время как площадь самого маленького оползня - около 395,6 м<sup>2</sup>. Большие оползни (>10.000 м<sup>2</sup>) составляют 20,77%, в то время как средние оползни (1000–10000 м<sup>2</sup>) составляют 75,38% от общего количества оползней. Около 3,84% оползней имеют размеры менее 1000 м<sup>2</sup>.

В Таблица 2.15 приведена статистика по оползням в районе исследования, которые привели к социальному и материальному ущербу.

*Таблица 2.15 – Статистика оползневых процессов в районе исследования*

Район	Дата	Количество разрушенных зданий	Социальный ущерб (число погибших и пострадавших)
Коммуна Чунгчай	24.07.1998	3 дома	8 погибших, 7 пострадавших
Коммуна Тханьким	08.2000	-	-
Коммуна Таван	06.01.2003	1 дом	2 погибших, 2 пострадавших
Коммуны Банхо,	2004	3 дома	7 погибших
Коммуна Тханьким	08.2004	-	-
Коммуна Чунгчай	09.2004	-	2 погибших
Коммуна Лаочай	2005	-	-
Коммуна Намшай	18.08.2006	1 дом	1 погибший, 1 пострадавший
Коммуна Таван	06.2013	-	-
Перевал Окуйхо	23.08.2016	3 дома	1 пострадавший
Коммуна Хаутхао	05.08.2019	4 дома	1 погибший
Коммуна Чунгчай	05.2020	-	-
Коммуна Банхо	19.08.2020	-	1 погибший, 3 пострадавших
<b>Сумма</b>		<b>15 домов</b>	<b>22 погибших, 14 пострадавших</b>

Оползневая опасность в районе исследования очень высокая. Это делает необходимым повышение достоверности методов ее и разработку превентивных мероприятия для минимизации ущерба.

## **Выводы**

Целью данной главы было определение условий оползнеобразования в

районе исследований. В качестве «основных», для района Шапа, на основе опыта региональных оценок оползневой опасности территории Вьетнама, как правило используются следующие факторы-условия:

- Климатические условия;
- Гидрография;
- Геоморфологические условия;
- Растительный покров;
- Техногенные воздействия;
- Особенности геологического строения и структурно-тектонические особенности ;
- Сейсмическая активность;
- Особенности гидрогеологических условий;
- Современные экзогенные процессы.

Их анализ позволил выявить следующие закономерности:

1. Периоды образования и активизации оползней совпадают с периодами дождей.
2. Большинство оползней (68,46% от общего количества) произошло в пределах расстояния 400 м от эрозионной сети.
3. Большинство оползней происходило в районах с высотой над уровнем моря не более 1700 м (88,47%), выше отметки 2000 м над уровнем моря оползней практически отсутствуют.
4. Оползней происходили в основном в районах с крутизной склонов от 20° до 40° (61,54%), на зоны с крутизной склонов менее 20° приходится 26,15% от общего количества оползней.
5. Оползней происходят главным образом на склонах восточной, юго-восточной и южной экспозиции (47%) и сосредоточены в районах с вертикальным расчленением рельефа менее 520 м/км<sup>2</sup> (78,46%).
6. Наибольшая плотность оползней наблюдается на застроенных территориях, 72,31% от всех оползней произошло в пределах 200 м от дорог.
7. Большинство оползней произошло в районах, сложенных геологическими

комплексами По Сен и Йе Йен Сун (75,38%).

8. Оползневой процесс наиболее активен на расстоянии до 1000 м от зон разломов, а приуроченные к зонам разломов землетрясения интенсивностью порядка VII–VIII баллов по шкале MSK стали причиной развития оползневого процесса.

9. Обводненность скальных массивов мало влияет на развитие оползневого процесса в элювиально-делювиальных отложениях, наличие воды в которых определяется главным образом атмосферными осадками.

10. Большинство оползней связано с сиалферритной корой выветривания (82,31%).

11. Эрозия определяет горизонтальную расчлененность рельефа и, в перспективе, способствует активизации оползневых процессов.

Условия района исследования способствуют образованию и развитию оползневого процесса, что привело к значительным человеческим жертвам и материальным потерям.

## ГЛАВА 3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ

### 3.1 Общие положения

При исследовании оползневой опасности наибольшее внимание уделяется изучению следующих проблем [185]: восприимчивости (подверженности) территорий к оползневому процессу, оценке оползневой опасности и риска. Для их решения, за последние годы, в разных странах, разными исследователями были разработаны новые методы комплексного анализа.

Внедрение в практику исследований дистанционного зондирования статистического и математического моделирования придало новый аспект исследованиям оползневой опасности. До их появления при изучении оползней эффективно использовались преимущественно эвристические методы, методы аналогий и методы, основанные на физических процессах, даже несмотря на недостаток или низкое качество исходных данных и малую пригодность для оценки оползневой опасности больших территорий.

Так как большинство из современных методов исследования требуют обработки значительных массивов данных и сложных вычислений, все большее применение находят методики, основанные на использовании геоинформационных систем (ГИС) с внедрением которых моделирование оползневой опасности и риска стало доступным, удобным и возможным как при научном анализе, так и при экономической оценке прогнозного освоения территорий [45].

Разработка карт оползневой опасности является важнейшим первым шагом в стратегии минимизации последствий оползневых бедствий и уменьшения рисков при развитии городов, планировании землепользования [196]. В результате создано большое количество прогнозных карт оползневой опасности, выполненных на основе технологии ГИС. На Google Scholar существует более 22 тыс. 700 результатов для ключевого слова «GIS Landslide» (дата обращения: 3 апреля 2017 г.) [216].

Методы оценки оползневой опасности основаны на следующих основных принципах и предположениях [84, 120, 211]:

1. Изменения поверхности местности, вызванные разрушениями склонов, могут быть идентифицированы, классифицированы и закартированы на основе полевых работ по оползневой съемке в сочетании с технологиями дистанционного зондирования.

2. Развитие оползневого процесса подчиняется определенным закономерностям и может быть спрогнозировано с использованием эмпирических, статистических и детерминистических моделей. Обуславливающие факторы и триггеры оползней (причины дестабилизации) могут быть определены и использованы при создании моделей оползневой опасности.

3. Принцип актуализма является главным постулатом геологии и предполагает, что факторы, которые приводили к разрушениям склонов в прошлом и настоящем, могут вызвать оползни в будущем. Таким образом, знание исторических оползневых событий играет важную роль в прогнозировании оползневой опасности.

4. Эвристические методы, анализ геологической информации, математическое и физическое моделирование могут быть использованы для оценки вероятности возникновения оползней в пространстве и во времени.

Исходя из результатов этой оценки, исследуемая территория может быть классифицирована на зоны с различным уровнем оползневой опасности.

Гуццетти, Ф., [111] утверждал, что без всех этих допущений полезность оценок оползневой опасности была бы ограниченной, независимо от используемой методологии. В тоже время, практика исследований оползней показала, что удовлетворительное применение этих принципов при оценке оползневой опасности может стать серьезной проблемой.

При выборе наиболее эффективного метода следует учитывать несколько аспектов [89]:

1. Выбор метода следует основывать на доступных данных и масштабе анализа. Рекомендуется избегать использования несовместимых с масштабом исследования методов и данных. Например, при мелкомасштабной оценке оползневой опасности не рекомендуется использовать геотехнические подходы,

основанные на численном моделировании устойчивости, при отсутствии надежной информации о физико-механических свойствах грунтов и геологическом строении территории.

2. Возникновение и развитие различных типов оползней зависит от различных сочетаний природных и техногенных факторов, которые должны быть учтены в анализе. В этом случае, при выполнении исследований в масштабе, когда это становится возможным, инвентаризацию оползней следует выполнять с учетом механизма оползневого процесса, выделяя группы оползней на основе их типа.

3. Не рекомендуется использовать фактические данные, не связанные с развитием оползневого процесса. Например, чтобы определить связь оползневого процесса с изменениями в землепользовании, необходимо использовать карту ситуации до начала развития оползневого процесса, а не после.

4. Наконец, многие методы оценки оползневой опасности основаны на постоянстве принципа актуализма. Однако, как следует из аналогии с финансовыми рынками, «результаты, полученные в прошлом, не являются гарантией на будущее». Согласно Пуанкаре «...нет ни одного закона, о котором мы могли бы с уверенностью сказать, что в прошлом он был верен с той же степенью приближения, что и сейчас» [53]. Факторы-условия, вызвавшие оползни в прошлом, со временем меняются и эти изменения необходимо учитывать.

Существующие, в настоящее время, методы оценки оползневой опасности можно классифицировать на прямые и косвенные, качественные и количественные [111, 185]. Следует иметь в виду, что существует принципиальная возможность перевода всей качественной информации в количественную форму. Кроме того, сочетание качественного и количественного подходов известно как полуколичественный или гибридный подход.

Качественные подходы основаны на эвристических методах оценки, на анализе карт инвентаризации оползней, геоморфологическом анализе [89, 170]. Они, как правило, находят применение при региональной оценке оползневой опасности.

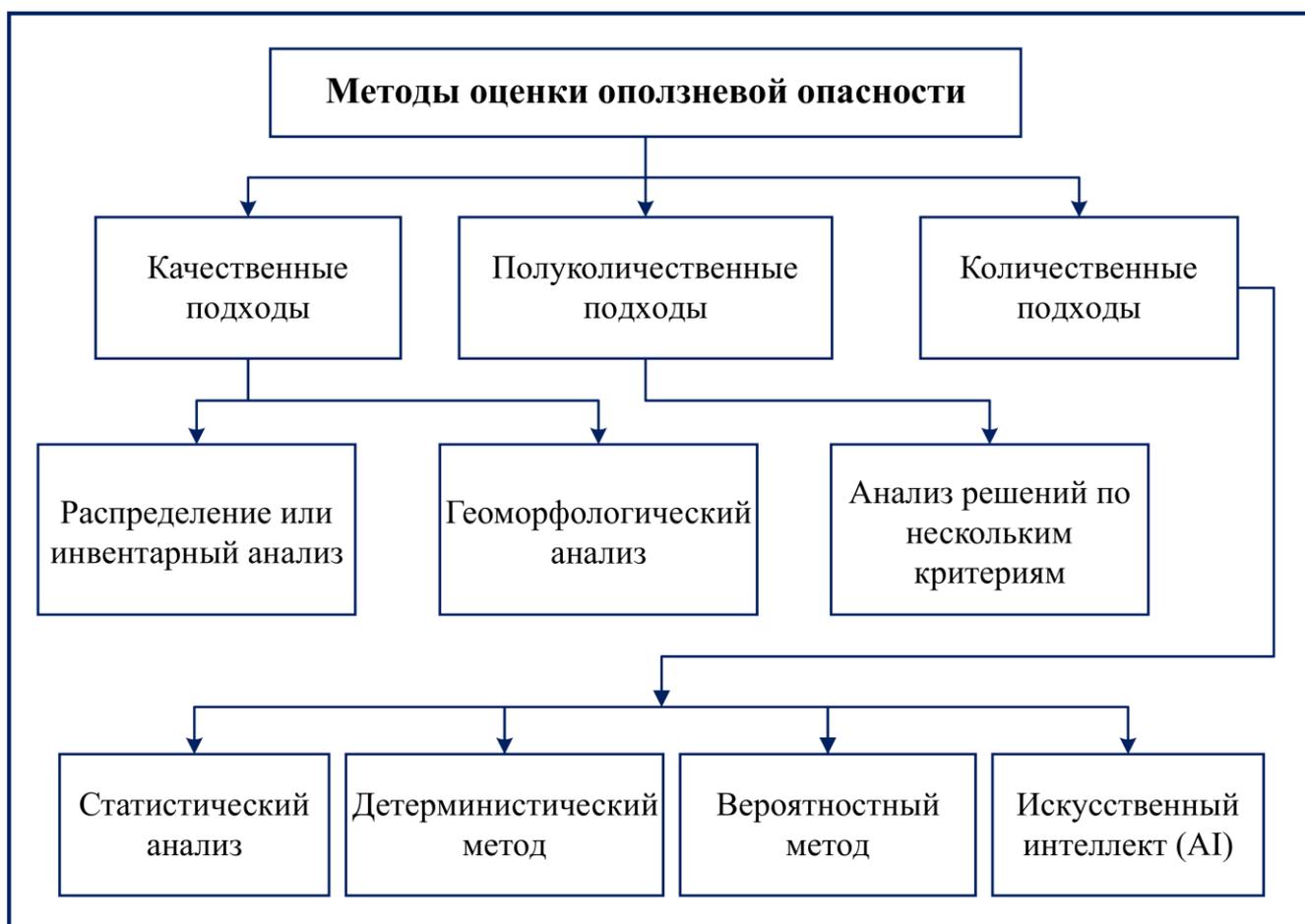
Количественные подходы включают детерминистические, статистические

вероятностные и методы, основанные на искусственном интеллекте и машинном обучении [128, 170]. Они могут быть использованы при оценке оползневой опасности на различных иерархических уровнях ПТС.

К полуколичественным подходам может быть отнесен метод анализа решений по нескольким критериям.

Количественные подходы рассматриваются как наиболее объективные [102]. Они зависят, главным образом, от используемых математических моделей и, значительно меньше, от человеческих суждений и опыта. Качественные подходы более субъективны [172].

Классификационная схема методов оценки оползневой восприимчивости и оползневой опасности (на основе исследования Шано и др., (2020 г.) [185]), приведена на Рисунок 3.1.



*Рисунок 3.1 – Методы оценки оползневой опасности ([185] с изменениями автора)*

Следует отметить возрастающий во всем мире научный интерес к оценке

оползневой опасности. В 2018 году, Пургасеми Х. Р. [166] проанализировал 469 научных статей, опубликованных в период с 2005 по 2016 годы, для изучения методов и факторов, используемых в исследованиях по оценке оползневой восприимчивости и оползневой опасности. По его данным, в период с 2005 по 2012 годы, публиковалось в среднем 27 статей в год по рассматриваемой тематике. В 2012 году их число значительно увеличилось, достигнув 58 публикаций за год. В период с 2013 по 2016 годы, было опубликовано в среднем по 62 статьи в год.

Результаты выполненного Пургасеми Х. Р. анализа показали, что в 469 рецензируемых публикациях было использовано 70 различных моделей оценки оползневой восприимчивости и опасности. Самой популярной для оценки оползневой восприимчивости была модель логистической регрессии (применена в 28,6% статей, опубликованных в период с 2005 по 2016 годы). Пятнадцать наиболее часто используемых моделей, приведены на Рисунок 3.2.

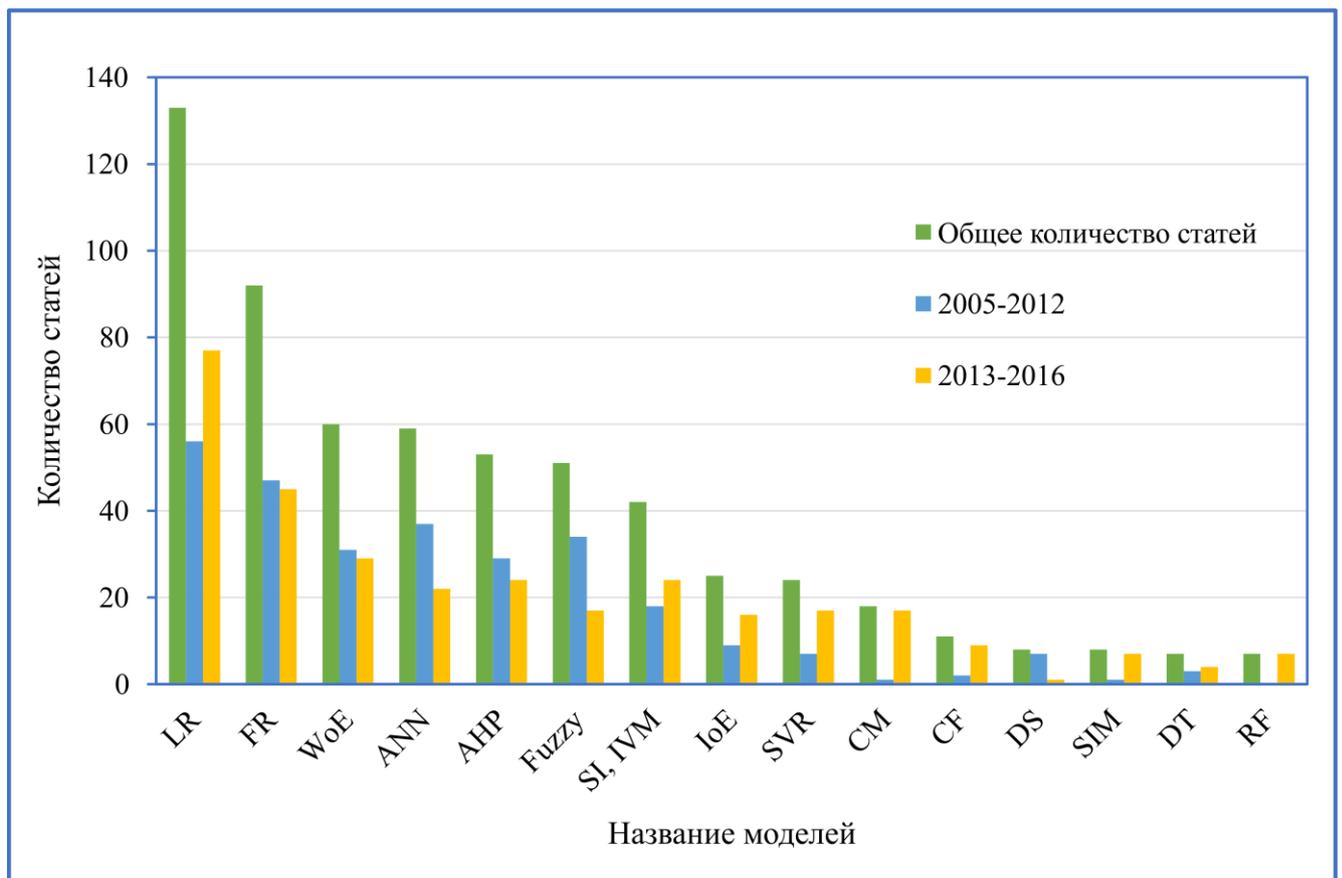
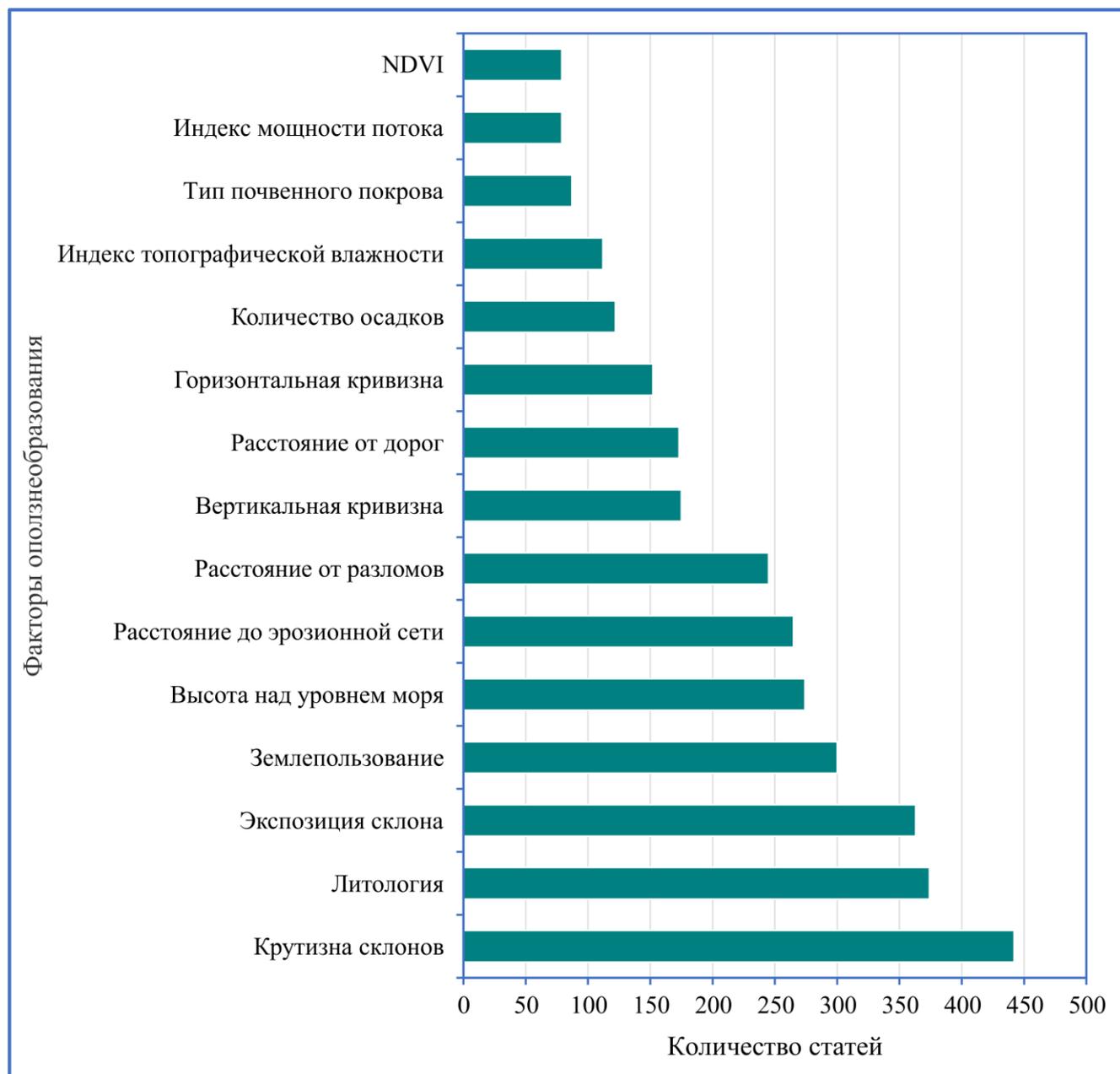


Рисунок 3.2 – Пятнадцать наиболее часто используемых методов для оценки оползневой восприимчивости и оползневой опасности (на основе статей, опубликованных в период с 2005 по 2016 годы) [166]

В период с 2005 по 2016 годы, в 94,2% опубликованных исследований важнейшим фактором, определяющим оползневую восприимчивость, считался фактор крутизны склонов, за которым следовали: литология, экспозиция склона (аспект), землепользование и высота над уровнем моря. Пятнадцать наиболее значимых факторов оползнеобразования по опубликованным данным, приведены на Рисунок 3.3.



*Рисунок 3.3 – Пятнадцать наиболее значимых факторов оползнеобразования (на основе статей, опубликованных в период с 2005 по 2016 годы) [166]*

В последние годы, оценки оползневой восприимчивости и оползневой

опасности, как правило основываются на количественных походах.

## **3.2 Качественные подходы**

### **3.2.1 Геоморфологические методы**

Геоморфологический анализ при картировании оползневой опасности является прямым, качественным методом [111]. Большинство данных, необходимых для его использования, могут быть получены с помощью дистанционного зондирования. Информация, получаемая в результате полевых исследований, в этом методе используются редко [185]. Карты районирования составляются на основе анализа геоморфологических карт [127]. Главными недостатками этого метода являются следующие [135]:

1) субъективные правила принятия решений, определяющих оползневую восприимчивость, что затрудняет сопоставление карт районирования, подготовленных различными авторами;

2) сложности, связанные с обновлением оценок восприимчивости по мере поступления новых данных;

Карты, основанные на геоморфологическом анализе, как правило дают предварительную оценку степени оползневой опасности для исследуемой территории [82].

### **3.2.2 Метод инвентаризации оползней**

Метод инвентаризации основан на картировании оползней в районе исследований. Он включает сбор и анализ данных об их местоположении, типе, размерах и возрасте. Кроме того, собирается информация о факторах и причинах, вызвавших оползни, интенсивности и экстенсивности оползневого процесса [94].

При построении карт инвентаризации используются различные подходы [110], основными из которых являются: сбор исторических данных о появлениях оползней; полевые исследования (оползневая съемка); анализ данных дистанционного зондирования, в том числе и путем их сравнения с результатами оползневой съемки. Выбор того или иного подхода определяется целью и масштабом исследований и доступностью необходимых исходных данных (масштаба базовых карт, разрешающей способности данных дистанционного

зондирования, детальностью оползневой съемки и т.д) [112]. Качество инвентаризации с трудом поддается оценке, поскольку зависит от точности, типа и достоверности информации, используемой при построении карт. Современные и разрабатываемые методы картирования, основанные на многоспектральной съемке, спутниковых, воздушных и наземных технологиях дистанционного зондирования, с том числе с использованием LIDAR (Light Detection and Ranging) картографирования, могут значительно упростить составление и обновление карт инвентаризации оползней [112], а также повысить их достоверность.

### **3.3 Полуколичественные подходы**

#### **3.3.1 Мультикритериальный анализ решений**

Планирование землепользования, охрана окружающей среды, управление техногенными и природными рисками требуют применения современных систем поддержки принятия решений, для всесторонней оценки множества альтернатив. Такие системы базируются на эффективном использовании элементов геоинформационных систем для анализа и представления пространственных данных, а также методов поддержки принятия решений, зачастую основанных на использовании моделей и средств мультикритериального анализа решений [65].

Мультикритериальный анализ (MCDA - Multi-criteria decision analysis) или анализ решений по нескольким критериям - метод, целью которого является использование ранжирования критериев для объективной и прозрачной оценки различных вариантов решений.

Существуют различные подходы, в соответствии с которыми каждому критерию может быть назначен весовой коэффициент, и различные способы объединения оценок по критериям для каждого варианта решения в единую оценку. Например, оценки могут быть объединены в виде взвешенной суммы или взвешенного произведения.

MCDA позволяет комбинировать сведения из различных источников [98], а для анализа и представления пространственных данных в процессе принятия решений – эффективно взаимодействовать с элементами геоинформационных систем.

В сочетании с ГИС, многокритериальные методы анализа (ГИС MCDA) позволяют анализировать набор альтернативных пространственных решений. ГИС MCDA состоит из набора географически определенных основных объектов и набора критериев оценки, в виде слоев и атрибутов карты. Метод позволяет вычислить полезность пространственных объектов путем наложения карт критериев в соответствии со значениями атрибутов, с использованием набора весовых коэффициентов [86].

Необходимо подчеркнуть важность учета неопределенности в процессе решения многокритериальных задач, которая может быть вызвана различными факторами: достоверностью и полнотой исходных данных; применимостью методики их обработки; обоснованностью набора используемых критериев, весовых коэффициентов и пороговых значений. Следует отметить, что веса критериев являются наиболее значимым фактором при определении неопределенности. Вероятно, это связано с субъективностью в их выборе, а также с тем, что масштаб и характер критериев часто бывают неизвестны. Как следствие, когда в анализе задействовано несколько экспертов, принимающих решения, часто бывает невозможно использовать единый набор весов и, следовательно, в итоге будет получено несколько наборов результатов [86]. Для учета неопределенности используются как методы анализа чувствительности результатов оценок к изменению параметров выбранной модели конкретной многокритериальной задачи, так и комплексный анализ неопределенностей объективных и субъективных значений используемых критериев и предпочтений [65].

ГИС MCDA нашел применение в различных областях, включая оценку пригодности земель, планирование землепользования, уменьшение последствий стихийных бедствий и т.д [146]. Например, для оценки оползневой восприимчивости и оползневой опасности широко используется метод анализа иерархий (АНР) [18, 46, 75].

### **3.4 Количественные подходы**

#### **3.4.1 Статистические методы**

Достижения геоинформатики в сочетании со статистическими методами

сделали возможным эффективно оценивать оползневую опасность на региональном уровне [141]. В этих исследованиях широко используются два подхода [188] - двумерный и многомерный статистический анализ. Двумерный статистический анализ включает следующие методы: взвешенного наложения; нечетких множеств; частотного анализа, статистического индекса, анализа оползневой восприимчивости. Многомерный статистический подход, в свою очередь, включает анализ логистической регрессии (англ. Logistic regression analysis) и дискриминантный анализ (англ. Discriminant analysis) [69].

Преимущество статистических методов заключается в том, что они могут применяться для больших территорий, а оценки для различных классов факторов могут быть получены статистически из прошлых данных об оползнях. С точки зрения достоверности получаемых результатов, ни один из статистических методов не доказал своей абсолютной эффективности. По этой причине, в практике исследований, лучшие результаты можно получить за счет интеграции этих методов в оптимальную модель путем использования одних и тех же исходных данных по инвентаризации оползней и анализируемым факторам. Основное ограничение статистических методов заключается в том, что они не учитывают механизмы разрушения склонов и основаны на постоянстве принципа актуализма.

Двумерные статистические методы основаны на статистическом анализе факторов оползнеобразования [19, 183] при этом весовые коэффициенты вычисляются на основе плотности оползней в информационных классах фактора [21, 188]. Основное их преимущество заключается в том, что они позволяют учесть, в процессе анализа, экспертное мнение. Однако, и эти методы не лишены недостатков, главным из которых является потеря качества и точности результатов из-за чрезмерного упрощения входных данных [194].

Методы многомерного статистического анализа основаны на существовании или отсутствии проявлений оползневого процесса в пределах заранее определенных географических единиц [207]. Весовые коэффициенты при этом подходе определяют относительный вклад каждого фактора в степень опасности, с учетом взаимодействия между ними [188]. Одним из первых примеров

использования многомерных статистических моделей считается выполненная в 1983 году оценка фактической и потенциальной оползневой опасности для двух эталонных зон Калабрии [83].

### **3.4.2 Вероятностные (байесовские) методы**

Оценка оползневой опасности с использованием вероятностных методов основана на байесовской интерпретации условной вероятности, в которой степень доверия к событию основывается на априорных знаниях, таких как результаты предыдущих экспериментов или личное доверие. Байесовская вероятность противопоставляется классической частотной, в которой вероятность определяется относительной частотой появления случайного события при достаточно длительных наблюдениях. Байесовские вероятностные методы используют теорему Байеса для вычисления и обновления вероятностей после получения новых данных.

Теорема Байеса позволяет «переставить причину и следствие» т.е. известному факту события вычислить вероятность того, что оно было вызвано данной причиной. События, отражающие действие «причин», в данном случае называют гипотезами. Безусловную вероятность справедливости гипотезы называют априорной (изначальная степень уверенности субъекта в её истинности), а условную – с учетом факта произошедшего события – апостериорной (степень уверенности субъекта после получения новых опытных данных) [54].

Несмотря на тот факт, что Байесовский подход к типизации является одним из старейших, в последнее время он стал чрезвычайно популярным в теории распознавания. Он лежит в основе многих удачных алгоритмических моделей оценки оползневой опасности таких как: метод весомости доказательств (WOE), метод информационной ценности (IV), метод фактора достоверности (CF).

### **3.4.3 Детерминистические методы**

Детерминистические методы основаны на математических уравнениях, которые имитируют физическую природу оползней. К данному классу методов относятся следующие группы: эмпирические; основанные на анализе предельного равновесия; основанные на предельном анализе; основанные на структурном

анализе и комбинированные [48]. Последние четыре группы могут быть отнесены к методам, основанным на геотехническом подходе. Они, как правило, применяются для оценки оползневой опасности на локальном и элементарном уровне ПТС и, как следствие, в большинстве случаев, не учитывают пространственное распределение оползней.

Для оценки оползневой опасности на региональном уровне ПТС, как правило, используются эмпирические методы оценки проявления оползневых процессов и методы аналогий [48].

Однако, в последние годы были разработаны детерминистические методы, основанные на геотехническом подходе (главным образом на методах предельного равновесия) [68], с использованием «детерминистических распределенных моделей» [209], интегрированных в ГИС и ориентированные на оценку оползневой опасности ПТС локального и регионального уровней, например: dSLAM [214], SHALSTAB [148], SINMAP [156], GEOtop-FS [175], TRIGRS [71], SLIP [149], Scoops3D [173].

Наиболее широкое применение нашли детерминистические распределенные модели при региональной и локальной оценке оползневой опасности связанной с интенсивными атмосферными осадками [180]. Их использование позволяет предсказать время разрушения склона и определить пороговые значения (интенсивности и количества осадков) необходимые для создания систем раннего предупреждения от опасности развития оползневого процесса [118]. Преимущество этих методов состоит в том, что они не требуют данных по инвентаризации оползней [139], в тоже время их использование ограничено необходимостью проведения инженерно-геологических изысканий, с выполнением детальных полевых и лабораторных исследований [88] для обширных территорий [162]. Не менее важным, при применении детерминистических методов, является тот факт, что получаемые результаты в виде оценки устойчивости, не соответствуют по своей сути классическому определению оползневой опасности, под которой понимается вероятность развития оползневого процесса. В детерминистических моделях количественные

вероятностные оценки невозможны по определению. Таким образом, результатом использования детерминистических методов, основанных на математических уравнениях, имитирующих физическую природу процесса, является количественная оценка устойчивости склонов и, полученная на этой основе, качественная оценка оползневой опасности.

При оценке оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС применяются, как правило методы предельного равновесия и численные методы. Следует отметить, что в последнее время в эти методы стали активно внедряться инструменты для проведения вероятностных расчетов.

### 3.4.4 Методы, основанные на искусственном интеллекте и машинном обучении

Большой проблемой при построении моделей оползневой опасности является учет неопределенности. Одним из способов ее решения является разработка и применение специальных, недетерминированных алгоритмов анализа данных и одними из самых эффективных стали алгоритмы, основанные на системах машинного обучения и искусственном интеллекте (AI). Схема метода машинного обучения представлена на Рисунок 3.4.

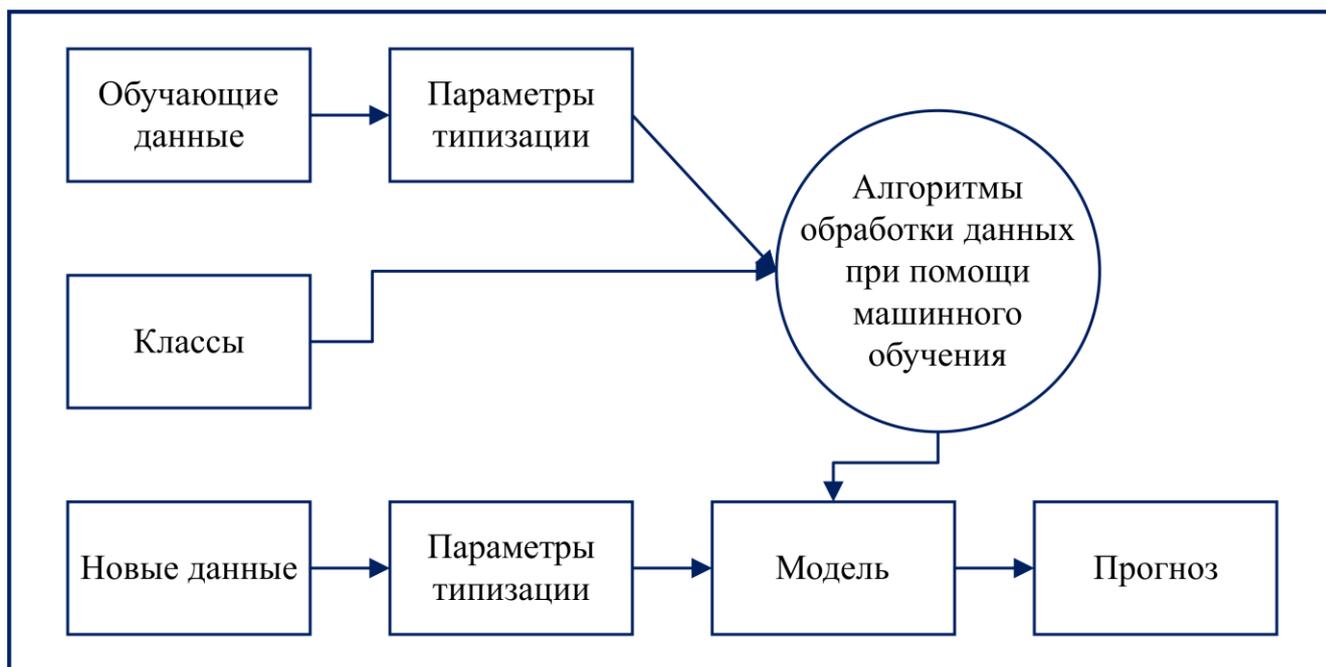


Рисунок 3.4 – Схема машинного обучения [54]

За последние годы было разработано множество методов оценки оползневой

опасности, основанных на искусственном интеллекте и машинном обучении [113, 161], например: Boosted Regression Tree (BRT), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), Maximum Entropy (ME), Decision Tree (DT), Quadratic Discriminant Analysis (QDA), Artificial Neural Network (ANN), Classification and Regression Tree (CART), Generalized Additive Model (GAM) and Multiple Adaptive Regression Splines (MARS).

Методы машинного обучения и искусственного интеллекта незаменимы, когда невозможно установить прямую математическую связь между причиной и следствием. Использование подобных систем в оценке оползневой опасности весьма перспективно. В большинстве случаев, они превосходят обычные методы анализа, так как способны обрабатывать большие массивы нелинейных данных, полученных из различных источников [66]. Последние достижения в области методов анализа данных показали, что при использовании методов группового обучения производительность методов машинного обучения может быть увеличена, а их ограничения уменьшены [113].

## **Выводы**

Исследования по оценке оползневой опасности могут проводиться с использованием различных подходов. Для определения оползневой опасности необходимо сначала выяснить причины и факторы развития оползневого процесса, а затем с помощью подходящего научного метода получить результат с высокой степенью достоверности.

Целью данной главы было рассмотрение существующих методов оценки оползневой опасности.

За последние годы в разных странах и разными исследователями были разработаны новые методы комплексного анализа ПТС с целью прогнозирования развития оползней различного генезиса. При исследовании оползневого процесса наибольшее внимание уделяется изучению следующих проблем: восприимчивости (подверженности) территорий к оползневому процессу, оценке оползневой опасности и риска.

Существующие в настоящее время методы оценки оползневой опасности

можно классифицировать на прямые и косвенные, качественные, полуколичественные и количественные, строящиеся, как на вероятностном, так и на детерминированном подходах.

Внедрение в практику исследований технологий, основанных на ГИС, дистанционного зондирования, статистического и математического моделирования, систем, основанных на искусственном интеллекте и машинном обучении придало новый аспект исследованиям оползневой опасности.

Все методы оценки оползневой опасности имеют свои ограничения в использовании. По этой причине при использовании того или иного метода всегда требуется анализ его применимости для решения конкретной задачи. Выбор подходящего метода для изучения оползней будет зависеть от таких критериев, как; цель исследования, площадь территории и ее доступность, масштаб исследований, тип используемых данных, тип оползней, наличие ресурсов, профессиональные навыки и т.д. [89]. Проблема степени достоверности результатов в большинстве случаев может быть решена за счет комплексного использования методов, основанных на разных принципах с последующей оценкой их сходимости.

Вышеизложенное позволяет сформулировать первое защищаемое положение:

***Эффективный подход к оценке оползневой опасности должен базироваться на комплексном применении современных методов, основанных на разных принципах, с учетом уровня иерархии ПТС, в том числе: масштаба анализа, состава и значимости учитываемых факторов, качества и типа исходной информации, а также допустимом уровне достоверности результатов исследования.***

## **ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПТС РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ (РАЙОН ШАПА ПРОВИНЦИИ ЛАОКАЙ)**

Региональная ПТС - система, включающая дискретно расположенные локальные ПТС, области взаимодействия которых не граничат. Региональная оценка оползневых процессов предполагает определение возможности возникновения и интенсивности их развития в пределах значительных территорий. На региональном уровне иерархии ПТС обычно не представляется возможным указать конкретные типы, места и иные показатели оползневых процессов, дается их фоновая характеристика с общими закономерностями развития [58].

В основе оценки оползневой опасности на региональном уровне иерархии ПТС лежит специальное районирование территории, характеризующее распространение оползней или условия их проявления.

### **4.1 Региональная оценка оползневой опасности в районе Шапа**

На примере района Шапа провинции Лаокай (северо-запад Вьетнама) апробирована методика оценки оползневой опасности ПТС регионального уровня с использованием ГИС, базирующейся на совместном анализе результатов комплекса статистических методов (частотного анализа, статистического индекса, анализа оползневой восприимчивости), а также основанных на мультикритериальном подходе (на основе модифицированного метода анализа иерархий).

#### **4.1.1 Методы исследования**

##### **Модифицированный метод анализа иерархий (МАНР)**

Метод анализа иерархий (англ. Analytic Hierarchy Process – АНР), предложенный Т. Л. Саати [55, 178], предоставляет экспертам относительно простой и эффективный способ измерения объективных и субъективных факторов посредством попарных относительных сравнений и вычисления соответствующих приоритетов шкалы отношений. Он является примером полуколичественного подхода – многокритериального анализа [179].

Первый шаг АНР – построение иерархической структуры, объединяющей

цель выбора, критерии, альтернативы и другие факторы, влияющие на выбор решения.

Иерархическая структура АНР – это графическое представление проблемы в виде перевернутого дерева, где каждый элемент, за исключением самого верхнего, зависит от одного или ниже расположенных элементов. Система представляет собой строгую иерархию, если допустимы связи только между соседними уровнями от верхнего к нижнему.

Приоритеты – это числа, которые связаны с узлами иерархии. Они представляют собой относительные веса элементов в каждой группе. Подобно вероятностям, приоритеты – безразмерные величины, которые могут принимать значения от нуля до единицы. Чем больше величина приоритета, тем более значимым является соответствующий ему элемент. Приоритет цели по определению равен 1,0.

Шкала или масштаб сравнения значимости факторов, предложенная Т. Саати [55] в рамках АНР, состоит из словесных определений «одинаковая значимость», «слабая значимость», «сильная значимость» и т.д. Интенсивность этих определений может быть выражена числовыми значениями 1, 3, 5, 7 и 9 соответственно (Таблица 4.1).

*Таблица 4.1 – Интенсивная шкала важности элементов по Саати Т. Л.*

Степень важности	Определение	Объяснение
1	Одинаковая значимость	Два действия вносят одинаковый вклад в достижение цели
3	Некоторое преобладание значимости одного действия перед другим (слабая значимость)	Опыт и суждение дают лёгкое предпочтение одному действию перед другим
5	Существенная или сильная значимость	Опыт и суждение дают сильное предпочтение одному действию перед другим
7	Очень сильная или очевидная значимость	Предпочтение одного действия перед другим очень сильно. Его превосходство практически явно.
9	Абсолютная значимость	Свидетельство в пользу предпочтения одного действия другому в высшей степени

		предпочтительны
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение
Обратные величины приведённых выше чисел	Если действию $i$ при сравнении с действием $j$ приписывается одно из приведённых выше чисел, то действию $j$ при сравнении с $i$ приписывается обратное значение	Обоснованное предположение
Рациональные значения	Отношения, возникающие в заданной шкале	Если постулировать согласованность, то для получения матрицы требуется $n$ числовых значений

Шкала сравнения значимости факторов [55, 179], лежит в основе иерархической структуры АНР при оценке оползневой опасности (Рисунок 4.1).

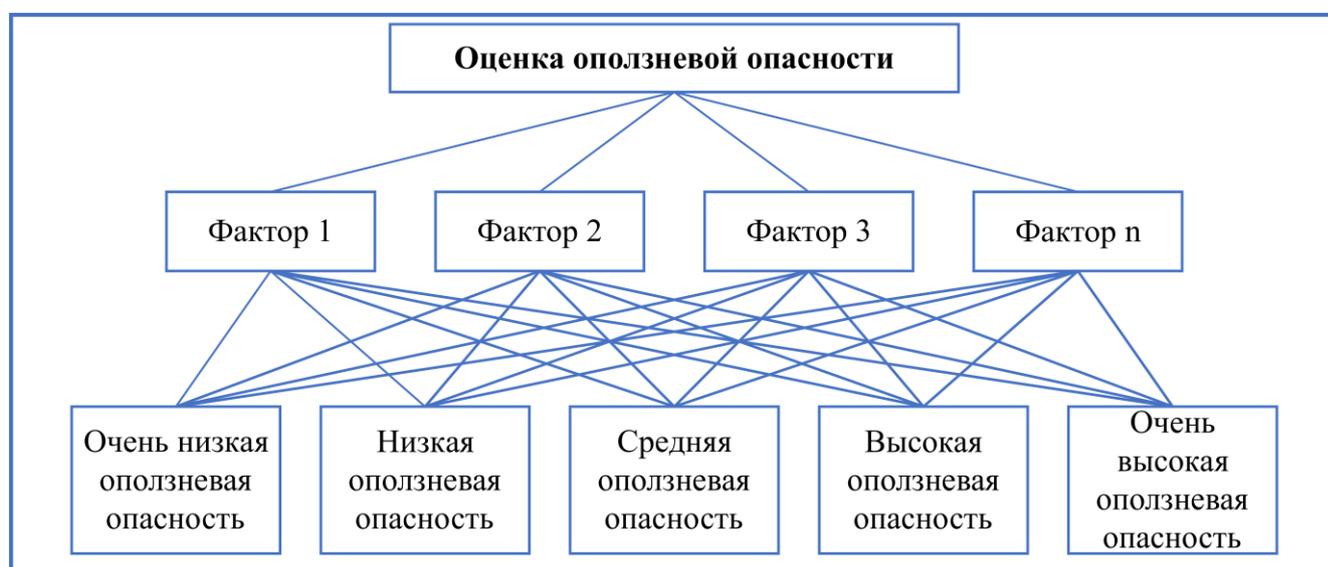


Рисунок 4.1 – Иерархическая структура АНР при оценке оползневой опасности

На основе описанной выше шкалы (Таблица 4.1), строится матрица парных коэффициентов корреляции (Таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Матрица парных коэффициентов корреляции

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	.....	$A_n$
$A_1$	1	$a_{12}$	$a_{13}$	....	$a_{1n}$
$A_2$	$a_{21}$	1	$a_{23}$	....	$a_{2n}$
$A_3$	$a_{31}$	$a_{32}$	1		$a_{3n}$
...	...	....	...	...	...
$A_n$	$a_{n1}$	$a_{n2}$	$a_{n3}$		1

В которой  $a_{ij}$  является величиной парных коэффициентов корреляции, определенной по следующей формуле:

$$a_{ij} = \frac{I_i}{I_j} \quad (4.1)$$

где  $I$  является степенью важности (по шкале Саати Т. Л).

Веса факторов определяются по следующей формуле:

$$W_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (4.2)$$

где  $W_i$  – вес фактора  $A_i$ ;  $m_i$  – среднее геометрическое значение  $i$  строки, определяющееся по следующей формуле:

$$m_1 = (a_{11} \times a_{12} \times \dots \times a_{1n})^{1/n} \quad (4.3)$$

.....

$$m_n = (a_{n1} \times a_{n2} \times \dots \times a_{nn})^{1/n} \quad (4.4)$$

Веса факторов образования оползней (оценка вектора приоритетов) определяется как:

$$W_1 = \frac{m_1}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{I_1}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (4.5)$$

.....

$$W_n = \frac{m_n}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{I_n}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (4.6)$$

Кроме того:

$$W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1 \quad (4.7)$$

Таким образом, совокупный индекс восприимчивости территории к оползневым процессам определяется по следующей формуле:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_{ij} \quad (4.8)$$

Полагая, что  $X_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}}$ , если  $X_{ij} \leq 1$ , и  $X_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}} \times N$ , если  $X_{ij} > 1$  (где  $N$  – любое натуральное число, отличное от 0), окончательно получаем:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}} \quad (4.9)$$

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}} \quad (\text{если } X_{ij} \leq 1) \quad (4.10)$$

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}} \times N \quad (\text{если } X_{ij} > 1) \quad (4.11)$$

Ранее выполненные исследования [46, 115, 130] показали, что основным недостатком классической формулировки АНР является необходимость использования экспертных оценок, что вносит определенный субъективизм в результат оценки региональной оползневой опасности.

Для оценки оползневой опасности в данном исследовании применен модифицированный подход [23]. Основным критерием для определения значимости фактора является форма функции распределения выявленных оползней по информационным классам рассматриваемого фактора. В качестве примера на Рисунок 4.2 показаны две возможных функции распределения. Фактор 1, имеющий большую дисперсию, является менее значимым в сравнении с фактором 2, имеющим меньшую дисперсию. Отметим, что кривая распределения строится по количеству проявлений оползневых процессов в каждом классе фактора.



Рисунок 4.2 – Функция распределения идентифицированных оползней по информационным классам аналитического фактора

Таким образом, стандартное отклонение функции распределения идентифицированных оползней по информационным классам оползневого фактора представляет собой основу для определения степени важности ( $I$ ) [46].

Веса  $X_{ij}$  информационных классов нормируются относительно количества выявленных оползней таким образом, чтобы их сумма для каждого фактора составляла 1:

$$X_{ij} = \frac{\text{плотность оползней в данном информационном классе}}{\text{плотность оползней на исследуемой территории}} \quad (4.12)$$

Данный алгоритм модифицированного метода анализа иерархий (МАНР) был использован при создании карты оползневой опасности района Шапа и анализа влияние разрешения цифровой модели рельефа на результаты оценки оползневой опасности.

#### **Метод частотного анализа (англ. Frequency Ratio method – FR)**

На основе принципа актуализма, можно установить взаимосвязь между районами, где произошли оползни, и факторами, способствующими их активизации. Количественно она может быть определена на основе метода частотного анализа, согласно которому, каждый фактор подразделяется на несколько классов. Значение частоты (FR) для каждого класса факторов определяется с использованием следующего уравнения [132]:

$$FR = \frac{\left(\frac{N_i}{N}\right)}{\left(\frac{P_i}{P}\right)} \quad (4.13)$$

где  $N_i$  – количество точек (пикселей) оползней в классе факторов  $i$ ,  $N$  – общее количество точек (пикселей) оползней в районе исследования,  $P_i$  – количество точек (пикселей) в классе факторов  $i$ , а  $P$  – общее количество точек (пикселей) в районе исследования.

Индекс оползневой восприимчивости (LSI), при данном подходе, рассчитывается по следующей формуле:

$$LSI = \sum FR_i \quad (4.14)$$

где  $LSI$  – индекс оползневой восприимчивости,  $FR_i$  – значение FR класса фактора  $i$ .

Среднее значение FR равно 1,0. Когда значение FR больше 1,0, существует более высокая корреляция между частотностью оползней и факторами оползневой опасности. Когда значение FR меньше 1,0, существует более слабая взаимосвязь между частотой оползней и оползневыми факторами [155].

### **Метод анализа оползневой восприимчивости (англ. Landslide Susceptibility Analysis method – LSA)**

Анализ оползневой восприимчивости—это простой и эффективный метод для оценки влияния различных факторов на возникновение оползней. В рамках этого метода для анализа влияния каждого фактора используются весовые коэффициенты, которые сравнивают оценочную плотность с общей плотностью в рассматриваемом районе [188]. Для определения значения веса класса факторов в методе LSA используется следующее уравнение [72]:

$$W_{LSA} = 1000(D_{ij} - D) = 1000 \left( \frac{N_i}{P_i} - \frac{N}{P} \right) \quad (4.15)$$

где  $D_{ij}$  – плотность оползней в классе  $i$  фактора  $j$ ,  $D$  – плотность оползней в районе исследования,  $N_i$  – количество точек (пикселей) оползней в классе фактора  $i$ ,  $N$  – общее количество точек (пикселей) оползней в районе исследования,  $P_i$  – количество точек (пикселей) в классе фактора  $i$ , и  $P$  – общее количество точек (пикселей) в районе исследования.

Индекс оползневой восприимчивости (LSI) при этом подходе рассчитывается по следующей формуле:

$$LSI = \sum W_i \quad (4.16)$$

где  $LSI$  – индекс оползневой восприимчивости,  $W_i$  – значение  $W_{LSA}$  класса фактора  $i$ .

### **Метод статистического индекса (англ. Statistical Index method – SI)**

Метод статистического индекса или метод оползневого индекса был впервые предложен Ван Вестеном (Van Westen) в 1997 году [208] и применялся во многих исследованиях для картирования оползневой восприимчивости [72, 138, 150]. В рамках этого метода значение веса каждого класса рассчитывается по натуральному логарифму плотности оползней в классе, деленному на общую

плотность оползней в районе исследования [208]:

$$W_{SI} = \ln \frac{D_{ij}}{D} = \ln \left( \frac{N_i}{P_i} \times \frac{P}{N} \right) \quad (4.17)$$

где  $D_{ij}$  – плотность оползня в классе  $i$  фактора  $j$ ,  $D$  – плотность оползня в районе исследования,  $N_i$  – количество точек (пикселей) оползня в классе фактора  $i$ ,  $N$  – общее количество точек (пикселей) оползня в районе исследования,  $P_i$  – количество точек (пикселей) в классе фактора  $i$ , и  $P$  – общее количество точек (пикселей) в районе исследования.

Индекс оползневой восприимчивости (LSI) при этом подходе рассчитывается по следующей формуле:

$$LSI = \sum W_i \quad (4.18)$$

где  $LSI$  – индекс оползневой восприимчивости,  $W_i$  – значение  $W_{SI}$  класса фактора  $i$ .

#### 4.1.2 Карта инвентаризации оползней

«Карта инвентаризации оползней» является картой, на которой показано распределение существующих проявлений оползневых процессов [111]. При составлении карт инвентаризации (LIM) внимание фокусируется на определении границ оползней и игнорируются особенности оползневых деформаций. LIM является важнейшим элементом в оценке оползневого риска [134]. Наряду с отображением пространственного распределения оползней карта инвентаризации может включать другие виды информации, такие как: геометрические характеристики оползня (размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневыми деформациями), особенности геологического строения (литология, структура, свойства грунтов) и гидрогеологических условий [187].

Методы, применяемые при создании карты инвентаризации оползней, можно разделить на три группы [187]:

- 1) Методы, основанные на визуальной интерпретации;
- 2) Полуавтоматические методы;
- 3) Автоматические методы, основанные на машинном обучении.

В рамках данного исследования карта инвентаризации оползней составлена

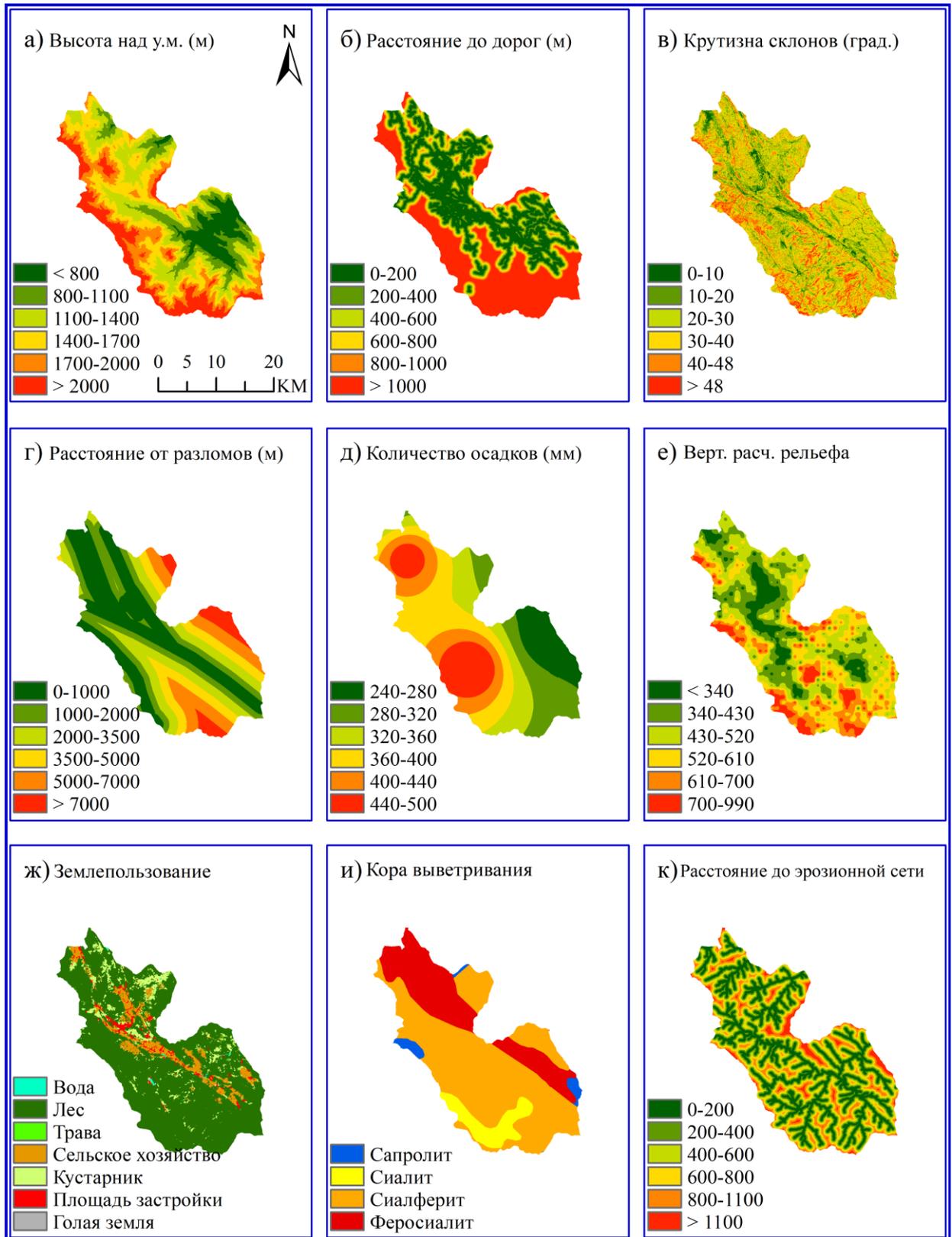
с использованием результатов полевых наблюдений и данных тематической обработки материалов дистанционного зондирования.

В районе исследования было выявлено в общей сложности 130 оползней, при этом наименьшая площадь оползня составила 395,6 м<sup>2</sup>, а самая большая площадь оползня – 70447,4 м<sup>2</sup>. Большинство оползней было зафиксировано в коммуне Чунгчай, в центре района Шапа, в коммунах Лаочай, Таван и Банхо. Для оценки потенциала развития оползней местоположения склоновых деформаций были разделены на две группы случайным образом: 70% (91 оползень) – обучающая выборка, а 30% (39 оползней) - данные для проверки достоверности.

#### **4.1.3 Факторы оползнеобразования, использованные при построении статистических моделей**

Разработка карты оползневой восприимчивости и опасности зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и оползневыми факторами. Переменные, которые способствовали составлению карт оползневой восприимчивости, были выбраны на основе обзора литературы и подробных полевых исследований [104]. Геоморфология, топография, характеристики свойств грунтов, землепользование и гидрология – это основные группы входных данных, необходимых для оценки оползневой восприимчивости [186].

В настоящей работе, исходя из имеющихся данных особенностей проявлений оползней и взаимосвязи между возникновением склоновых деформаций и факторами оползнеобразования, для составления карт оползневой восприимчивости и опасности были выбраны девять факторов: высота над уровнем моря, расстояние до дорог, крутизна склонов, расстояние от разломов, среднемесячное количество осадков, вертикальное расчленение рельефа, землепользование, тип коры выветривания, расстояние до эрозионной сети. Карты факторов оползнеобразования приведены на Рисунок 4.3. Каждый выбранный фактор (за исключением землепользования и типа коры выветривания) был разделен на шесть классов.



а) карта высоты над уровнем моря; б) карта расстояния до дорог; в) карта крутизны склонов; г) карта расстояния от разломов; д) карта количества осадков; е) карта вертикального расчленения рельефа; ж) карта землепользования; и) карта типа кор выветривания; к) карта расстояния до эрозионной сети

Рисунок 4.3 – Карты факторов оползнеобразования

Карты высоты над уровнем моря, крутизны склонов и вертикального расчленения рельефа были получены на основе анализа цифровой модели рельефа (ЦМР с разрешением 10 м). Расстояние от разломов, расстояние до дорог и расстояние до эрозионной сети были оценены с помощью инструмента Евклидово расстояние в ArcGIS. Карта среднемесячного количества осадков была составлена путем интерполяции данных о количестве осадков с метеорологических станций в провинции Лаокай. Остальные данные были собраны в Институте геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий. После этого карты были трансформированы в растровый формат с тем же размером пикселей (разрешение 10×10 м) для расчета весов классов и факторов и создания карт оползневой восприимчивости (Рисунок 4.3).

Связь между факторами оползнеобразования и распределением оползней, полученная на основе статистических моделей FR, LSA и SI приведена в Таблица 4.3.

*Таблица 4.3 – Связь между факторами оползнеобразования и распределением оползней, полученная на основе статистических моделей*

Фактор	Класс	% площадь класса	% площадь оползня	FR	W <sub>LSA</sub>	W <sub>SI</sub>
Высота над уровнем моря (м)	< 800	9,69	31,03	3,20	2,45	1,16
	800 - 1100	13,19	30,92	2,34	1,50	0,85
	1100 - 1400	22,43	11,86	0,53	-0,52	-0,64
	1400 - 1700	23,83	15,45	0,65	-0,39	-0,43
	1700 - 2000	16,61	10,47	0,63	-0,41	-0,46
	> 2000	14,26	0,27	0,02	-1,09	-3,98
Расстояние до дорог (м)	0 - 200	30,78	74,23	2,41	1,57	0,88
	200 - 400	14,33	7,30	0,51	-0,55	-0,67
	400 - 600	9,04	1,78	0,20	-0,89	-1,62
	600 - 800	6,52	2,77	0,42	-0,64	-0,86
	800 - 1000	4,95	1,13	0,23	-0,86	-1,48
	> 1000	34,38	12,79	0,37	-0,70	-0,99

Крутизна склонов (град.)	0 - 10	4,41	11,29	2,56	1,73	0,94
	10 - 20	14,34	15,61	1,09	0,10	0,09
	20 - 30	29,01	25,39	0,88	-0,14	-0,13
	30 - 40	33,37	29,83	0,89	-0,12	-0,11
	40 - 48	13,19	11,60	0,88	-0,13	-0,13
	> 48	5,69	6,28	1,10	0,12	0,10
Расстояние от разломов (м)	0 - 1000	32,12	52,8	1,64	0,72	0,50
	1000 - 2000	20,72	8,88	0,43	-0,64	-0,85
	2000 - 3500	17,45	9,72	0,56	-0,49	-0,58
	3500 - 5000	12,12	12,67	1,05	0,05	0,04
	5000 - 7000	11,91	8,47	0,71	-0,32	-0,34
	> 7000	5,68	7,45	1,31	0,35	0,27
Среднемесячное количество осадков (мм)	240 - 280	11,94	8,60	0,72	-0,31	-0,33
	280 - 320	16,51	7,94	0,48	-0,58	-0,73
	320 - 360	15,25	20,57	1,35	0,39	0,30
	360 - 400	24,88	31,75	1,28	0,31	0,24
	400 - 440	16,16	18,13	1,12	0,14	0,12
	440 - 500	15,27	13,01	0,85	-0,16	-0,16
Вертикальное расчленение рельефа (м/км <sup>2</sup> )	< 340	9,80	18,26	1,86	0,96	0,62
	340 - 430	19,81	20,87	1,05	0,06	0,05
	430 - 520	28,93	37,61	1,30	0,33	0,26
	520 - 610	22,26	15,6	0,70	-0,33	-0,36
	610 - 700	12,88	3,38	0,26	-0,82	-1,34
	700 - 990	6,31	4,28	0,68	-0,36	-0,39
Землепользование	Вода	0,24	0	0	-1,11	-2,89
	Лес	80,72	59,90	0,74	-0,29	-0,30
	Трава	0,12	0,20	1,67	0,70	0,49
	Сельское	8,44	5,28	0,63	-0,42	-0,47
	Кустарник	7,73	24,46	3,16	2,41	1,15
	Площадь	2,70	10,16	3,76	3,07	1,33
	Голая земля	0,05	0	0	-1,11	-1,22
Кора выветривания	Сапролит	2,60	0	0	-1,11	-5,28
	Сиалит	8,26	2,42	0,29	-0,79	-1,23

	Сиалферит	62,62	86,87	1,39	0,43	0,33
	Феросиалит	26,52	10,71	0,40	-0,66	-0,91
Расстояния до эрозионной сети (м)	0 - 200	28,02	50,7	1,81	0,90	0,59
	200 - 400	22,99	24,59	1,07	0,08	0,07
	400 - 600	19,11	14,87	0,78	-0,25	-0,25
	600 - 800	14,32	5,67	0,40	-0,67	-0,93
	800 - 1100	11,84	2,85	0,24	-0,85	-1,43
	> 1100	3,73	1,33	0,36	-0,72	-1,03

#### 4.1.4 Валидация модели

Важным этапом подготовки карт оползневой восприимчивости и оползневой опасности является определение степени соответствия полученных моделей реальным фактическим данным (валидация моделей). Эта задача может быть решена путем сравнения полученных карт устойчивости территории с картой инвентаризации оползней. Наибольшее распространение при валидации моделей оползневой опасности и восприимчивости получил метод ROC – анализ кривой ошибок (англ. Receiver Operating Characteristic). ROC-анализ - метод оптимального разграничения двух классов, сформированных с помощью диагностического теста. Кривая ROC представляет собой графическое отображение взаимосвязи между вероятностью наличия истинно-положительных значений или чувствительности (правильно предсказанного события) на оси X и ложноположительной вероятностью или специфичностью (неправильно предсказанным событием) по оси Y [25]. Кривая ROC показывает связь между вероятностью истинно положительных идентифицированных оползней и вероятностью ложноположительных идентифицированных оползней по мере изменения вероятности предельного значения. Чем ближе кривая ROC приближается к левому краю графика и верхней его границе, тем точнее будут результаты анализа. Так как чувствительность стремится к 1, а специфичность стремится к 0, то мерой адекватности модели может служить площадь под кривой ROC - AUC [189] – чем больше площадь, тем точнее классификация. Значение AUC могут изменяться от 0,5 для моделей с нулевой точностью прогнозирования до 1 для моделей с идеальной

точностью прогнозирования [189]. Значения AUC были рассчитаны с использованием 70% оползней (обучающая выборка) и 30% (данные для проверки) от общего количества оползней соответственно.

#### **4.1.5 Результаты исследования и обсуждение**

В работе была проанализирована взаимосвязь между факторами, вызывающими оползни, и фактическим возникновением оползней в районе проводимых исследований. Соотношения частоты оползней и значения веса были определены с использованием моделей FR, LSA и SI, соответственно (Таблица 4.3). Для рассматриваемой территории индекс оползневой восприимчивости (LSI) при подготовке карт был рассчитан по уравнениям (4.14), (4.16), и (4.18). Полученные значения LSI варьировали, в зависимости от метода: от 11,3 до 98,9 (метод частотного анализа (FR)) (Рисунок 4.4а Рисунок 4.4), от -15,2 до 34,9 (метод анализа оползневой восприимчивости (LSA)) (Рисунок 4.5а) и от -58,7 до 19,4 (метод статистического индекса (SI)) (Рисунок 4.6а). После этого были получены карты оползневой опасности на основе значений LSI с использованием метода классификации естественных границ в ArcGIS (Рисунок 4.4б, Рисунок 4.5б, Рисунок 4.6б).

В результате район исследования был разделен на пять зон оползневой опасности: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

Результат анализа FR показал, что зоны с очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой оползневой опасностью составляют: 21,02; 22,26; 20,39; 16,36 и 19,97 % площади изученной территории, соответственно. В результате анализа LSA оценка показала, что 25,01; 20,95; 17,16; 19,52 и 17,37 % площади района исследования находится в зонах очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой оползневой опасности, соответственно. По результатам анализа SI зоны очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой оползневой опасности составляют: 19,26; 18,54; 24,14; 19,33 и 18,73 % площади территории исследований (Таблица 4.4).

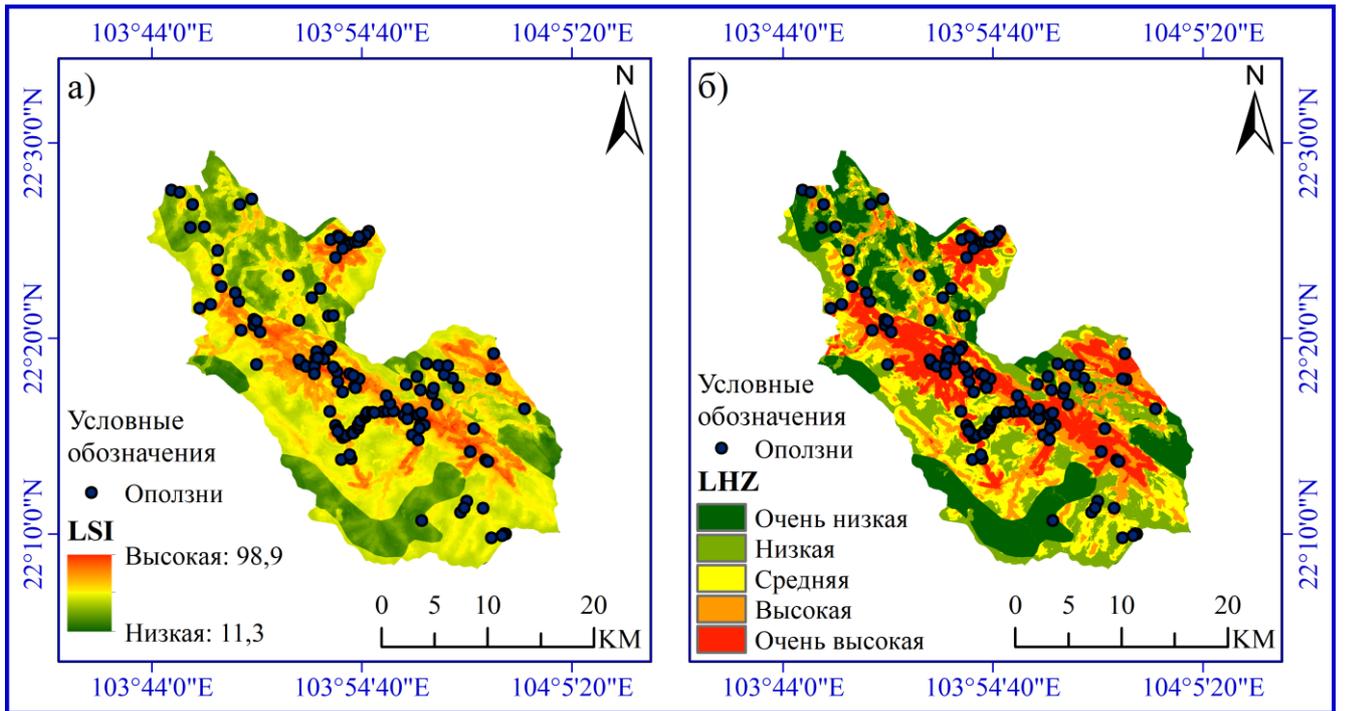


Рисунок 4.4 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением метода частотного анализа

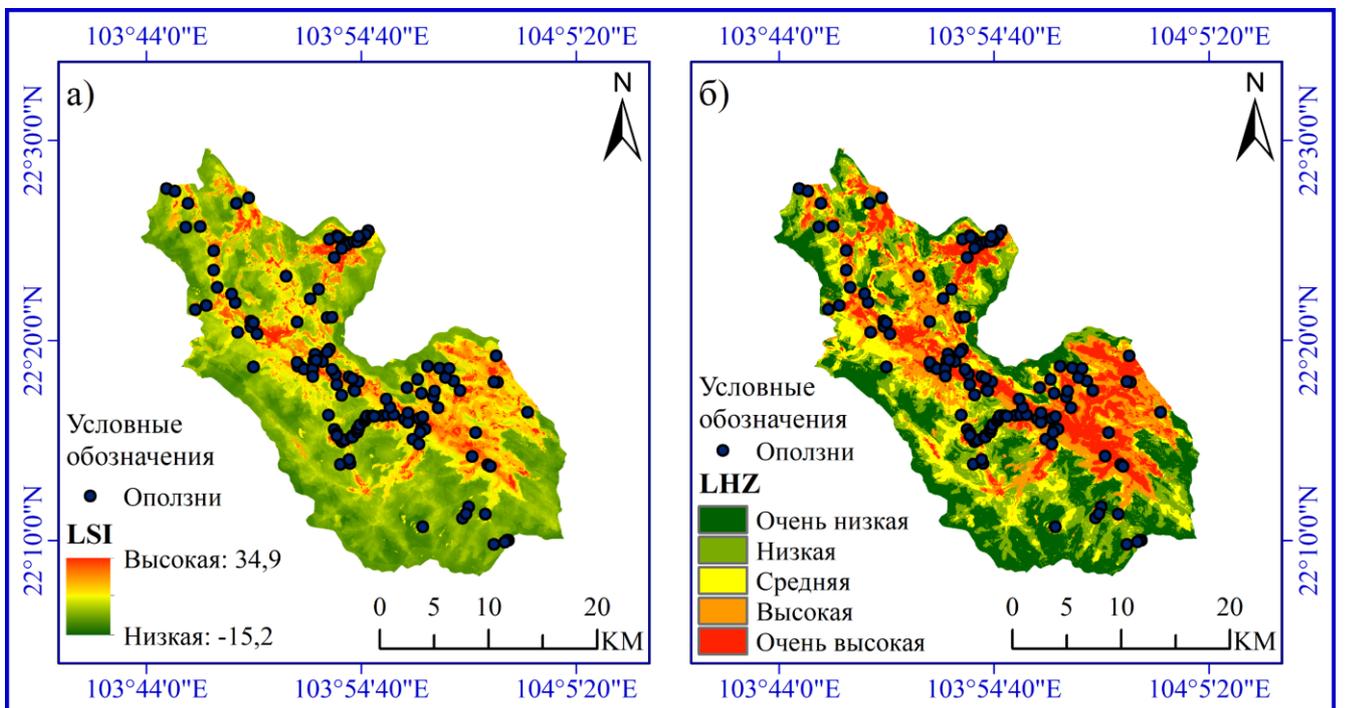


Рисунок 4.5 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением метода анализа оползневой восприимчивости

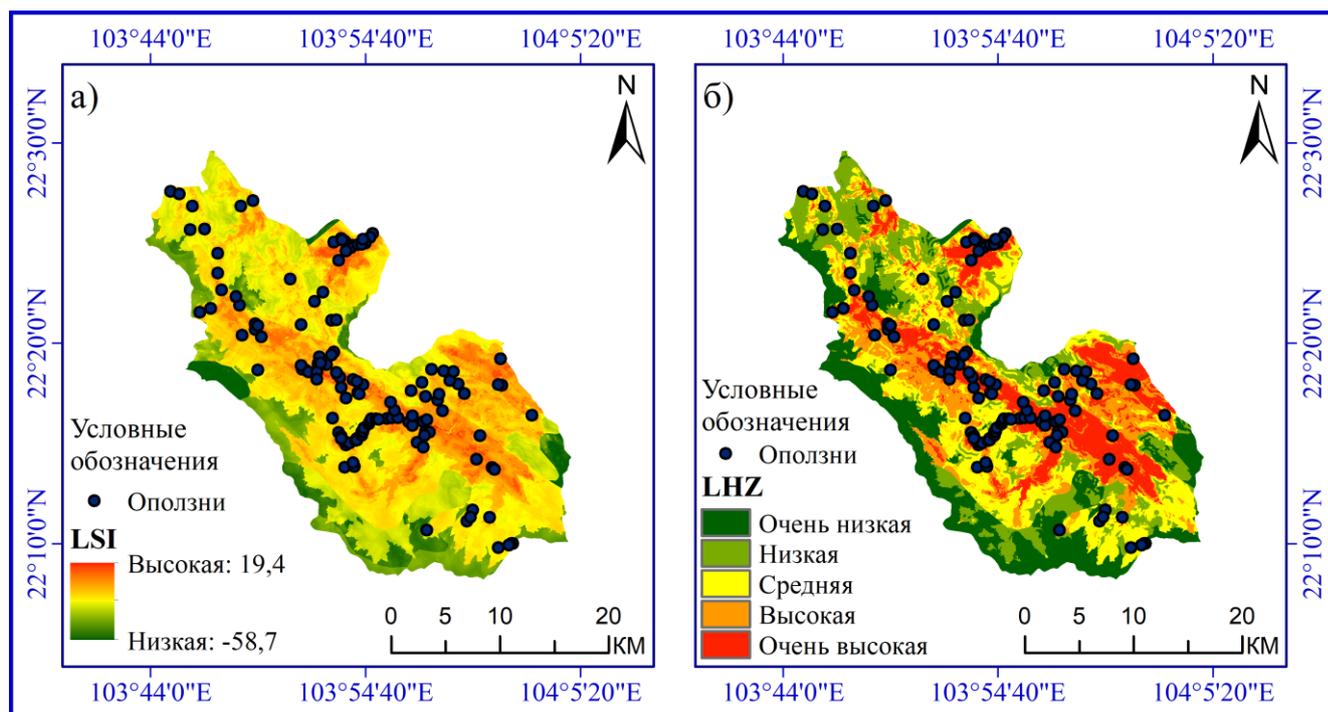


Рисунок 4.6 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением метода статистического индекса

Зоны высокой и очень высокой оползневой опасности, определенные методами FR и LSA, в основном находятся в коммунах Чунгчай, Хаутхао, г. Шапа, Лаочай, Шупан, Тханьфу, на севере коммун Банхо и Намшай. Северные и южные участки района Шапа относятся к зонам низкой и очень низкой оползневой опасности. Согласно оценке по методу SI, зоны низкой и очень низкой оползневой опасности расположены в коммунах Тазянгфинь, Банкхоанг, Таван, Шапа и на юго-западе района исследования.

Таблица 4.4 – Статистика оползней по классам оползневой опасности

Метод	Класс		Очень низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
FR	% площадь класса		21,02	22,26	20,39	16,36	19,97
	% площадь	Обучение	3,17	3,78	13,47	13,02	66,56
		Проверка	0	5,80	10,57	10,39	73,24
LSA	% площадь класса		25,01	20,95	17,16	19,52	17,37
	% площадь	Обучение	2,98	9,07	6,20	13,47	68,28
		Проверка	4,12	5,72	1,82	17,46	70,87
SI	% площадь класса		19,26	18,54	24,14	19,33	18,73

	%	Обучение	0,48	3,36	15,49	13,43	67,23
	площадь	Проверка	0	3,06	11,88	12,83	72,22

Процент успеха моделей для данных обучающей выборки составил - 74,60% (FR), 70,82% (LSA) и 76,36% (SI). Адекватность прогнозов для данных проверки составила - 77,01 % (FR), 74,36% (LSA) и 78,11% (SI).

AUC ROC (площадь под кривой ошибок) анализ показал высокую результативность всех трех используемых моделей, превышающую 75%. При этом наиболее точные результаты были получены с помощью SI модели (Рисунок 4.7).

Анализ полученных результатов показал, что высокую и очень высокую оползневую опасность имеют территории распространения кор выветривания сиалферита и феросиалита. Оползни чаще встречаются в сельскохозяйственных и жилых районах, кроме того, развитие дорожной сети на территории исследования приводит к увеличению оползневой опасности. Сочетание земляных работ на склонах и большого количества осадков увеличивает вероятность формирования оползней. Все это указывает на значительную роль техногенного фактора в активизации оползневого процесса.

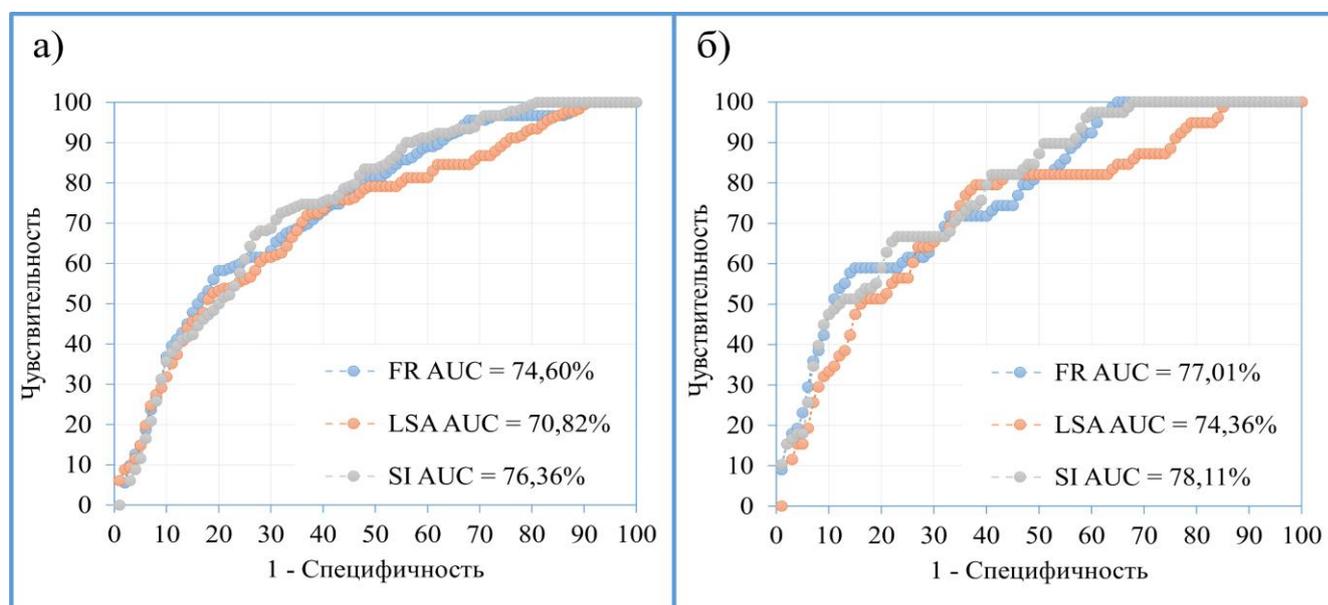


Рисунок 4.7 – Кривая успеха (а) и прогнозирования (б) моделей FR, LSA и SI

#### 4.2 Влияние разрешения цифровой модели на оценку оползневой опасности (на основе моделирования оползневой опасности методом МАНР)

Качество имеющихся исходных данных играет важную роль в достоверности

результатов моделирования оползневой опасности. Параметр пространственного разрешения является одним из наиболее значимых свойств географических данных, обуславливающий их качество. Пространственное разрешение – величина, определяющая количество точек (элементов растрового изображения) на единицу площади (или единицу длины). Разрешение растровой структуры данных может быть охарактеризовано в терминах размера ячеек сетки. Выбор оптимального размера зависит от целей исследований и масштаба анализа.

В настоящем исследовании изучалось влияние пространственного разрешения цифровой модели рельефа (ЦМР) на достоверность оценки оползневой опасности в районе Шапа провинции Лаокай. Для решения поставленной задачи был использован модифицированный метод анализа иерархий (МАНР) при двух разных разрешениях ЦМР - 30 м (МАНР30) и 10 м (МАНР10). В исследовании Нгуена Ч. К. [45], модель МАНР30 использовалась для оценки оползневой опасности в северо-западном регионе провинции Лаокай, который включал район Батсат, район Шапа и город Лаокай. Модель МАНР10 была использована автором для оценки оползневой опасности в районе Шапа [18].

Обе модели учитывали следующие факторы оползнеобразования: 1) крутизна склонов; 2) состав грунтов; 3) расстояние от активных разломов; 4) вертикальное расчленение рельефа; 5) горизонтальное расчленение рельефа; 6) обводненность массивов; 7) количество осадков; 8) тип растительности. В результате были построены карты, на которых район исследования был разделен на пять зон по оползневой опасности: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая. Достоверность карт определялась с использованием обучающей выборки (91 оползень - обучающая выборка и 39 оползней – данные для проверки).

Зоны очень высокой и очень низкой оползневой опасности вызывают наибольший интерес для анализа, поскольку категории неустойчивости/устойчивости для них выражены наиболее контрастно. Уровень достоверности, полученный для этих двух зон имеет определяющее значение для оценки точности карт оползневой восприимчивости и опасности (Рисунок 4.8 и Рисунок 4.9).

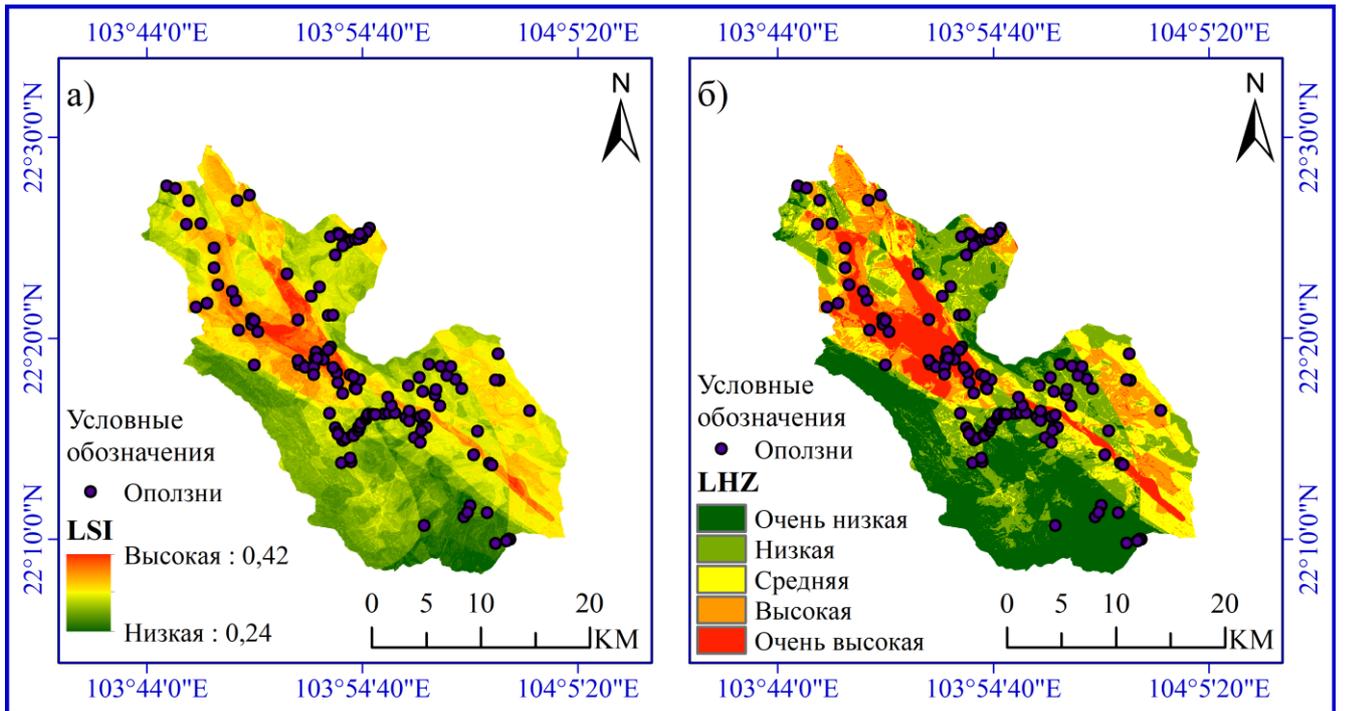


Рисунок 4.8 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением модели МАНР30

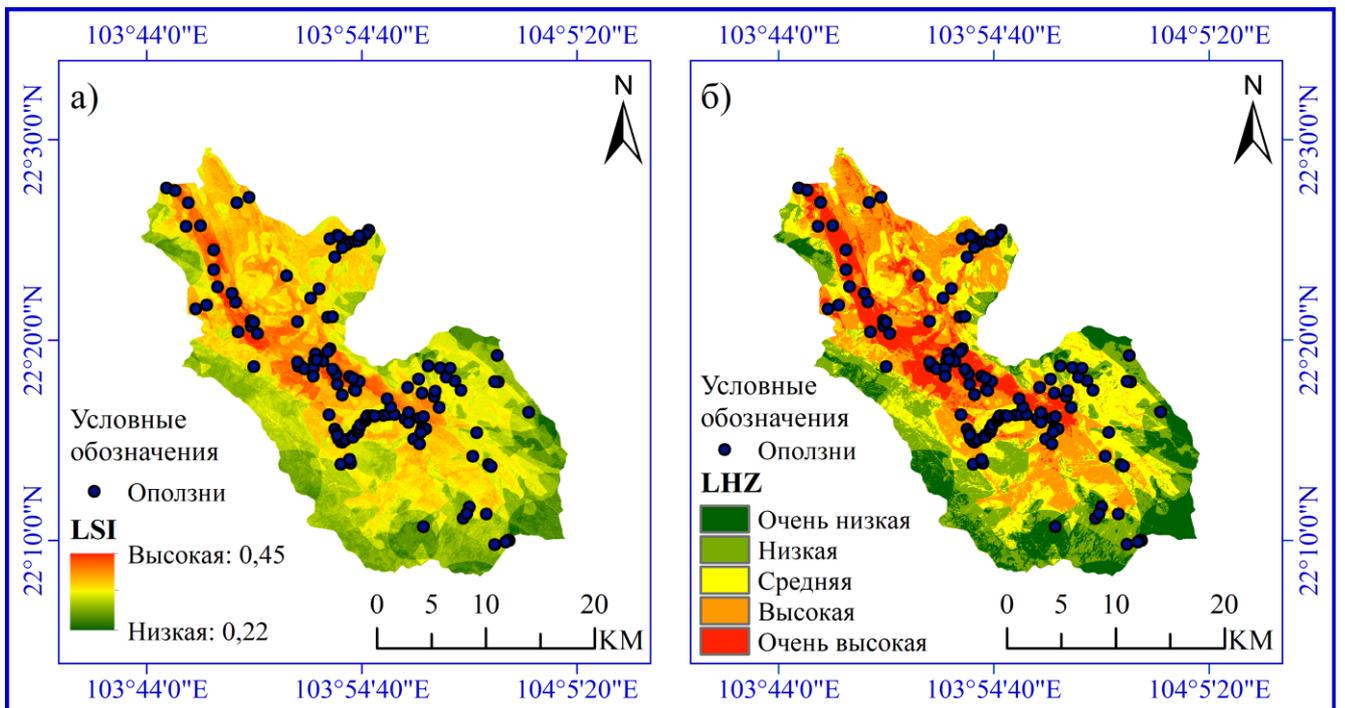


Рисунок 4.9 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением модели МАНР10

Распределение зон оползневой опасности по площади приведено на Рисунок 4.10 и в Таблица 4.5. Площадь зоны очень низкой оползневой опасности составляет 30,26% на карте, построенной на основе ЦМР, с разрешением 30м. (МАНР30) и

24,86%, на карте, построенной на основе ЦМР, с разрешением 10м. (МАНР10). Зона очень высокой оползневой опасности занимает 12,3% (МАНР 30) и 14,73% (МАНР10) соответственно.

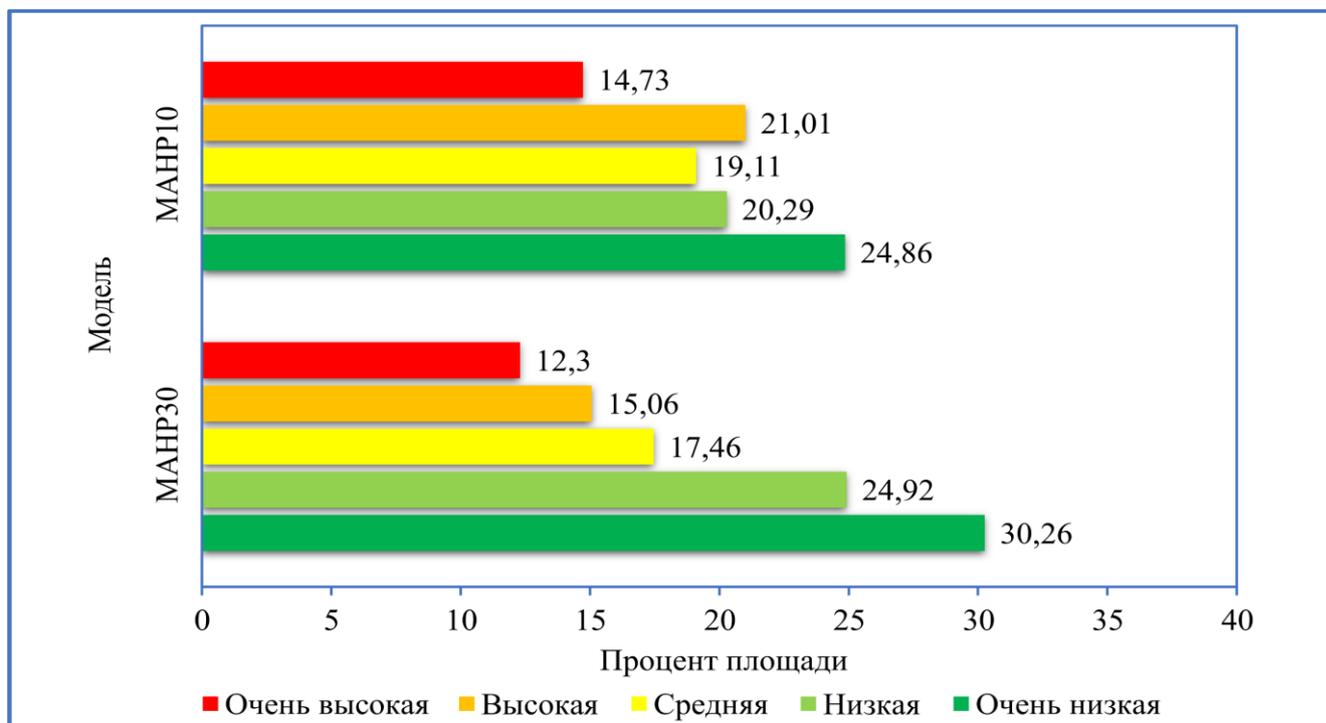
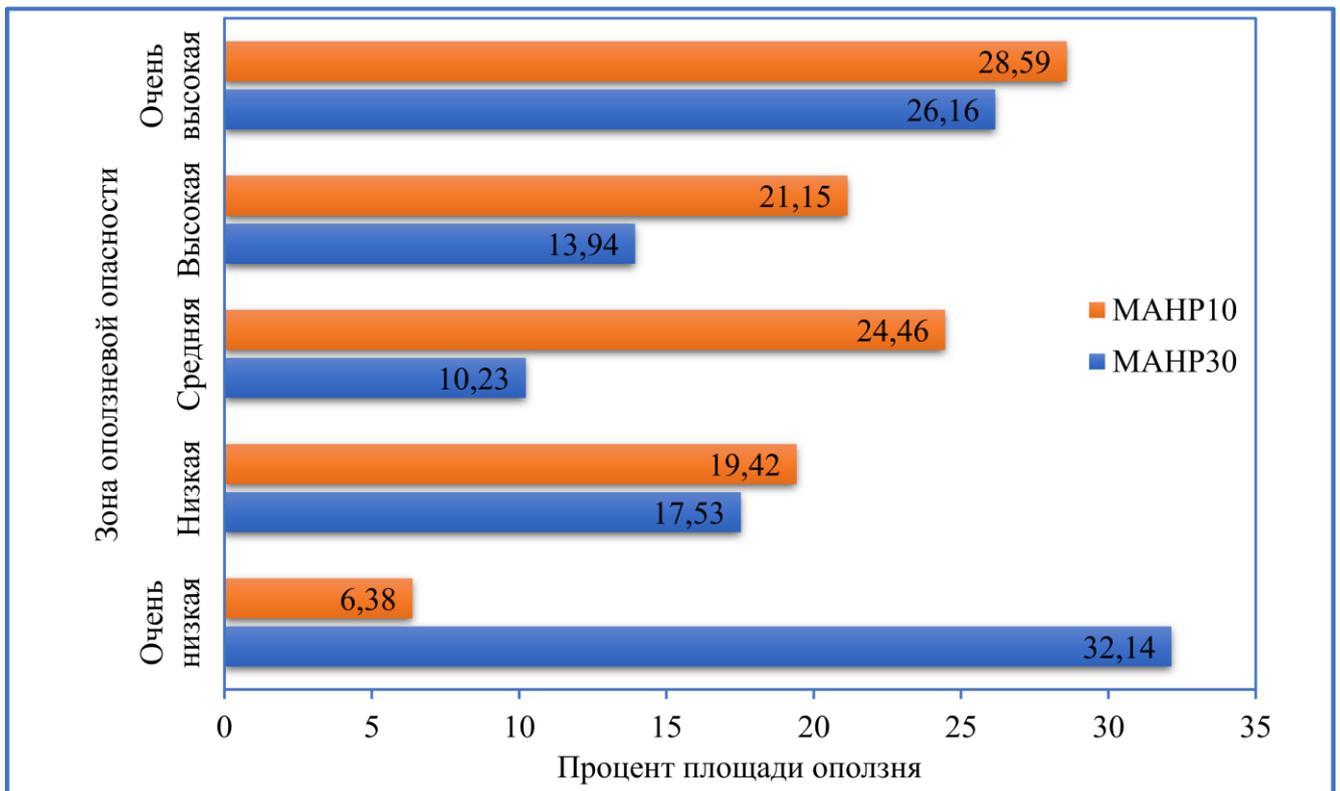


Рисунок 4.10 – Распределение зон оползневой опасности по площади с использованием моделей МАНР30 и МАНР10

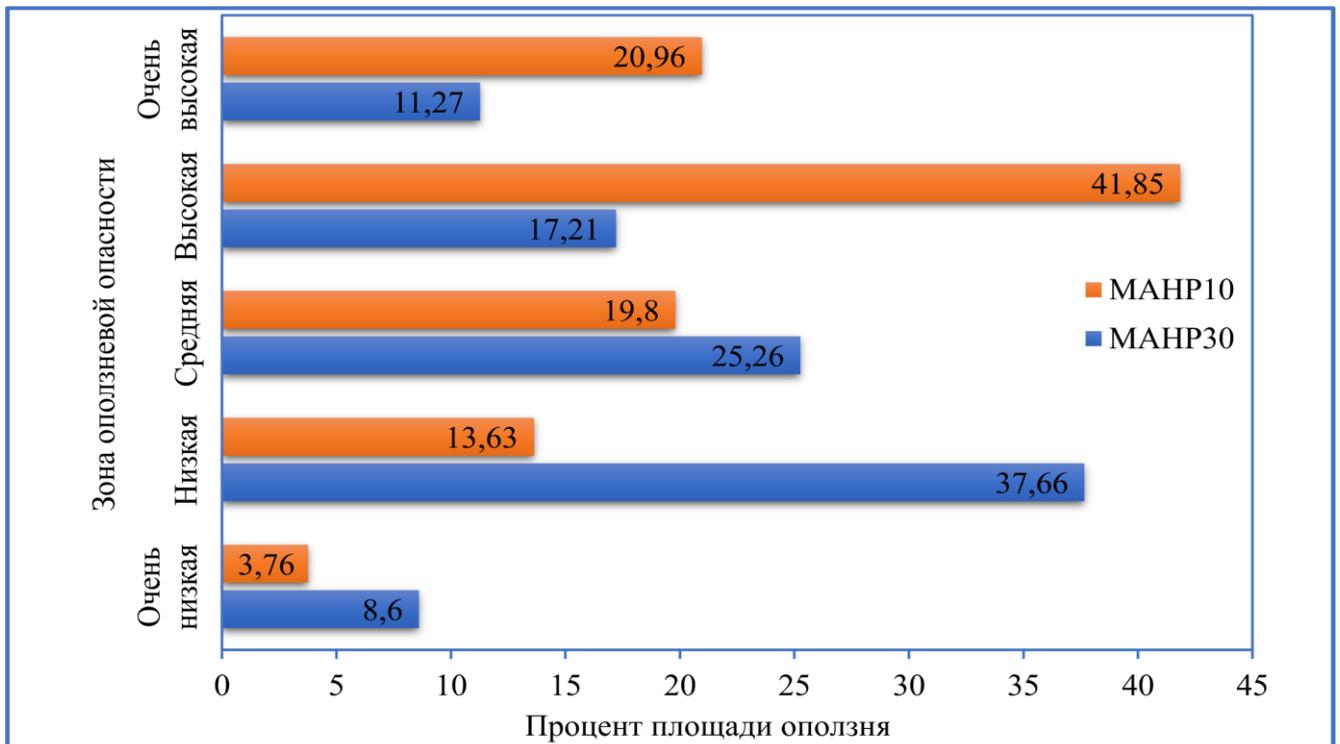
Таблица 4.5 – Распределения оползней по классам оползневой опасности

Модель		Класс	Очень низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
МАНР30	% площадь класса		30,26	24,92	17,46	15,06	12,30
	% площадь	Обучение	32,14	17,53	10,23	13,94	26,16
		Проверка	8,60	37,66	25,26	17,21	11,27
МАНР10	% площадь класса		24,86	20,29	19,11	21,01	14,73
	% площадь	Обучение	6,38	19,42	24,46	21,15	28,59
		Проверка	3,76	13,63	19,80	41,85	20,96

Чтобы оценить, какая модель является более достоверной, было изучено распределение оползней в пределах, выделенных по степени опасности зон с использованием результатов по обучающей выборке и данных проверки (Рисунок 4.11 и Рисунок 4.12).



*Рисунок 4.11 – Сравнение распределения процента площади оползней с использованием обучающей выборки*



*Рисунок 4.12 – Сравнение распределения процента площади оползней с использованием данных проверки*

Выполненный анализ показал, что модель MANP10 является более

достоверной (площадь оползней в зоне очень высокой опасности, полученная с использованием обучающей выборки – 28,59%, площадь оползней, полученная в зоне очень высокой опасности с использованием данных проверки - 20,96%), в сравнении с моделью МАНР30 (площадь оползней в зоне очень высокой опасности, полученная с использованием обучающей выборки – 26,16%, площадь оползней, полученная в зоне очень высокой опасности с использованием данных проверки – 11,27%). Аналогичные результаты получены и для зоны с очень низкой опасностью. В модели МАНР10 ее площадь составила 6,38% (для обучающей выборки) и 3,76% (для данных проверки), в модели МАНР10 – 32,14% и 8,6% соответственно.

AUC ROC (площадь под кривой ошибок) анализ так же показал, что при использовании ЦМР более высокого разрешения, достоверность модели увеличивается (Рисунок 4.13) и, таким образом, можно сделать вывод, что качество оценки оползневой опасности имеет прямую корреляцию с пространственным разрешением цифровой модели рельефа .

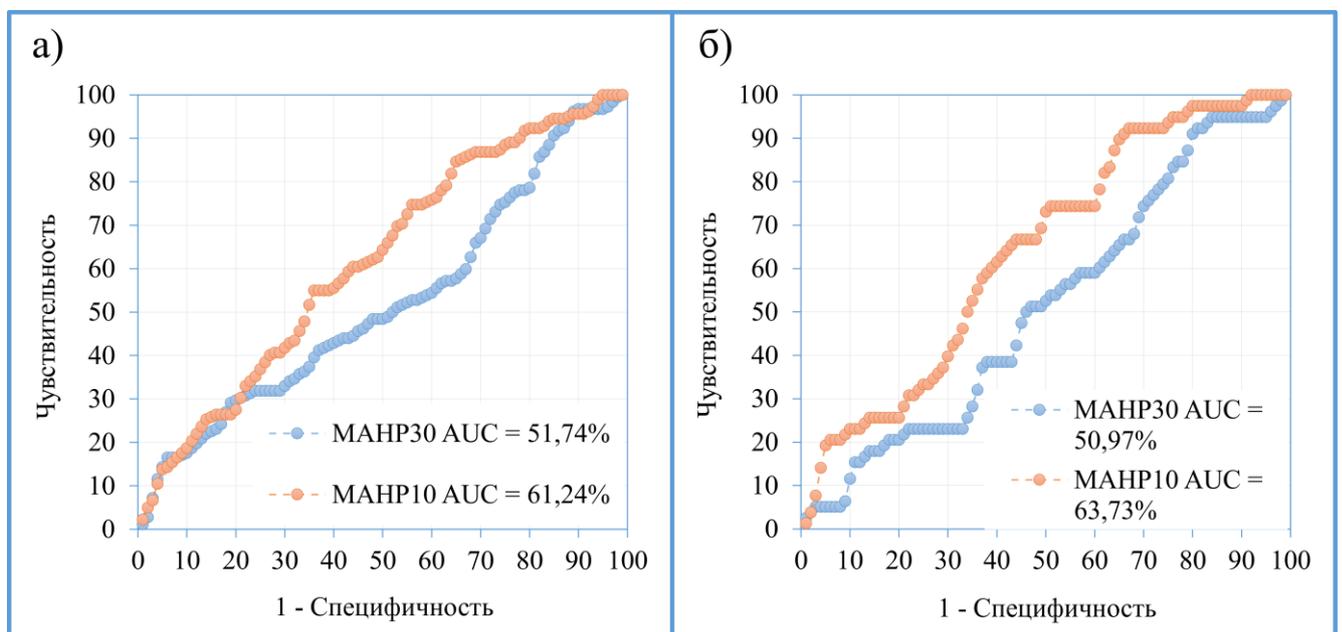


Рисунок 4.13 – Кривая успеха (а) и прогнозирования (б) моделей МАНР30 и МАНР10 по кривой ROC

### **4.3 Влияние метода исследований и набора факторов оползнеобразования на оценку оползневой опасности**

Как указывалось ранее, метод исследования может оказать существенное влияние на результаты оценки оползневой опасности. В последние годы, для решения этой задачи, как правило используются количественные подходы, так как они считаются более объективными.

Обоснование набора факторов оползнеобразования и их классификация имеют решающее значение при исследованиях оползневой опасности [90]. При этом часто они выбираются случайно и субъективно. Перед началом анализа необходимо оценить прогностические возможности выбранных исходных факторов и исключить те, которые имеют очень низкую значимость. Это может существенным образом уменьшить неопределенность и повысить достоверность моделей оползневой опасности [144].

Для оценки влияния метода исследований и набора факторов оползнеобразования на адекватность итоговых результатов, были проанализированы результаты оценки оползневой опасности, полученные на основе полуколичественного мультикритериального подхода -модифицированного метода анализа иерархий (МАНР) и количественных статистических методов.

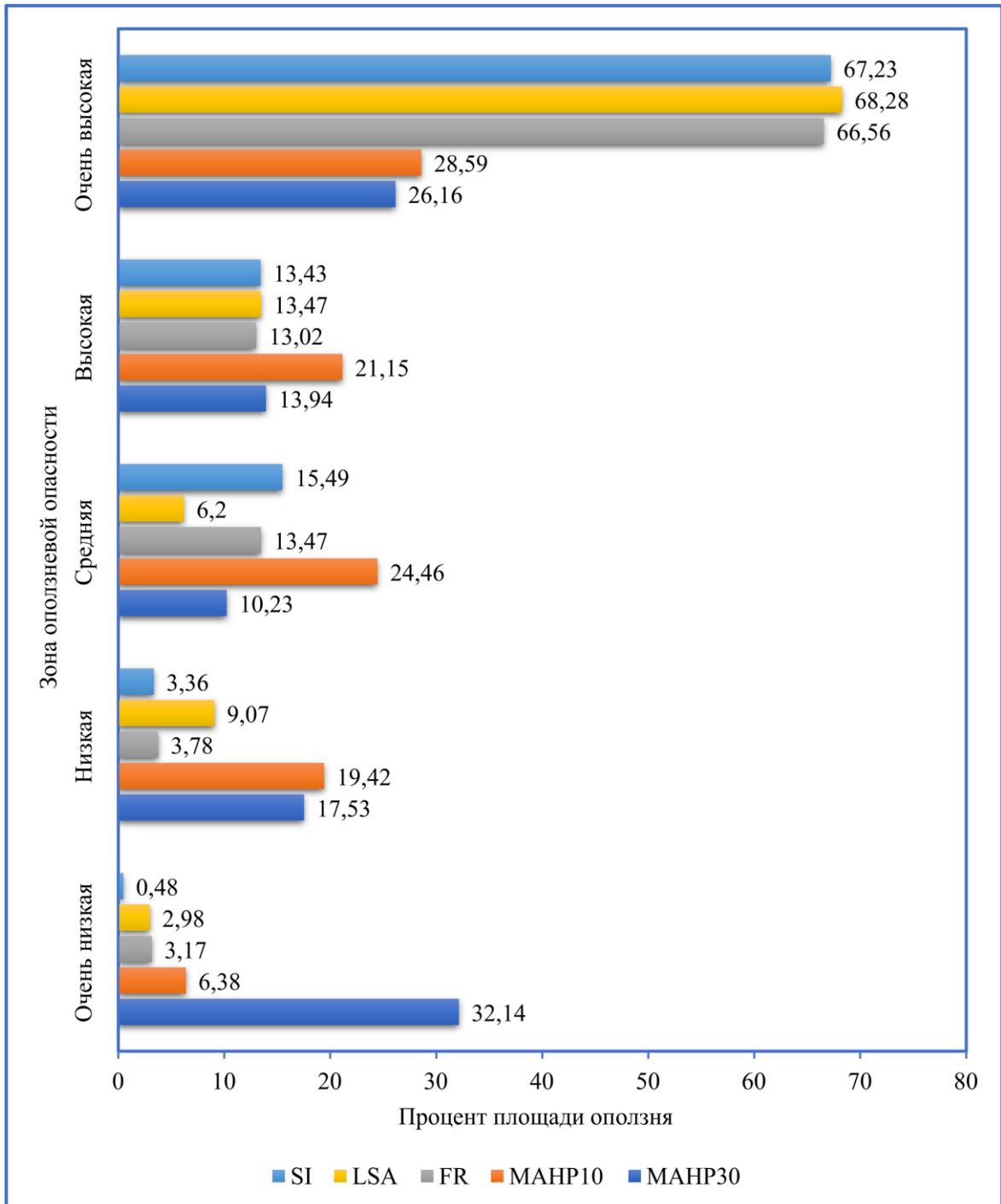
При использовании МАНР были использованы восемь факторов: 1) крутизна склонов; 2) тип коры выветривания; 3) расстояние от активных разломов; 4) вертикальное расчленение рельефа; 5) горизонтальное расчленение рельефа; 6) обводненность массивов; 7) количество осадков; 8) тип растительности.

При использовании статистических методов, были выбраны девять факторов: 1) высота над уровнем моря; 2) расстояние до дорог; 3) крутизна склонов; 4) расстояние от разломов; 5) количество осадков; 6) вертикальное расчленение рельефа; 7) землепользование; 8) тип коры выветривания; 9) расстояние до эрозионной сети.

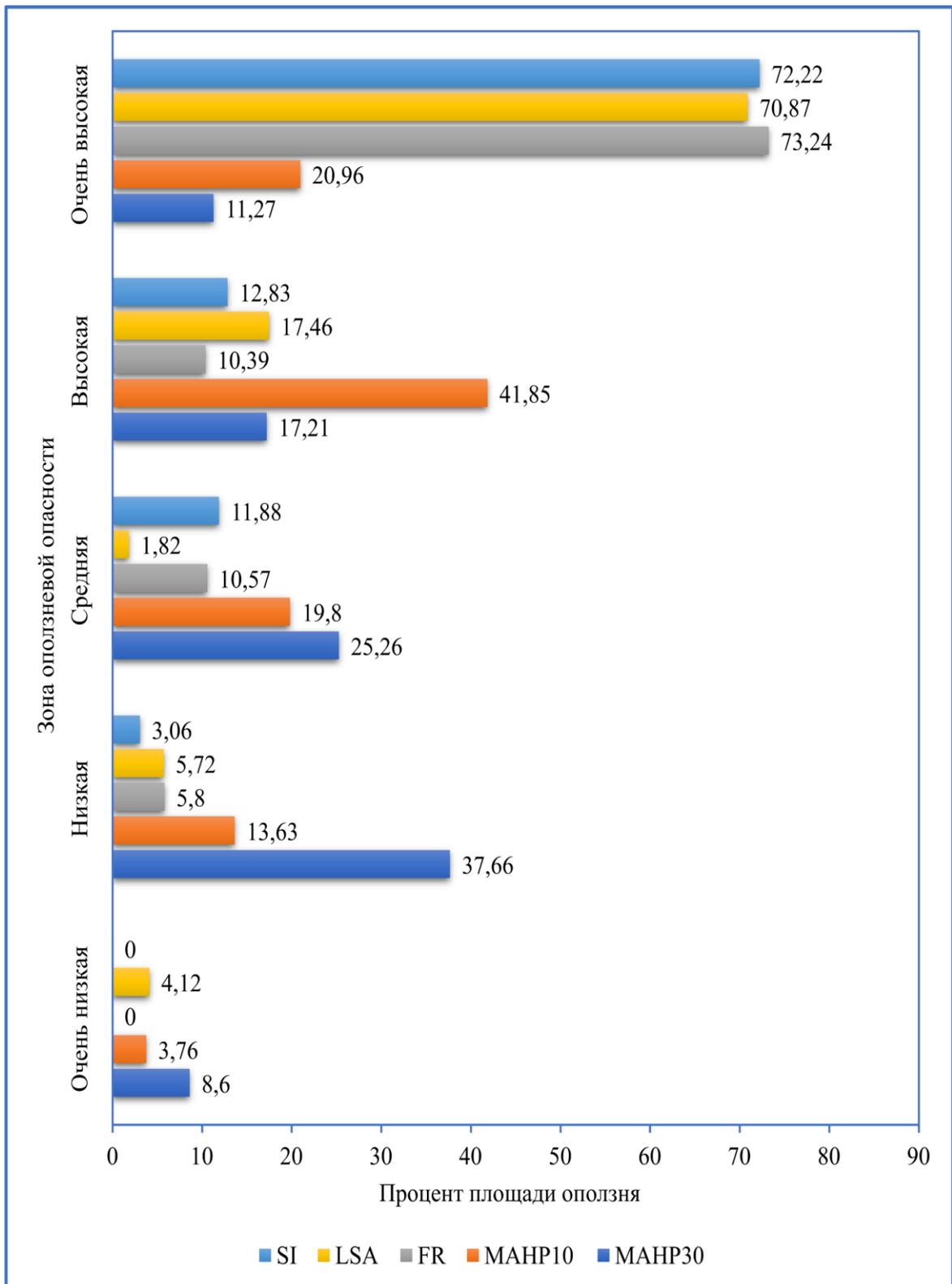
В модели МАНР использовались природные факторы, хозяйственное освоение территории в виде фактора землепользования не учитывалось. Однако, землепользование признано во всем мире одним из наиболее важных факторов,

определяющих оползневую опасность.

На Рисунок 4.14 и Рисунок 4.15 приведено сравнение распределения оползней по площади в пределах выделенных по степени оползневой опасности зон с использованием результатов по обучающей выборке и данных проверки полученных для статистических и МАНР моделей.



*Рисунок 4.14 – Сравнение распределения процента площади оползней с использованием обучающей выборки*



*Рисунок 4.15 – Сравнение распределения процента площади оползней с использованием данных проверки*

Анализ представленной информации, позволяет сделать вывод, что статистические модели более достоверны (около 70% оползней находится в зоне очень высокой опасности). В то время как для МАНР моделей их количество

составляет менее 30%. Аналогичным образом, статистические модели показали большую достоверность, чем МАНР модели, в зоне очень низкой опасности. Таким образом, количественные модели доказали свою большую эффективность в сравнении с полуколичественным подходом. Учитывая, что при оценке достоверности как МАНР моделей, так и статистических моделей, использовалась одна и та же карта инвентаризации оползней, но разный набор факторов, в дополнение можно сделать вывод о важности правильного их выбора.

Таким образом, качество решения задачи зависит не только от наличия и качества данных, но и от знаний и опыта исследователя, использованных методов и набора факторов оползнеобразования.

### **Выводы**

На примере района Шапа провинции Лаокай (северо-запад Вьетнама) апробирована методика оценки оползневой опасности ПТС регионального уровня с использованием ГИС, базирующейся на совместном анализе результатов комплекса статистических методов (частотного анализа, статистического индекса, анализа оползневой восприимчивости), а также основанного на мультикритериальном подходе, методе анализа иерархий.

В результате район исследования был разделен на пять зон по потенциалу развития оползней: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

Результат анализа статистическими методами показал, что зоны высокой и очень высокой оползневой опасности, определенные методами FR и LSA, в основном находятся в коммунах Чунгчай, Хаутхао, г. Шапа, Лаочай, Шупан, Тханьфу, на севере коммун Банхо и Намшай. Северные и южные участки района Шапа относятся к зонам низкой и очень низкой оползневой опасности. Согласно оценке по методу SI, зоны низкой и очень низкой оползневой опасности расположены в коммунах Тазянгфинь, Банкхоанг, Таван, Шапа и на юго-западе района исследования. Оползни чаще встречаются в сельскохозяйственных и жилых районах, кроме того, развитие дорожной сети на территории исследования приводит к увеличению оползневой опасности. Сочетание земляных работ на склонах и большого количества осадков увеличивает вероятность формирования

оползней. Все это указывает на значительную роль техногенного фактора в активизации оползневого процесса.

AUC ROC (площадь под кривой ошибок) анализ показал высокую достоверность всех трех используемых статистических моделей, превышающую 75%. при этом наиболее точные результаты были получены с помощью SI модели.

Так же, было оценено влияние разрешения ЦМР на достоверность оценки оползневой опасности. Для решения поставленной задачи был использован модифицированный метод анализа иерархий (МАНР) при двух разных разрешениях ЦМР – 30 м (МАНР30) и 10 м (МАНР10). Выполненные исследования показали, что модель МАНР10 является более достоверной в сравнении с моделью МАНР30. Таким образом, качество оценки оползневой опасности имеет прямую корреляцию с пространственным разрешением цифровой модели рельефа.

Для оценки влияния метода исследований и набора факторов оползнеобразования на адекватность итоговых результатов, были проанализированы результаты оценки оползневой опасности, полученные на основе полуколичественного мультикритериального подхода -модифицированного метода анализа иерархий (МАНР) и количественных статистических методов. Анализ полученных результатов показал, что количественные статистические модели имеют большую достоверность, чем полуколичественные МАНР модели. Учитывая, что при оценке достоверности как МАНР моделей, так и статистических моделей, использовалась одна и та же карта инвентаризации оползней, но разный набор факторов, в дополнение можно сделать вывод о важности правильного их выбора.

Таким образом, качество решения задачи по оценке оползневой опасности зависит не только от наличия и качества данных, но и от знаний и опыта исследователя, использованных методов и набора факторов оползнеобразования.

Вышеизложенное позволяет сформулировать второе защищаемое положение:

***В основе оценки оползневой опасности на региональном уровне иерархии ПТС лежит специальное районирование территории, характеризующее***

*распространение оползней или условия их проявления. Оптимальным подходом для решения этой задачи является применение методов с использованием ГИС, базирующихся на совместном анализе результатов комплекса количественных статистических методов с обязательной валидацией моделей путем сравнения полученных карт оползневой опасности с картой инвентаризации оползней.*

## ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПТС ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ (КОММУНА ЧУНГЧАЙ РАЙОНА ШАПА)

Локальный уровень ПТС при оценке оползневой опасности характеризуется подобием инженерно-геологических условий территории, причинами возникновения оползней, а следовательно, типом и механизмом развития процесса, представляющего опасность для технического объекта, рассматриваемого как система структурно взаимосвязанных элементов, образующих единое целое. При оценке оползневой опасности ПТС локального уровня в исследованиях широко используются методы, аналогичные тем, которые применяются для ПТС регионального уровня. Однако, локальные прогнозы предполагают большую детальность и должны глубже оценивать природу и механизм оползневого процесса. Учитывая это, традиционные методы оценки региональной оползневой опасности могут оказаться малоэффективными и ненадежными. В данном исследовании на примере территории коммуны Чунгчай района Шапа (Вьетнам) была выполнена оценка оползневой опасности ПТС локального уровня на основе детерминистического метода, основанного на математических уравнениях, имитирующих физическую природу процесса. Его использование позволяет предсказать время разрушения склона и определить пороговые значения (например интенсивности и количества осадков), необходимые для создания систем раннего предупреждения об опасности развития оползневого процесса.

Важным моментом при применении детерминистических методов является тот факт, что получаемые результаты в виде оценки устойчивости не соответствуют по своей сути классическому определению оползневой опасности, под которой понимается вероятность развития оползневого процесса. В детерминистических моделях количественные вероятностные оценки невозможны по определению. Таким образом, результатом использования детерминистических методов является количественная оценка устойчивости склонов и полученная на этой основе качественная оценка оползневой опасности.

Для оценки оползневой опасности территории коммуны Чунгчай было

выполнено моделирование устойчивости склонов в Scoops3D, с последующим анализом результатов в геоинформационной системе. Достоверность модели Scoops3D была оценена путем сравнения полученных результатов с картой инвентаризации оползней.

Чунгчай (Рисунок 5.1) – горная коммуна площадью около 38,4 км<sup>2</sup>, расположенная на северо-востоке района Шапа на высоте от 581 до 2176 м над уровнем моря. Годовое количество осадков в этой местности колеблется от 2000 до 3600 мм. Чаще всего (около 80-85%) они выпадают в июне, июле и августе [195]. Чунгчай – территория с наибольшей оползневой опасностью в районе Шапа. Самым известным в этом месте является оползень Монг Сен (Рисунок 5.2), расположенный на трассе 4D, соединяющей г. Лаокай с районом Шапа. Оползневые процессы проявлялись там неоднократно -- в 1998, 2000, 2002, 2009 гг. Процесс выветривания массивов дочетвертичных отложений привел к образованию мощной коры выветривания. Исследования показали, что основной причиной, провоцирующей сход оползней, являются ливневые осадки [195, 200].

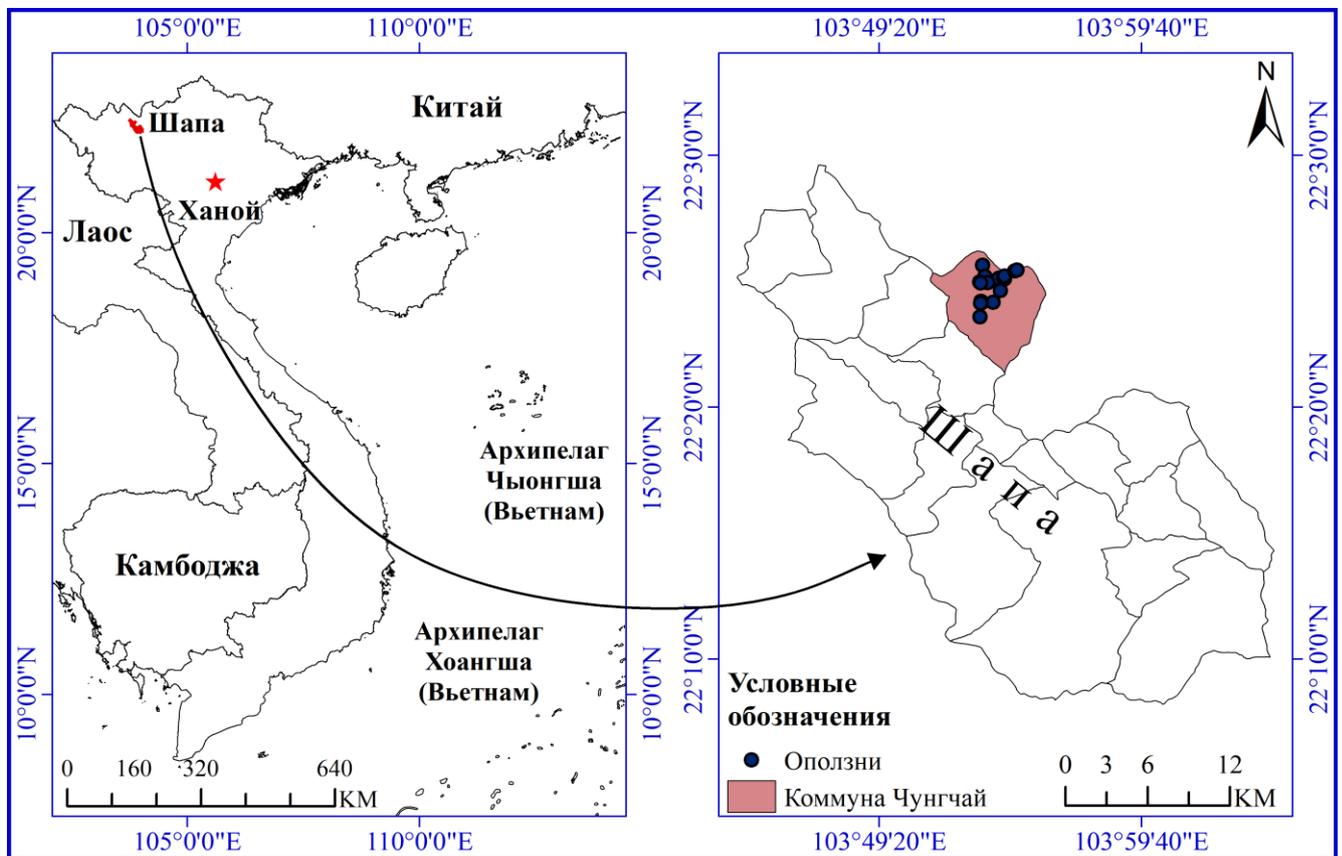


Рисунок 5.1 – Расположение коммуны Чунгчай



*Рисунок 5.2 – Монг Сен оползень, расположенный на трассе 4D. Фото Ч. К. Нгуена*

### **5.1 Метод исследования**

Метод Scoops3D [173], разработанный Геологической службой США (USGS), эффективно используется при оценке устойчивости склонов по всему миру, в том числе и во Вьетнаме [171, 200].

С помощью Scoops3D может быть проведен анализ устойчивости склонов на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) [174]. Для каждого потенциального оползня оценивается устойчивость сферической поверхности скольжения, охватывающей множество ячеек ЦМР, на основе 3D-версии упрощенного метода Бишопа [76] (Рисунок 5.3). Scoops3D анализирует устойчивость склона, вычисляя коэффициент устойчивости (FS) для множества потенциальных трехмерных оползней на различных глубинах, при этом каждая ячейка ЦМР включается во множество потенциальных деформаций. Программа определяет наименьший FS для каждой ячейки, а также размер (объем или площадь) потенциальных оползней. Результаты Scoops3D могут быть легко интегрированы в географическую информационную систему (ГИС).

Сеть точек поиска над ЦМР (см. Рисунок 5.3) выбирается автоматически, каждая из них является центром для потенциальной сферической поверхности разрушения [173]. Scoops3D включает в себя прогрессивной алгоритм поиска

поверхности скольжения.

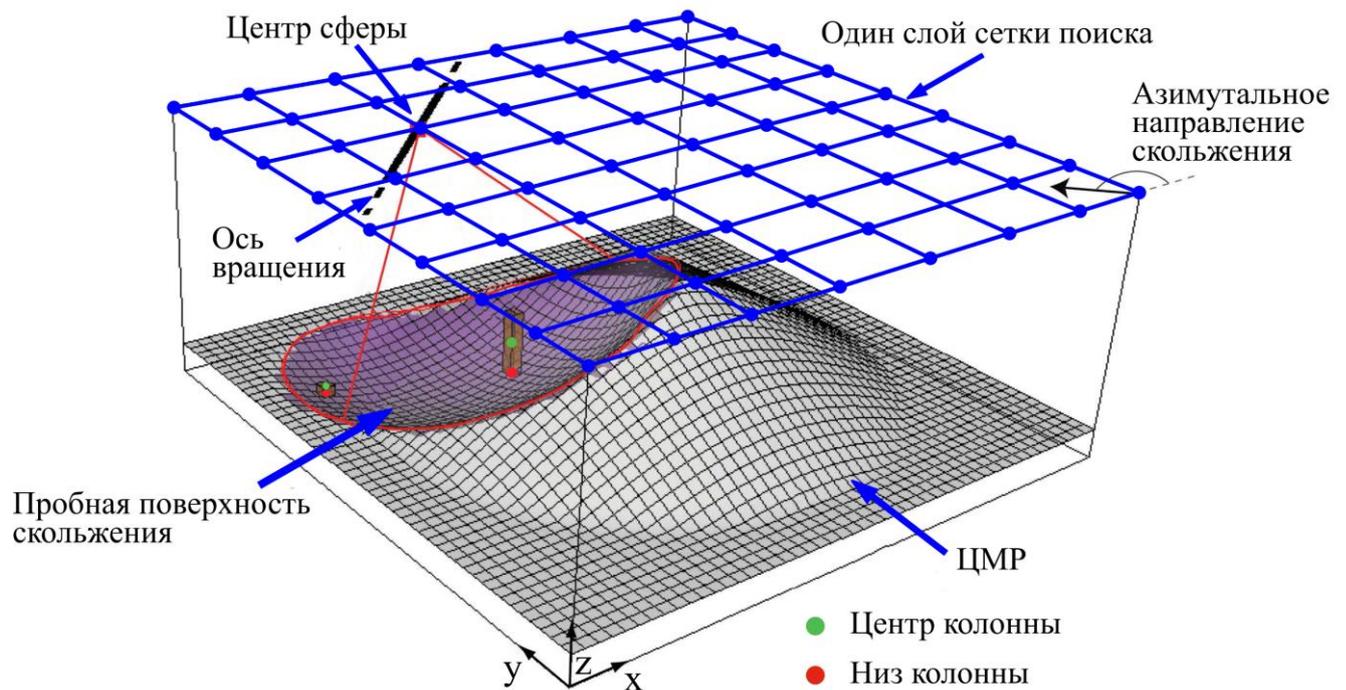


Рисунок 5.3 – Схематическая модель Scoops3D с одной потенциальной поверхностью скольжения [173]

В используемом Scoops3D простом методе Бишопа гарантировано равновесие моментов. Так же предполагается, что боковые силы, действующие на границах колонн грунта, горизонтальны. Схематическая диаграмма распределения сил, действующих на трехмерную колонну в 3D варианте упрощенного метода Бишопа, приведена на Рисунок 5.4.

Коэффициент устойчивости FS вычисляется как отношение величины средней прочности на сдвиг ( $s$ ) к действующему касательному напряжению ( $\tau$ ):

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad (5.1)$$

Прочность грунта на сдвиг рассчитывается на основе линейного критерия прочности Кулона-Мора:

$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan \varphi' \quad (5.2)$$

где:  $c'$  – эффективное сцепление;  $\varphi'$  – эффективный угол внутреннего трения;  $\sigma_n$  – нормальное напряжение,  $u$  – поровое давление (PWP), действующее по поверхности сдвига.

В уравнении (5.1) предельное равновесие достигается, когда  $FS = 1$ . Если

$FS < 1$ , то склон неустойчив. Коэффициент устойчивости определяется следующим образом [173] (Рисунок 5.4):

$$FS = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - u_{i,j} A_{h_{i,j}}) \tan \varphi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} (R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j})} \quad (5.3)$$

где:  $A_{h_{i,j}}$  – площадь пробной поверхности в основе колонны (i, j);

$R_{i,j}$  – радиус поверхности скольжения;

$W_{i,j}$  – вес колонны (i, j);

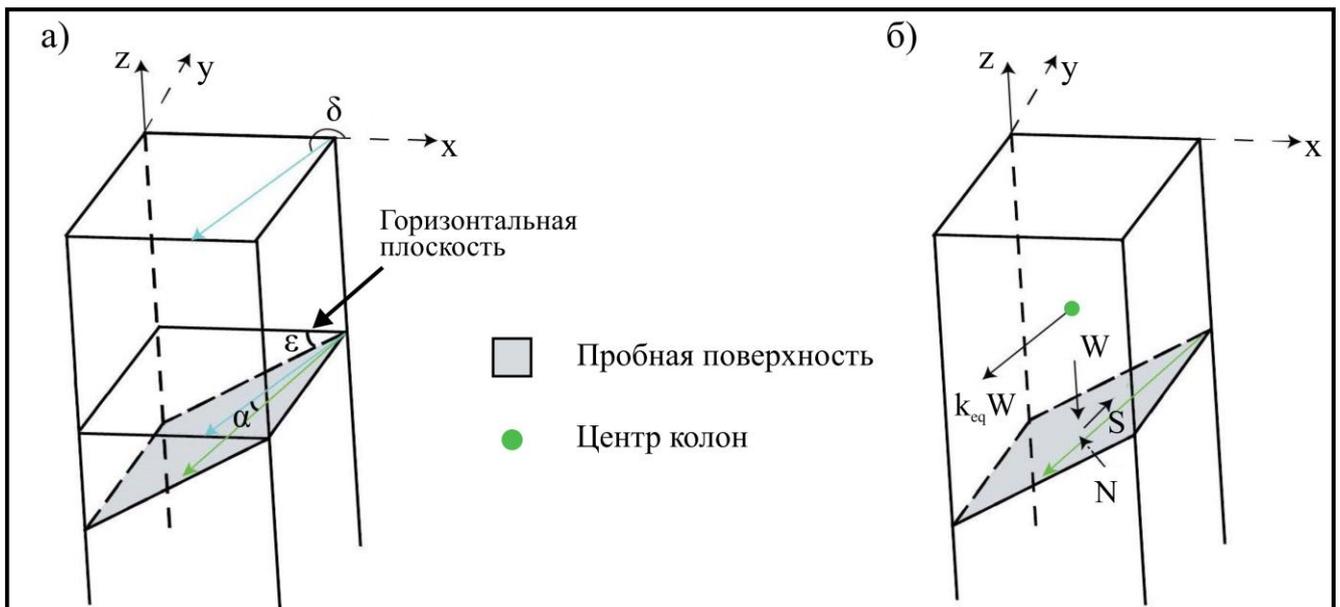
$\alpha_{i,j}$  – кажущееся падение в направлении скольжения;

$k_{eq}$  – коэффициент сейсмичности;

$e_{i,j}$  – вертикальное расстояние от центра колонны до в оси вращения,

$$m_{\alpha_{i,j}} = \cos \varepsilon_{i,j} + (\sin \alpha_{i,j} \tan \varphi_{i,j}) / FS_{3D} \quad (5.4)$$

$\varepsilon_{i,j}$  – истинный угол падения пробной поверхности скольжения



а – диаграмма направления скольжения (зеленый цвет); б – диаграмма сил, действующих на 3D колонну. Обозначения:  $\varepsilon$  – истинное падение пробной поверхности,  $\alpha$  – кажущееся падение в направлении скольжения,  $\delta$  – азимут падения (синий цвет);  $W$  – вес колонны,  $N$  – нормальная сила, действующая перпендикулярно поверхности скольжения;  $S$  – сила сопротивления сдвигу;  $k_{eq} W$  – горизонтальная сейсмическая нагрузка, действующая в центре колонны

Рисунок 5.4 – Схематическая диаграмма распределения сил, действующих на 3D колонну

Модель Scoops3D способна учитывать поверхности скольжения в любом

направлении в пределах ЦМР, а не только в ортогональной системе координат x-y.

На Рисунок 5.5 приведена схема оценки оползневой опасности с применением Scoops3D. Как видно из схемы, Scoops3D, как и другие модели, основанные на математических уравнениях, имитирующих физическую природу процесса, нуждается в исходной информации о геологическом строении, свойствах грунтов, гидрогеологических особенностях, сейсмическом воздействии. Точность полученных результатов во многом зависит от качества исходных данных [173].

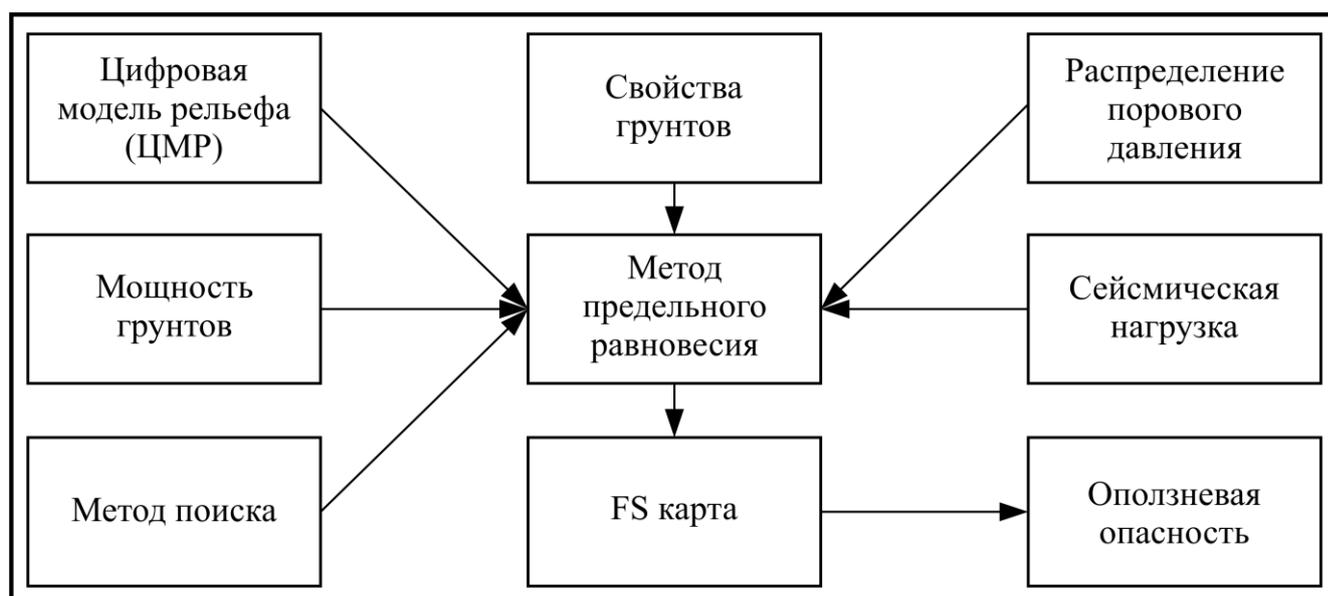


Рисунок 5.5 – Схема оценки оползневой опасности с применением Scoops3D

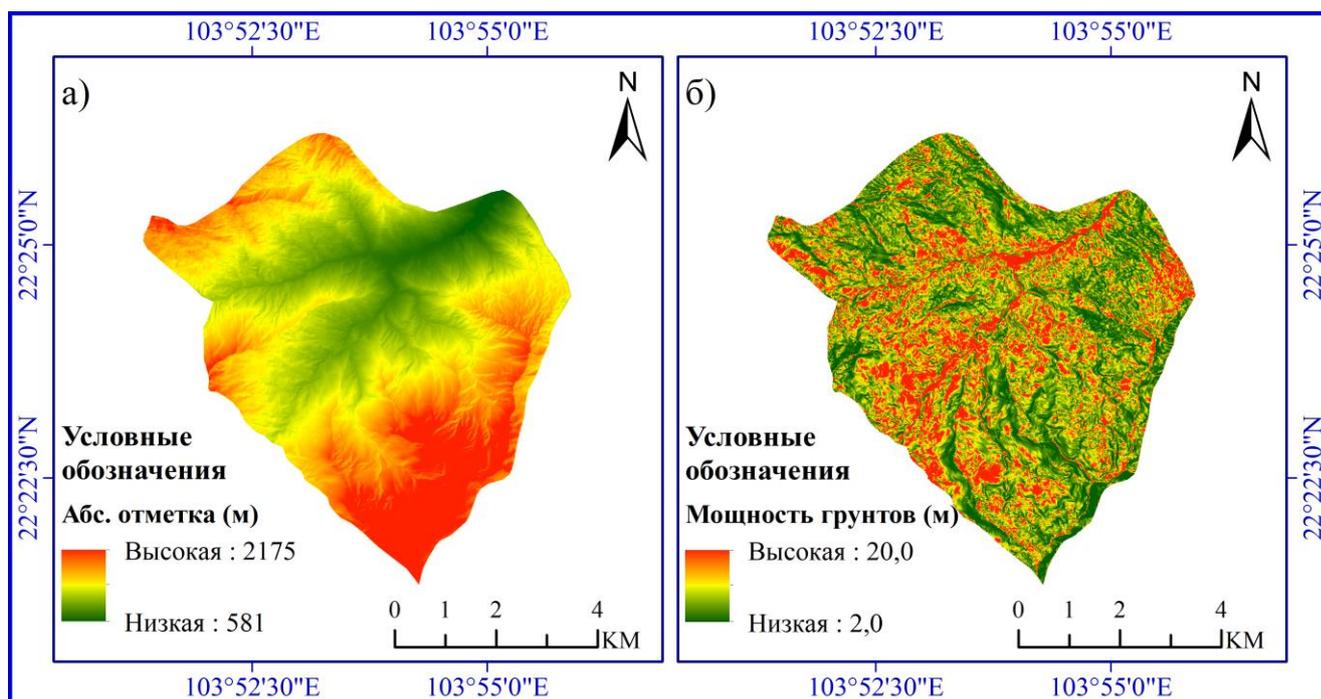
## 5.2 Исходные данные

Важными исходными данными для выполнения анализа является информация о рельефе местности [201].

ЦМР может быть создана с использованием различных методов, включая наземную съемку, аэрофотограмметрию, LiDAR (англ. Light Detection and Ranging) и InSAR (англ. Interferometric Synthetic Aperture Radar) съемки. Выбор соответствующего разрешения цифровой модели рельефа должен основываться на цели моделирования, особенностях района исследования и наличии соответствующих данных [85]. В настоящей работе для моделирования оползней в Scoops3D использована цифровая модель рельефа в растровом формате Esri ASCII с разрешением 5м. (Рисунок 5.6а). Разрешающая способность ЦМР зависит от точности и плотности исходных данных [173, 202]. Увеличение разрешающей

способности ЦМР приводит к росту количества аналитических колонн для каждой пробной поверхности, и, таким образом, повышается точность расчета [173].

Мощность коры выветривания зависит от набора факторов [136], таких как: литологический состав пород, кривизна и крутизна склона [79, 159], вертикальное расчленение рельефа [167], высота над уровнем моря [177] и другие [192]. При моделировании в Scoops3D мощность коры выветривания играет важную роль в получении надежной карты оползневой опасности [202]. Построение адекватной трехмерной геологической модели дорого и трудоемко, в особенности на больших площадях со сложной топографией [202]. В настоящем исследовании пространственное распределение мощности коры выветривания определялось на основе интерполяции по методу Чана и др. (2017) [203]. На Рисунок 5.6б показано распределение мощности потенциально оползневых грунтов в районе исследования.



*Рисунок 5.6 – Карта рельефа (а) и карта мощности потенциально оползневых грунтов (б)*

Триггером потери устойчивости на рассматриваемом участке является инфильтрация осадков в грунт, что приводит к подъему уровня подземных вод и росту порового давления, а также уменьшению прочности грунта на сдвиг [125].

Определение пространственного распределения порового давления усложняется из-за естественных физических процессов [213]. Поэтому при оценке устойчивости склонов часто используются упрощенные данные [201, 219]. В Scoops3D можно выбрать следующие варианты расчета [173]: 1) без учета влияния подземных вод; 2) с использованием коэффициента  $R_u$  (коэффициента порового давления); 3) на основе уровня пьезометрической поверхности. В каждом случае оценка распределения порового давления будет различна, что приводит к изменениям в определении FS [200].

В представляемой работе учет порового давления производился на основе коэффициента порового давления  $R_u$ , предложенного Бишопом и Моргенштерном в 1960 г. [77], которые определили его следующим образом:

$$R_u = \frac{u}{\gamma h} \quad (5.5)$$

где  $u$  – поровое давление;  $\gamma$  – удельный вес грунта;  $h$  – глубина (расстояние рассматриваемой точки от поверхности грунта).

Для моделирования оползневой опасности района исследования с учетом изменения порового давления необходимо проанализировать интенсивность осадков. Со станций мониторинга в провинции Лаокай были взяты данные по осадкам за последние 20 лет (Рисунок 5.7). На их основе построены графики, показывающие максимальное суточное количество осадков, выпадавших с мая по октябрь (Рисунок 5.8). Эти графики показали, что максимальное среднесуточное количество осадков составляет 24,2 мм, в то время как максимальное суточное количество осадков составляет 137,8 мм. Например, обильные дожди шли в провинции Лаокай 31 мая 2020. За 16 ч здесь выпало 139,1 мм осадков (Рисунок 5.9). Это «экстремальный случай» для района исследования и может рассматриваться как фактор, вызывающий активизацию оползневого процесса. В результате данные об осадках на 31 мая 2020 г. были использованы для моделирования устойчивости, чтобы определить оползневую опасность и связь между изменением количества осадков и изменением оползневых опасных зон в районе исследования. Для определения значений коэффициента  $R_u$  с учетом

данных об интенсивности осадков, был использован метод Z. Liao, et al. [137].

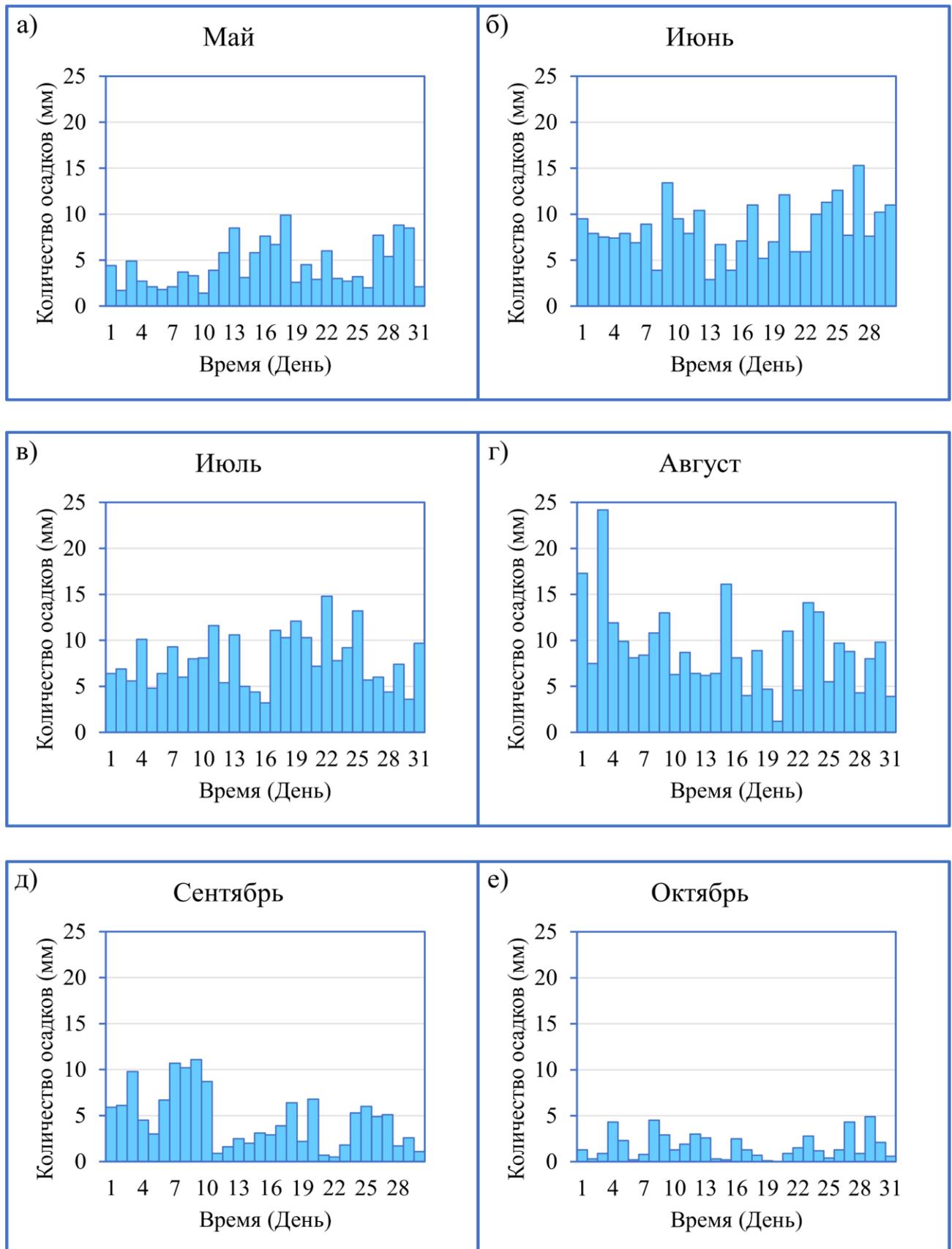


Рисунок 5.7 – Среднесуточное количество осадков в периоде 2000-2019 гг

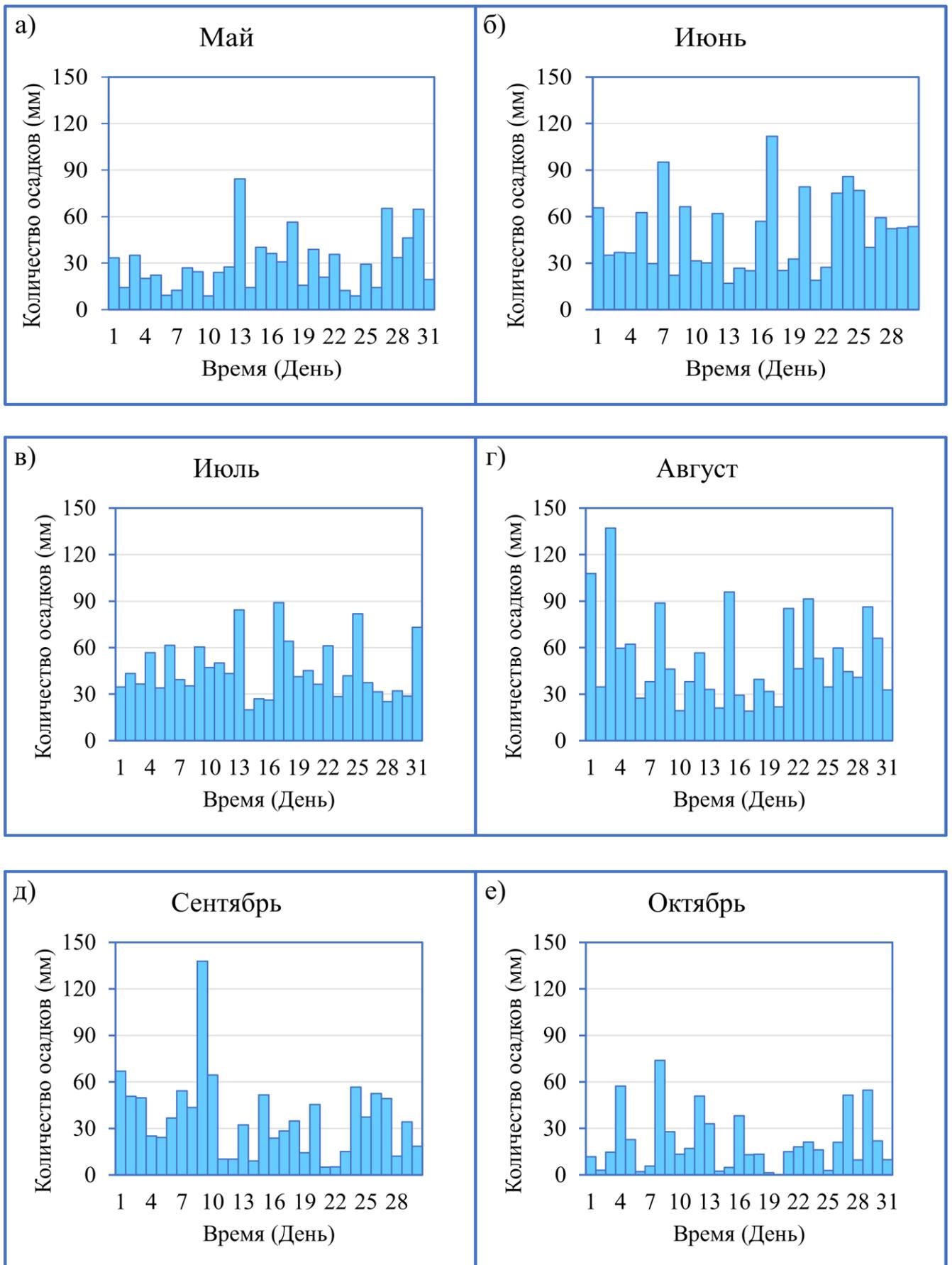


Рисунок 5.8 – Максимальное суточное количество осадков в периоде 2000-2019 гг

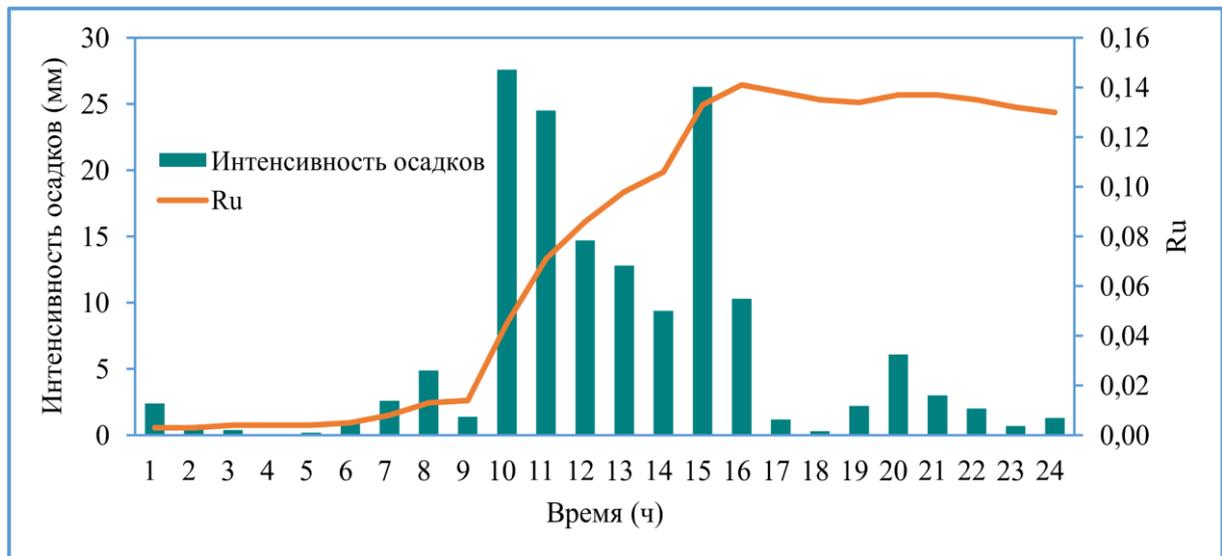


Рисунок 5.9 – Связь между интенсивностью осадков и  $R_u$

Для вычисления устойчивости в Scoops3D использовались значения удельного веса, удельного сцепления ( $c$ ) и угла внутреннего трения ( $\phi$ ) грунтов, слагающих склон, в сухой сезон и сезон дождей [173]. Показатели свойств были определены в результате лабораторных работ и приведены в Таблица 5.1.

Таблица 5.1 Параметры грунта для оценки оползневой опасности

Параметры	Обозначение	Единица измерения	Сухой сезон	Сезон дождей
Удельный вес	$\gamma$	кН/м <sup>3</sup>	18,2	19,3
Угол внутреннего трения	$\phi$	град.	16,3	12,2
Сцепление	$c$	кН/м <sup>2</sup>	20,2	15,2

Сейсмическая нагрузка в Scoops3D может моделироваться на основе псевдостатического анализа, при котором эффект от землетрясения учитывается путем введения дополнительных инерционных сил, определяемых следующим образом [126]:

$$F_h = \frac{a_h}{g} \cdot W = k_h \cdot W \quad (5.6)$$

$$F_v = \frac{a_v}{g} \cdot W = k_v \cdot W \quad (5.7)$$

где  $a_h$  – горизонтальное сейсмическое ускорение,  $a_v$  – вертикальное сейсмическое ускорение,  $g$  – ускорение свободного падения,  $W$  – вес отсека,  $k_h$  и  $k_v$  – безразмерные коэффициенты в горизонтальном и вертикальном направлении.

В данной работе учитывался только коэффициент псевдо-горизонтального ускорения ( $k_{eq}$ ). Обоснование величины  $k_{eq}$  при расчете устойчивости склонов, является не простой задачей. Рекомендуемые различными исследователями величины псевдостатического коэффициента приведены в Таблица 5.2.

Таблица 5.2 – Некоторые рекомендуемые значения  $k_{eq}$

Рекомендуемый псевдостатический коэффициент, $k$	Рекомендуемый FS	Исследователи
0,1 (R-F = IX)	FS > 1,0	Терцаги (1950) [191]
0,2 (R-F = X)		
0,5 (R-F > X)		
0,1 (M = 6,5)	FS ≥ 1,15	Сид Х. Б. (1979) [184]
0,15 (M = 8,25)		
1/2–1/3 от PHGA/g	FS > 1,0	Маркусон и Франклин (1983) [142]
0,025 (Небольшое землетрясение)	FS > 1,0	Департамент военных инженеров армии США 1970 [205]
0,05 (Среднее землетрясение)		
0,1 (Крупное землетрясение)		
0,15 (Великое землетрясение)		
0,1–0,25 (В США)		Кавазанджян (1997) [129]
0,15–0,25 (В Японии)		
1/2 от PHGA/g	FS > 1,0	Хайнс-Гриффин М. Э. (1984) [121]
0,15	FS > 1,1	Калифорнийский отдел шахт и геологии (1997) [81]
0,33 Z.I.S	FS > 1,0	Индийский технологический институт Канпур (2005) [122]
0,1–0,15 (для насыпных плотин)		Янагисава, Э. (1991) [217]
0,1 – 0,25		Национальный комитет Японии по большим плотинам (JCOLD) [145]

R-F – шкала интенсивности землетрясений Росси-Фореля

M – магнитуа землетрясения

PHGA – пиковое горизонтальное ускорение грунта

g – ускорение силы тяжести

Z – фактор зоны (0,1 до 0,36)

I – фактор важности (1,0 до 2,0)

S – фактор амплификации участка (1,0 до 2,0)

В этом исследовании, на основе рекомендаций EUROCODE 8 [78] и согласно предложениям Пендина В. В. [48] (Таблица 5.3), для оценки влияния сейсмической нагрузки на устойчивость склона использовалось зависимость (5.8) [78]:

$$k_{eq} = 0,5 \cdot S \cdot \frac{a_g}{g} \quad (5.8)$$

где  $a_g$  – пиковое горизонтальное ускорение для соответствующей категории грунтов,  $g$  – ускорение свободного падения, и  $S$  является коэффициентом, зависящий от типа грунта.

Таблица 5.3 –  $k_{eq}$  значение для оценки оползневой опасности

Интенсивность землетрясения (в баллах шкалы MSK-64)	6	7	8	9
Пиковое горизонтальное ускорение грунта (в долях ускорения свободного падения, $g$ ) [48]	0,05	0,1	0,2	0,4
$k_{eq}$ значение сейсмического коэффициента, использованное при оценке оползневой опасности	0,025	0,05	0,1	0,2

### 5.3 Результаты исследования

Scoops3D рассчитывает коэффициент устойчивости склонов на основе трехмерной геологической модели. Участки с показателем  $FS < 1,0$  считаются неустойчивыми, с  $FS > 1,0$  – устойчивыми.

В работе было рассмотрено шесть различных вариантов расчета (Таблица 5.4) для анализа влияния осадков и землетрясений на возникновение и распределение оползней в районе исследований. В результате были созданы карты распределения коэффициента устойчивости ( $FS$ ) для склонов в пределах участка моделирования и выполнено его районирование по оползневой опасности.

Таблица 5.4 – Варианты расчета для оценки оползневой опасности

№	Вариант расчета	Описание
1	Без влияния осадков и без учета сейсмического воздействия	
2	Без учета сейсмического воздействия, но с фактическим количеством осадков за 16 часов	Количество осадков ( $K_o$ ) равно 139,1мм
3	Учет сейсмического воздействия без влияния осадков	$k_{eq} = 0,025; 0,05; 0,1; 0,2$
		$K_o = 139,1\text{мм}$ и $k_{eq} = 0,025$

4	Сочетание фактического количества осадков за 16ч и сейсмического воздействия	$K_o = 139,1\text{мм}$ и $k_{eq} = 0,05$
		$K_o = 139,1\text{мм}$ и $k_{eq} = 0,1$
		$K_o = 139,1\text{мм}$ и $k_{eq} = 0,2$
5	Учет влияния количества осадков с постоянной интенсивностью	Интенсивность осадков ( $I_o$ ) равна 6,5мм/ч
6	Сочетание интенсивных ливневых осадков за 24ч и сейсмического воздействия	$I_o = 6,5\text{мм/ч}$ и $k_{eq} = 0,025$
		$I_o = 6,5\text{мм/ч}$ и $k_{eq} = 0,05$
		$I_o = 6,5\text{мм/ч}$ и $k_{eq} = 0,1$
		$I_o = 6,5\text{мм/ч}$ и $k_{eq} = 0,2$

Районирование проведено с использованием классификации Мандала и Майти [140]. В результате выделено четыре класса состояния склона по опасности (Таблица 5.5): 1) Устойчивое состояние (низкая опасность); 2) Среднеустойчивое состояние (средняя опасность); 3) Квазиустойчивое состояние (высокая опасность) и 4) Неустойчивое состояние (критическая опасность).

Таблица 5.5 – Классификация коэффициента устойчивости

FS значение	Состояние склона / оползневая опасность	Замечание
< 1,0	Неустойчивое / критическая	Стабилизирующие факторы необходимы для обеспечения устойчивости
1,0 – 1,25	Квазиустойчивое / высокая	Незначительный дестабилизирующий фактор приводит к неустойчивости
1,25 – 1,5	Среднеустойчивое / средняя	Средний дестабилизирующий фактор приводит к неустойчивости
> 1,5	Устойчивое / низкая	Только основные дестабилизирующие факторы приводят к неустойчивости

### 5.3.1 Варианты расчета 1 (без влияния осадков и без учета сейсмического воздействия) и 2 (Без учета сейсмического воздействия, но с фактическим количеством осадков за 16 часов)

Результаты анализа распределения 18 исторических оползней показали, что большинство оползней произошло в зонах с абсолютными отметками от 581 м до 900 м над уровнем моря (11 оползней) (Рисунок 5.10) и мощностью коры выветривания от 4 м до 12 м (12 оползней) (Рисунок 5.11).

Этот район характеризуется относительно высокой плотностью населения и значительной техногенной нагрузкой (за счет интенсивного строительства инфраструктуры и сельскохозяйственной деятельности), что увеличивает вероятность возникновения и активизации оползней, особенно в сезон дождей [95].

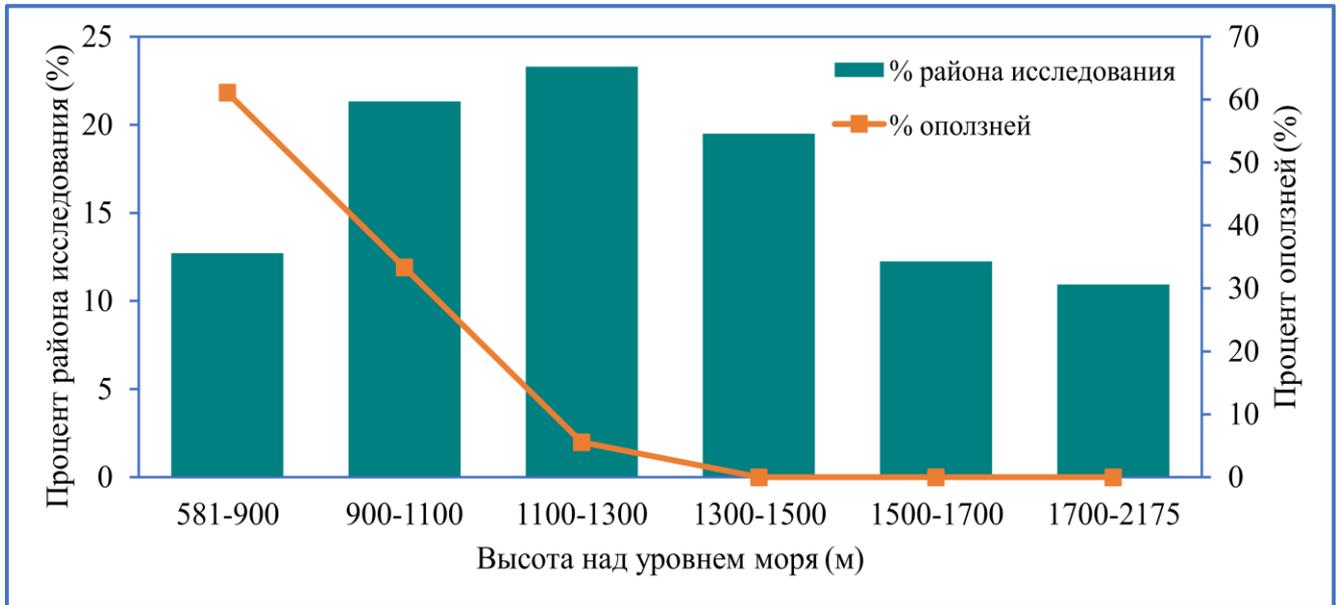


Рисунок 5.10 – Связь между распределением оползней и высотой над у.м.

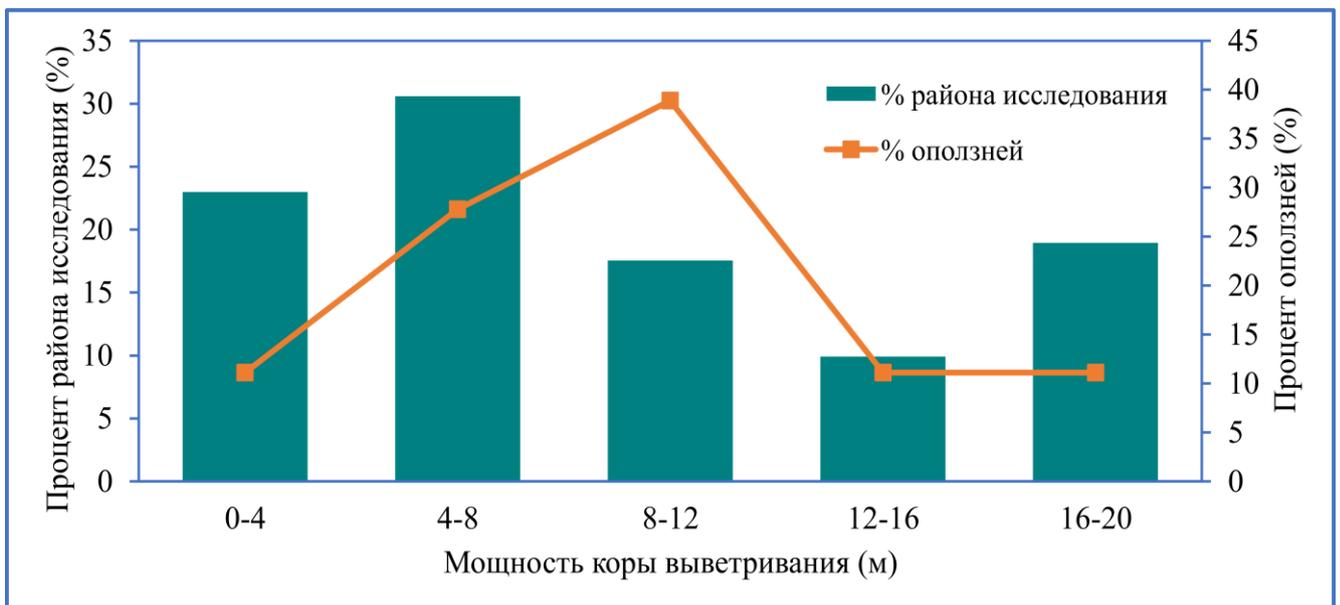


Рисунок 5.11 – Связь между распределением оползней и мощностью коры выветривания

При оценке устойчивости склонов в сухой период (Рисунок 5.12) на карте выделяются два типа участков -- среднеустойчивые (средний уровень оползневой опасности), занимают 8,8% площади и устойчивые (низкий уровень оползневой

опасности) – занимают 91,2% территории исследования; для периода интенсивных осадков (Рисунок 5.13) - четыре типа: неустойчивые (критический уровень оползневой опасности), занимают 18,12% площади, квазиустойчивые (высокий уровень оползневой опасности), занимают 15,04%, среднеустойчивые (средний уровень оползневой опасности), занимают 11,92% и устойчивые (низкий уровень оползневой опасности), занимают 54,92% площади.

Таким образом, результаты моделирования доказали тезис о том, что интенсивные осадки увеличивают опасность возникновения оползней.

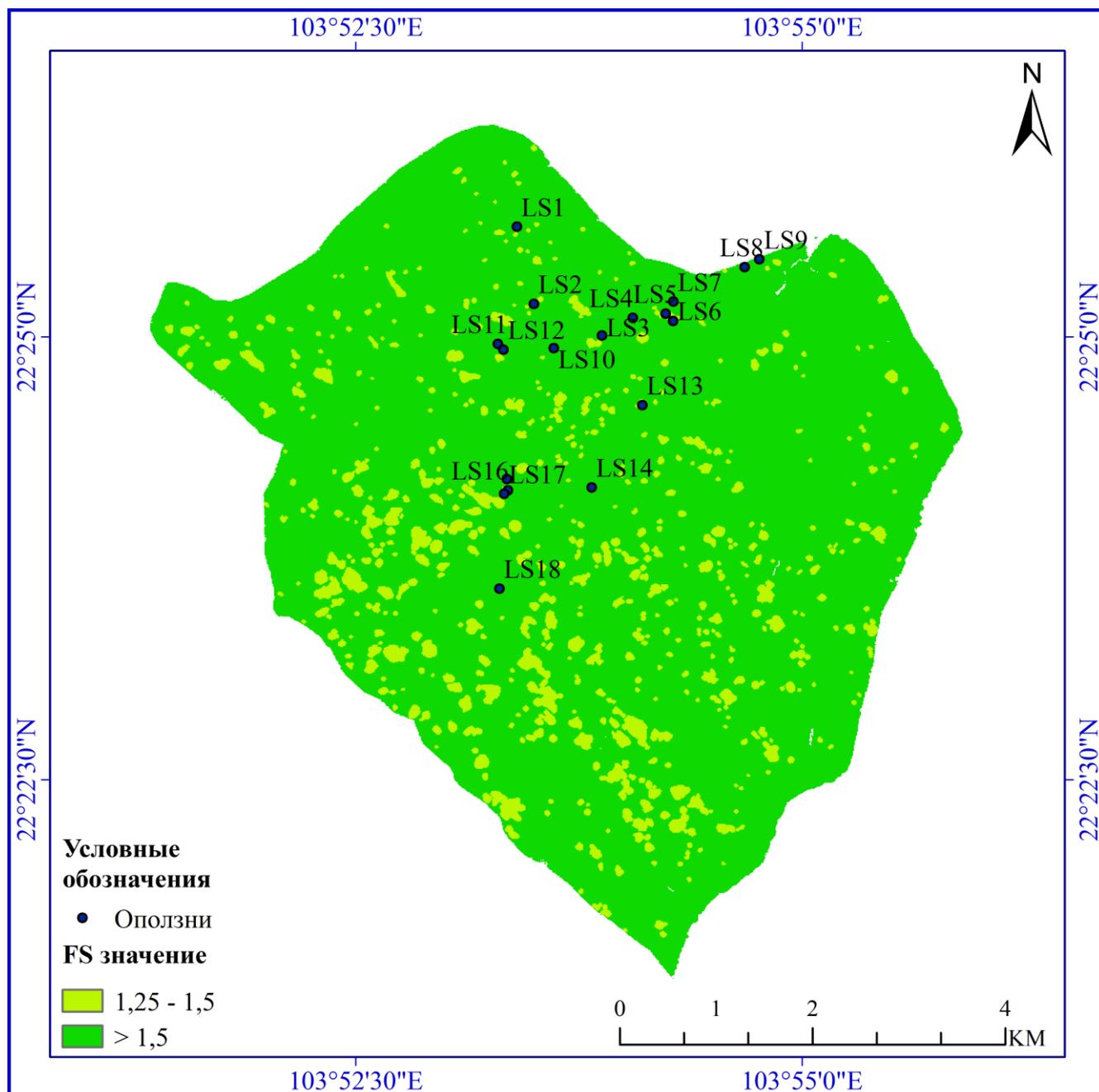
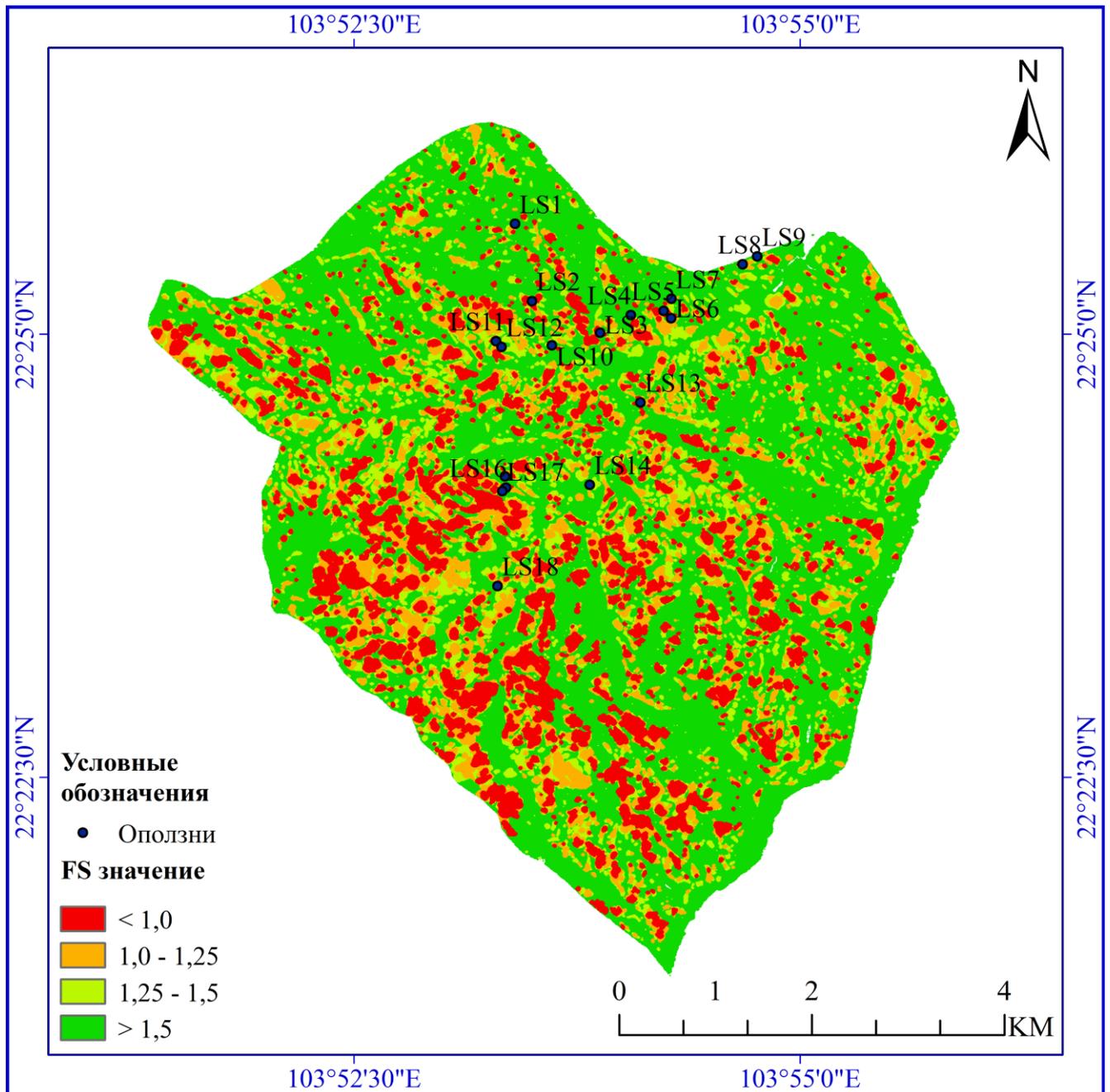


Рисунок 5.12 – Карты оползневой опасности в сухом сезоне



*Рисунок 5.13 – Карты оползневой опасности под влиянием осадков*

В Таблица 5.6 сопоставлены данные о 18 оползневых явлениях в коммуне Чунгчай с картой оползневой опасности под влиянием атмосферных осадков (Рисунок 5.13). Анализ таблицы показывает, что одиннадцать из 18 оползней находятся в неустойчивой зоне, один - в квазиустойчивой зоне, три - в среднеустойчивой зоне и три - в устойчивой зоне. Одним из самых больших неустойчивых районов является место расположения оползня LS3 (оползень Монг Сен), занимающее площадь 23642,14 м<sup>2</sup>, что составляет 47,15% района исследования, и которое было определено как неустойчивая зона.

Таблица 5.6 – Распределение оползней в зонах опасности

Оползень	Площадь оползней (м <sup>2</sup> )	Процент площади (%)	Зона опасности
LS1	522,55	1,04	Неустойчивая зона
LS2	5437,03	10,84	Неустойчивая зона
LS3	23642,14	47,15	Неустойчивая зона
LS4	378,03	0,75	Устойчивая зона
LS5	1886,39	3,76	Неустойчивая зона
LS6	2035,06	4,06	Неустойчивая зона
LS7	1124,97	2,24	Устойчивая зона
LS8	1088,53	2,17	Неустойчивая зона
LS9	2914,64	5,81	Неустойчивая зона
LS10	1056,38	2,11	Среднеустойчивая зона
LS11	1041,05	2,08	Неустойчивая зона
LS12	1395,01	2,78	Среднеустойчивая зона
LS13	1947,63	3,88	Неустойчивая зона
LS14	1459,19	2,91	Среднеустойчивая зона
LS15	836,30	1,67	Устойчивая зона
LS16	435,47	0,87	Неустойчивая зона
LS17	554,85	1,12	Неустойчивая зона
LS18	2389,32	4,76	Квазиустойчивая зона

Эффективная модель должна обеспечивать максимальное соответствие между наблюдаемыми и прогнозируемыми оползнями [158]. Чтобы оценить качество аналитической модели, нужно сопоставить прогнозную карту оползневой опасности с существующей картой инвентаризации оползней. Когда данные по инвентаризации оползней недостаточны или неполны, наиболее рекомендуемым является подход  $\%LR_{class}$  [158, 199], который был использован в настоящем исследовании.

Tran The Viet et al. в 2018 г. [199] модифицировали формулу для определения  $LR_{class}$ , предложенную D.W. Park, et al. в 2013 г. [158]. В их версии расчет индекса подтверждения производится следующим образом:

$$LR_{class} = \frac{\% \text{ оползней в каждом классе } FS}{\% \text{ площадь каждого класса } FS} \quad (5.9)$$

$$\%LR_{class}^i = \frac{LR_{class}^i}{\sum_{i=1}^n LR_{class}^i} \quad (5.10)$$

Промежуточная величина  $LR_{class}$  определяется в каждом классе как отношение площади оползня к общей площади района исследований. Индекс  $\%LR_{class}$  для FS класса  $i$  представляет собой долю одного класса  $LR_{class}^i$  в суммарном значении  $LR_{class}$  [199].

Результаты расчета индекса подтверждения  $\% LR_{class}$  и оценка соответствия выделенных типов участков и карты инвентаризации оползней представлены на Рисунок 5.14 и в Таблица 5.7. Результаты оценки  $\%LR_{class}$  демонстрируют достоверность модели Scoops3D с вероятностью  $> 64\%$ , что может считаться удовлетворительным результатом [20].

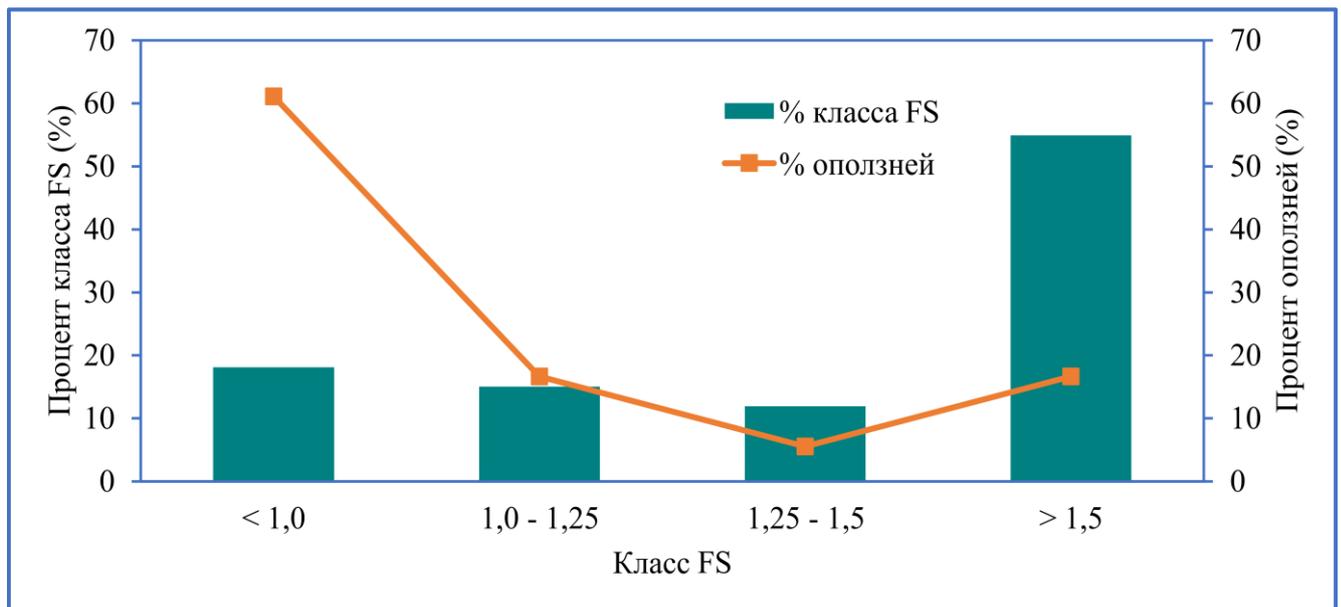


Рисунок 5.14 – Оценка соответствия выделенных по оползневой опасности участков и карты инвентаризации оползней

Таблица 5.7 – Оценка достоверности модели Scoops3D

FS класс	% Площадь класса	Количество оползней	% Оползней	$LR_{class}$	% $LR_{class}$
< 1,0	18,12	11	61,11	3,37	64,19
1,0 - 1,25	15,04	3	16,67	1,11	21,15

1,25 - 1,5	11,92	1	5,55	0,47	8,95
> 1,5	54,92	3	16,67	0,30	5,71

Индекс  $\%LR_{class}$ , наряду со значением AUC, является наиболее часто используемым при оценке эффективности моделей Scoops3D. Например, в исследовании Чан и др. (2018) [199], при оценке оползневой восприимчивости на площади  $0,4 \text{ км}^2$  в южной части Сеула с использованием комплексной модели TRIGRS-Scoops3D, значение  $\%LR_{class}$  составило 87,44%. Палаццоло и др. (2021) [157], при использовании модели Scoops3D для оценки устойчивости к оползням бассейна реки площадью  $2 \text{ км}^2$  на севере Италии, получили величину  $\%LR_{class}$  - 82%. При использовании комплексной модели TRIGRS-Scoops3D для оценки оползневой опасности в районе Няннянба, Китай,  $\%LR_{class}$  составил 80,16% [116]. Сравнение результатов моделирования, полученным в этом исследовании ( $\%LR_{class} = 64,19\%$ ), несмотря на удовлетворительную эффективность, с результатами, упомянутыми выше, показало меньшую достоверность. Это можно объяснить тем, что Чан и Палаццоло выполняли свои исследования в более крупном масштабе для участков небольшой площади, тем самым уменьшив неопределенность входных данных и, таким образом, улучшив достоверность результатов. Несмотря на то, что исследование Хе и др. [116] проводилось на большей площади ( $53,81 \text{ км}^2$ ), высокое качество входных данных, достоверность карты инвентаризации оползней, а также сочетание моделей Scoops3D и TRIGRS повысили эффективность итоговой модели оползневой опасности.

### 5.3.2 Вариант расчета 3 (учет сейсмического воздействия без влияния осадков)

Учет сейсмического воздействия на возникновение и активизацию оползней в районе исследований был выполнен с использованием значений коэффициента сейсмичности ( $k_{eq}$ ) в диапазоне от 0,025 до 0,2. В результате было получено четыре карты оползневой опасности, с разделением территории на четыре зоны: неустойчивая (критический уровень оползневой опасности), квазиустойчивая (высокий уровень оползневой опасности), среднеустойчивая (средний уровень оползневой опасности) и устойчивая (низкий уровень оползневой опасности)

(Рисунок 5.15).

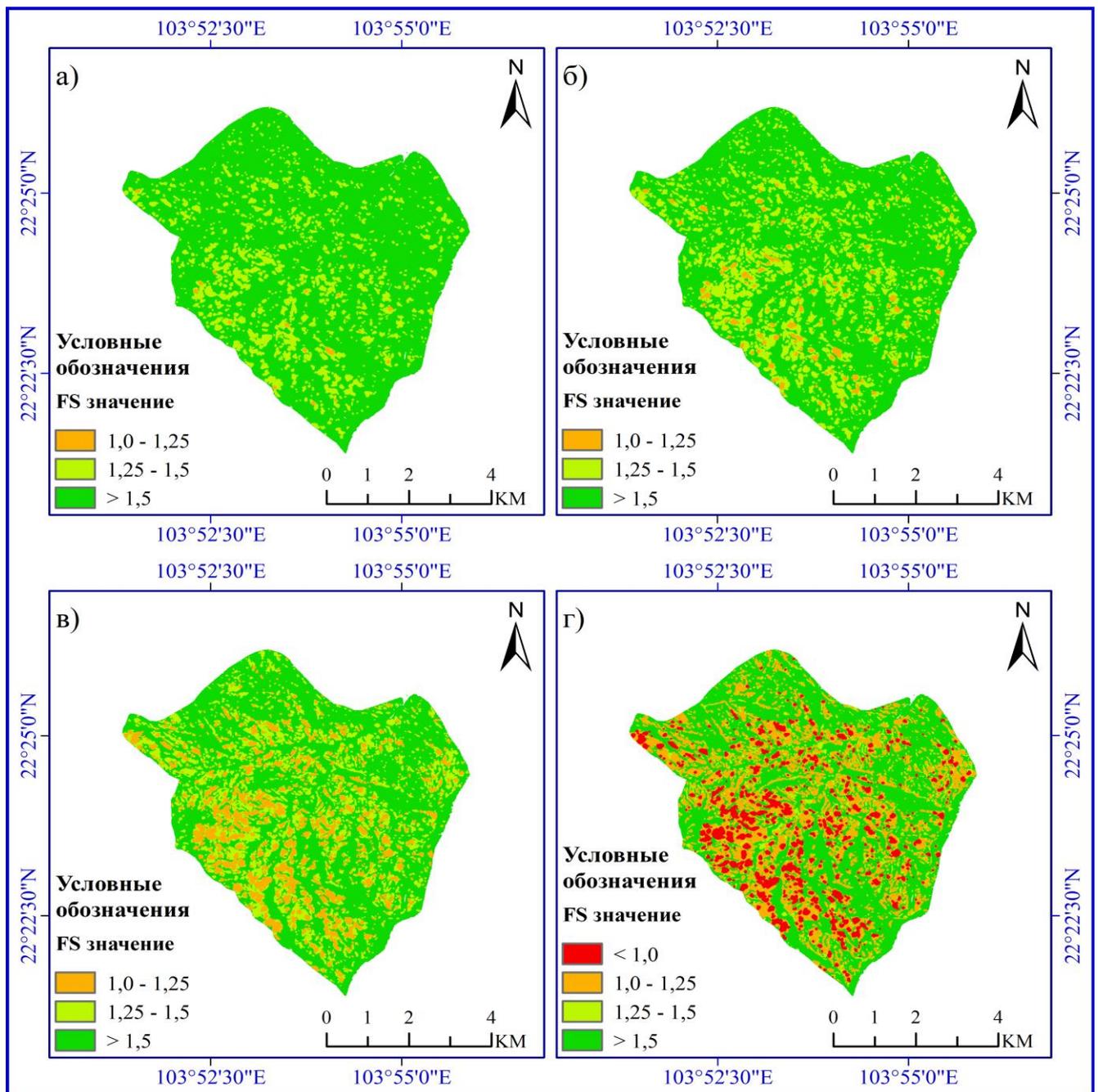
(а)  $k_{eq} = 0,025$ , (б)  $k_{eq} = 0,05$ , (в)  $k_{eq} = 0,1$ , (г)  $k_{eq} = 0,2$ 

Рисунок 5.15 – Карты оползневой опасности с учетом сейсмического воздействия

Результаты моделирования показали, что в пределах исследуемой территории, сейсмическое воздействие интенсивностью до 8 баллов по шкале MSK64 ( $k_{eq} = 0,025, 0,05$  и  $0,1$ ) не приведет к активизации оползневой процесса и только при 9 бальном землетрясении ( $k_{eq} = 0,2$ ) активизация оползневой процесса возможна (площадь неустойчивой зоны ( $FS < 1$ ) составит 12,34% от площади района исследований). Площадь квазиустойчивой зоны с возрастанием

сейсмического воздействия, также имеет тенденцию к увеличению, что, при возникновении неблагоприятных условий, таких как повышение уровня подземных вод, может привести к увеличению площади территории с критическим уровнем оползневой опасности [73].

Анализ изменения площади устойчивой зоны ( $FS > 1,5$ ) также играет важную роль в оценке оползневой опасности. Без учета сейсмического воздействия ее площадь составляет 91,2% от общей площади района исследования. Однако, при 9 бальном землетрясении ( $k_{eq} = 0,2$ ), площадь устойчивой зоны уменьшилась до 51,51%. Распределение зон оползневой опасности при различных значениях  $k_{eq}$  приведено на Рисунок 5.16.

Выполненные расчеты позволили количественно оценить связь между площадью устойчивой зоны и величиной  $k_{eq}$  (Рисунок 5.17).

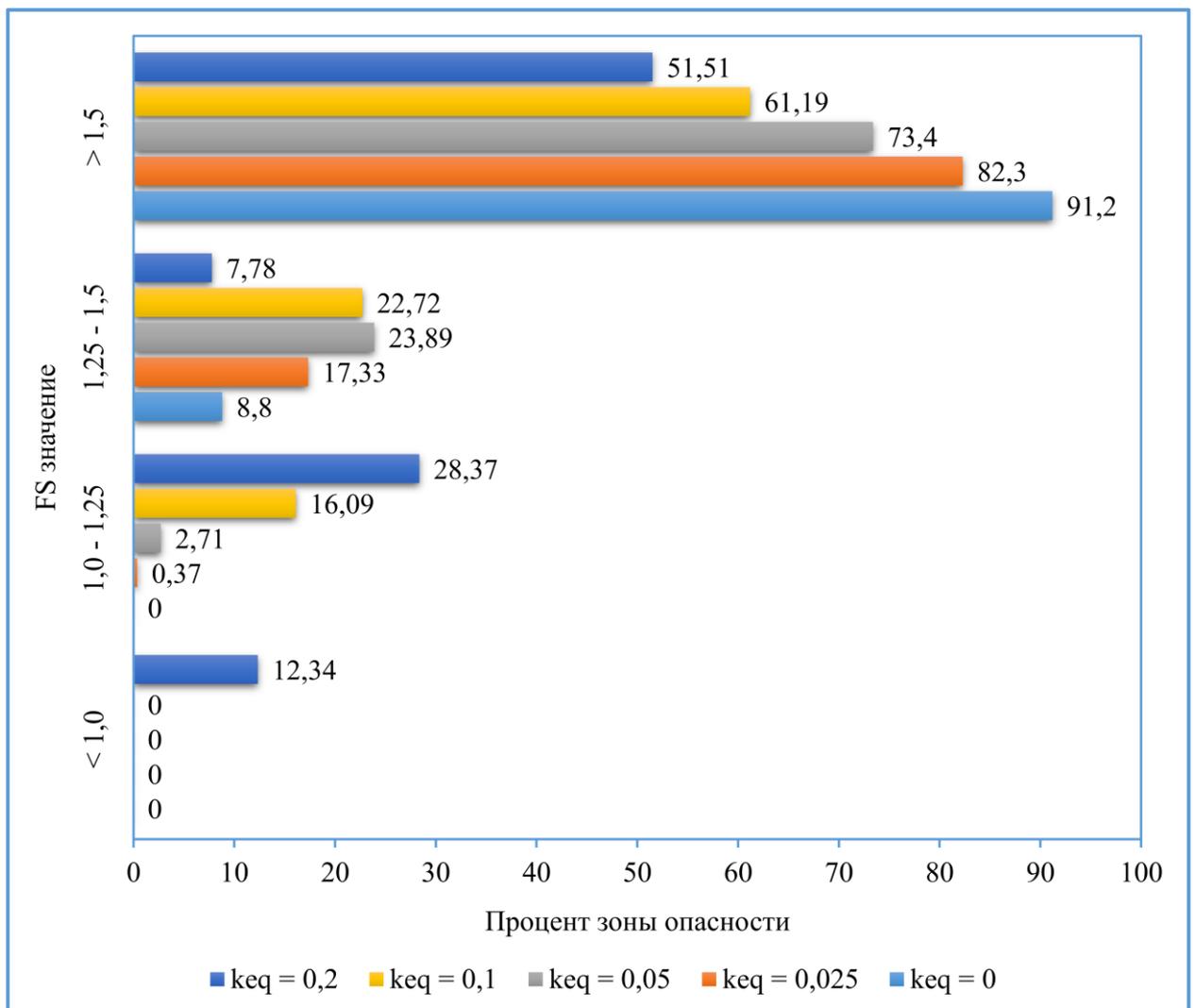


Рисунок 5.16 – Распределение зон оползневой опасности при различных значениях  $k_{eq}$

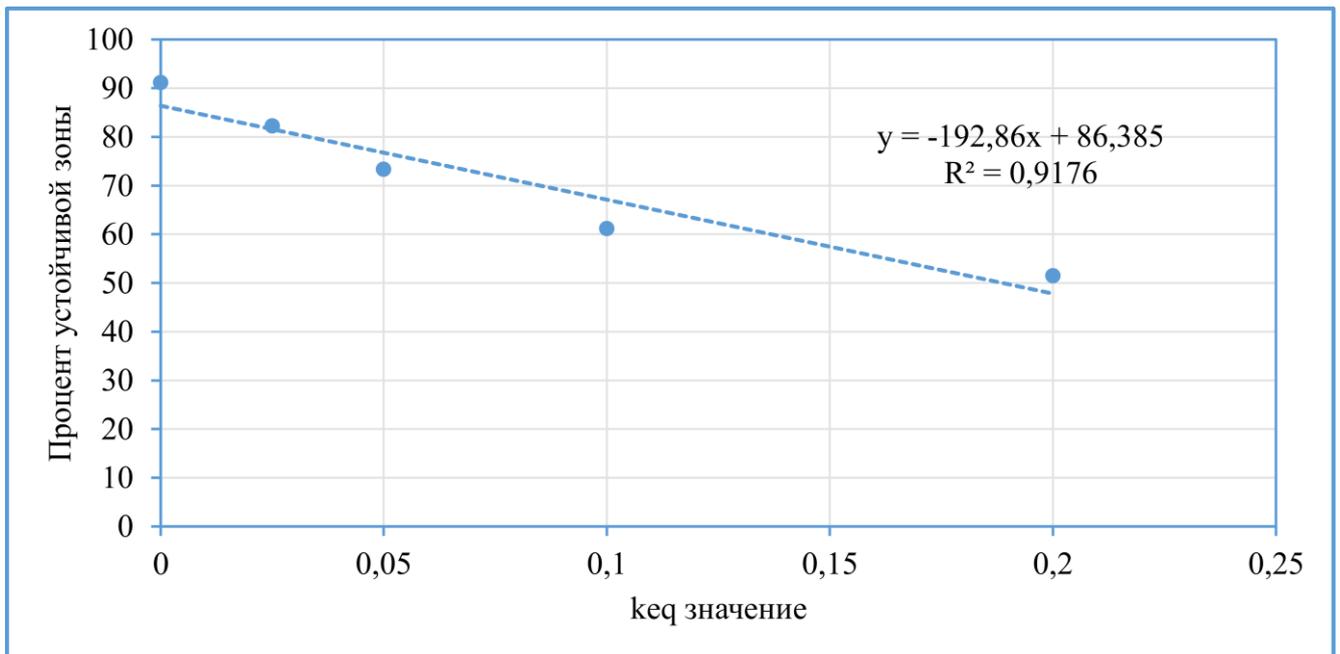


Рисунок 5.17 – Связь между величиной  $k_{eq}$  и площадью устойчивой зоны

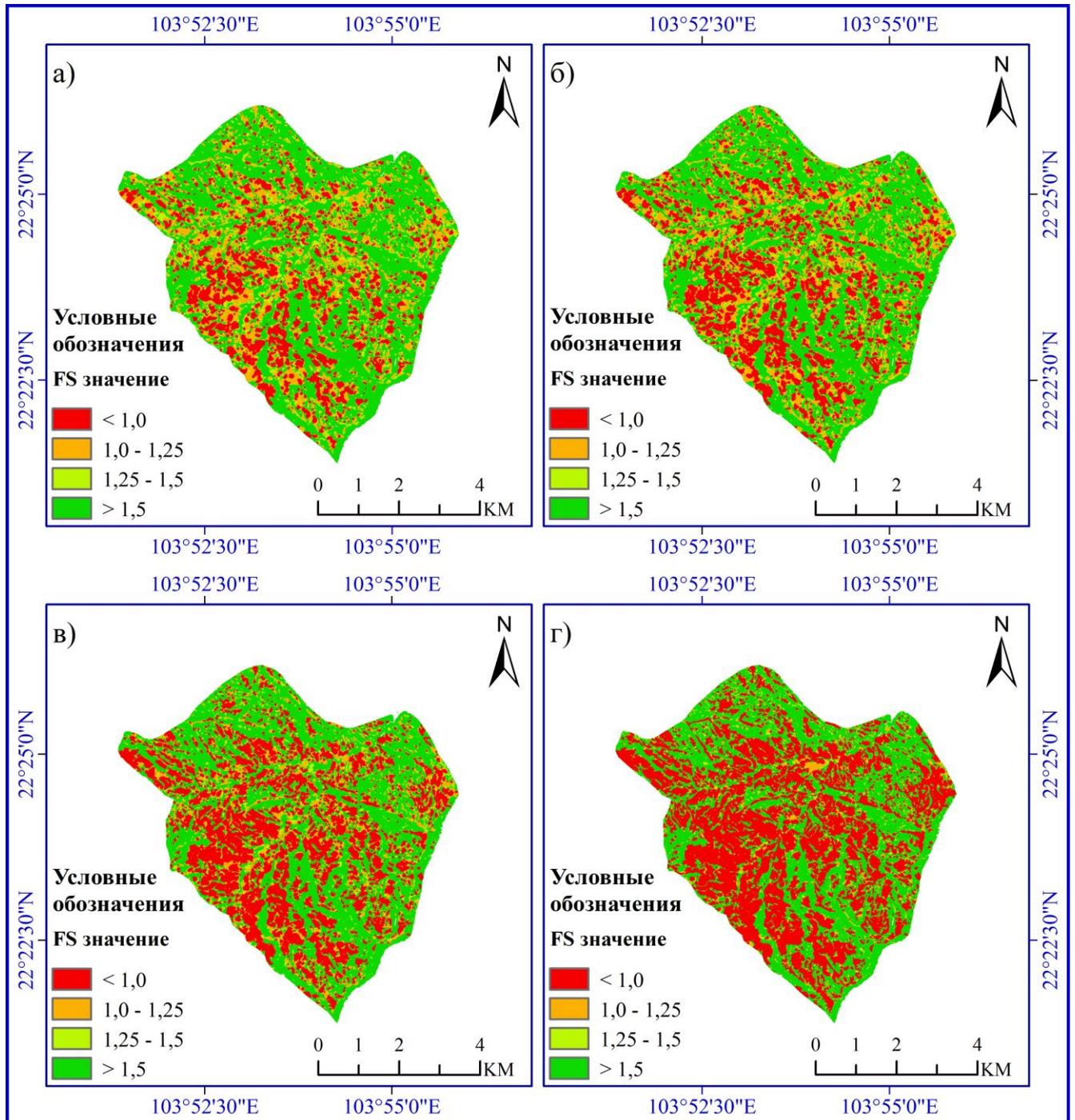
### 5.3.3 Вариант расчета 4 (сочетание фактического количества осадков за 16ч и сейсмического воздействия)

Сильные дожди перед землетрясением значительно увеличивают оползневую опасность, вследствие синергетического эффекта [168]. Согласно К. Сассе и др. (2007) [182], даже небольшое землетрясение может вызвать крупномасштабный оползень, когда уровень подземных вод близок к критическому, при котором происходит активизация оползневого процесса. С другой стороны, даже сильное землетрясение не всегда становится причиной развития оползневого процесса, когда уровень подземных вод ниже, чем возможная поверхность скольжения.

В результате моделирования синергетического эффекта от совместного сейсмического воздействия и осадков были составлены четыре карты оползневой опасности (Рисунок 5.18).

Анализ полученных результатов показал, что площадь неустойчивой зоны закономерно увеличивается и составила 20,53%, 24,93%, 36,12%, и 47,01% от площади района исследований для 6-ти, 7-ми, 8-ми и 9-ти бального землетрясения соответственно. При этом, площадь среднеустойчивой и устойчивой зон в результате увеличения значения  $k_{eq}$ , наоборот уменьшалась. Распределение зон

оползневой опасности при различных значениях  $k_{eq}$  приведено на Рисунок 5.19. Выявленная количественная связь между площадью неустойчивой зоны и величиной  $k_{eq}$ , показана на Рисунок 5.20.



(а)  $k_{eq} = 0,025$ , (б)  $k_{eq} = 0,05$ , (в)  $k_{eq} = 0,1$ , (г)  $k_{eq} = 0,2$

Рисунок 5.18 – Карты оползневой опасности с учетом совместного воздействия землетрясения и осадков

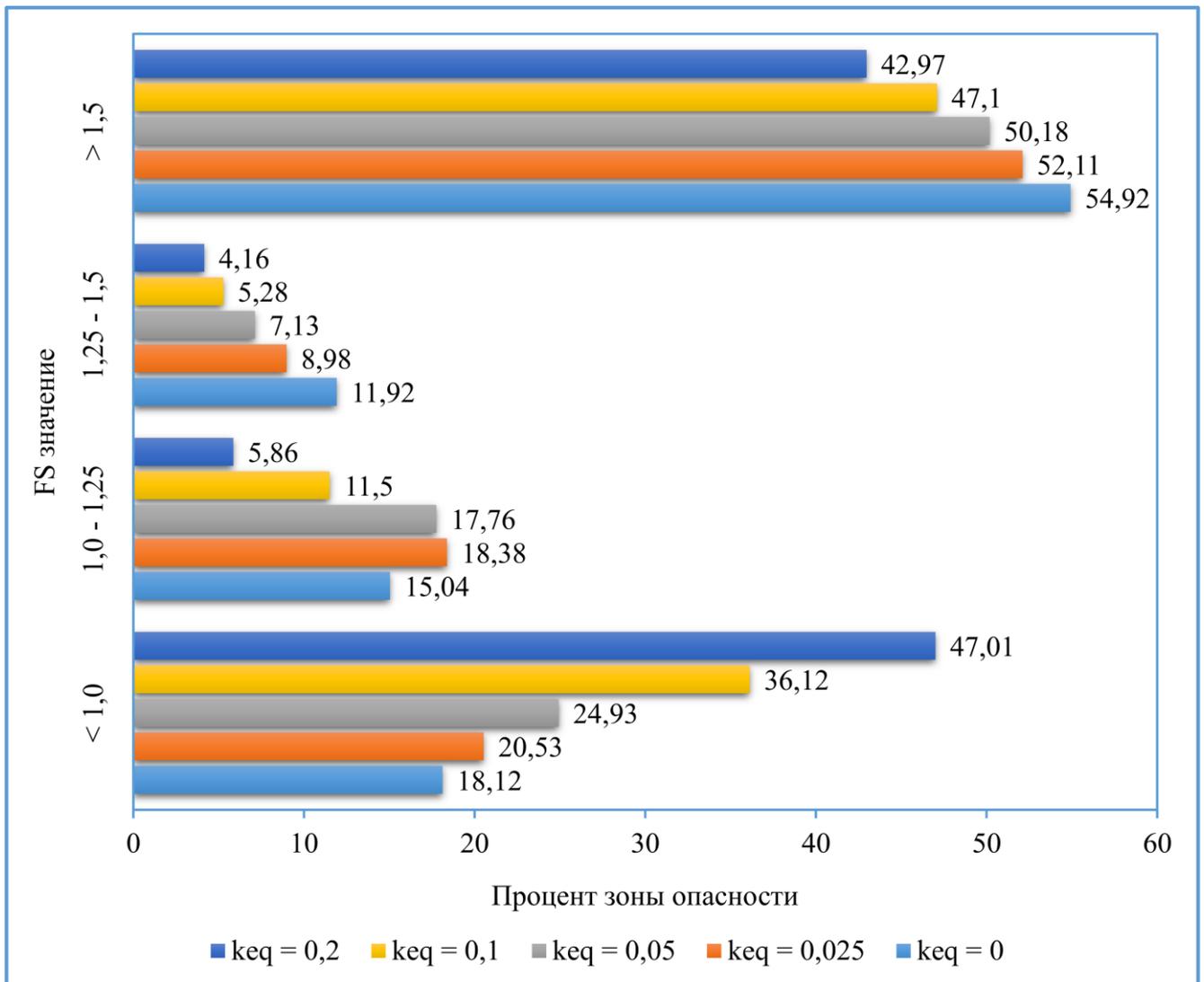


Рисунок 5.19 – Распределение зон оползневой опасности при различных значениях  $k_{eq}$

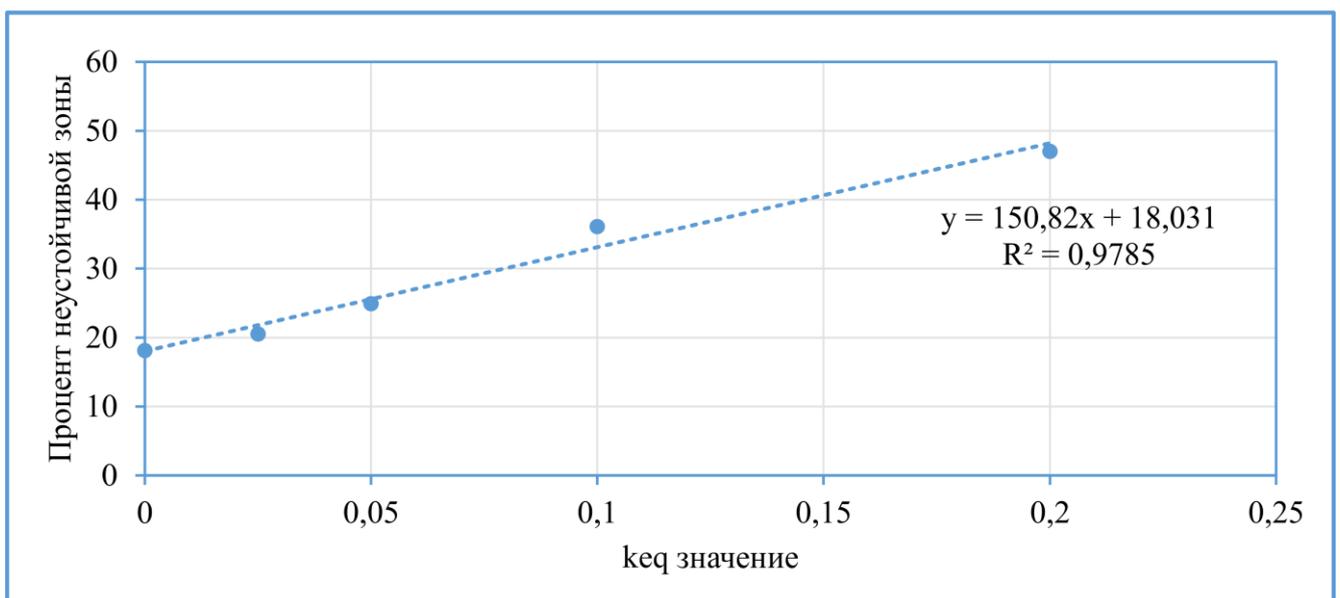
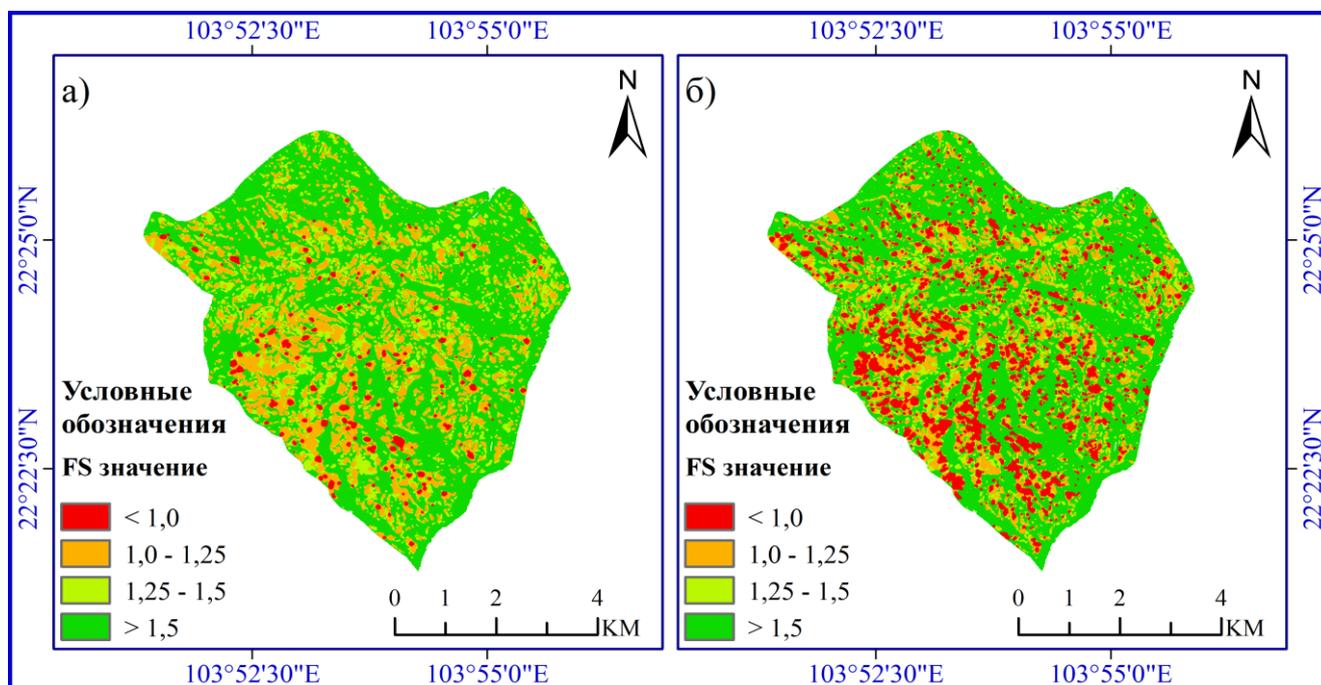


Рисунок 5.20 – Связь между  $k_{eq}$  значением и площадью неустойчивой зоны

### 5.3.4 Вариант расчета 5 (учет влияния количества осадков с постоянной интенсивностью)

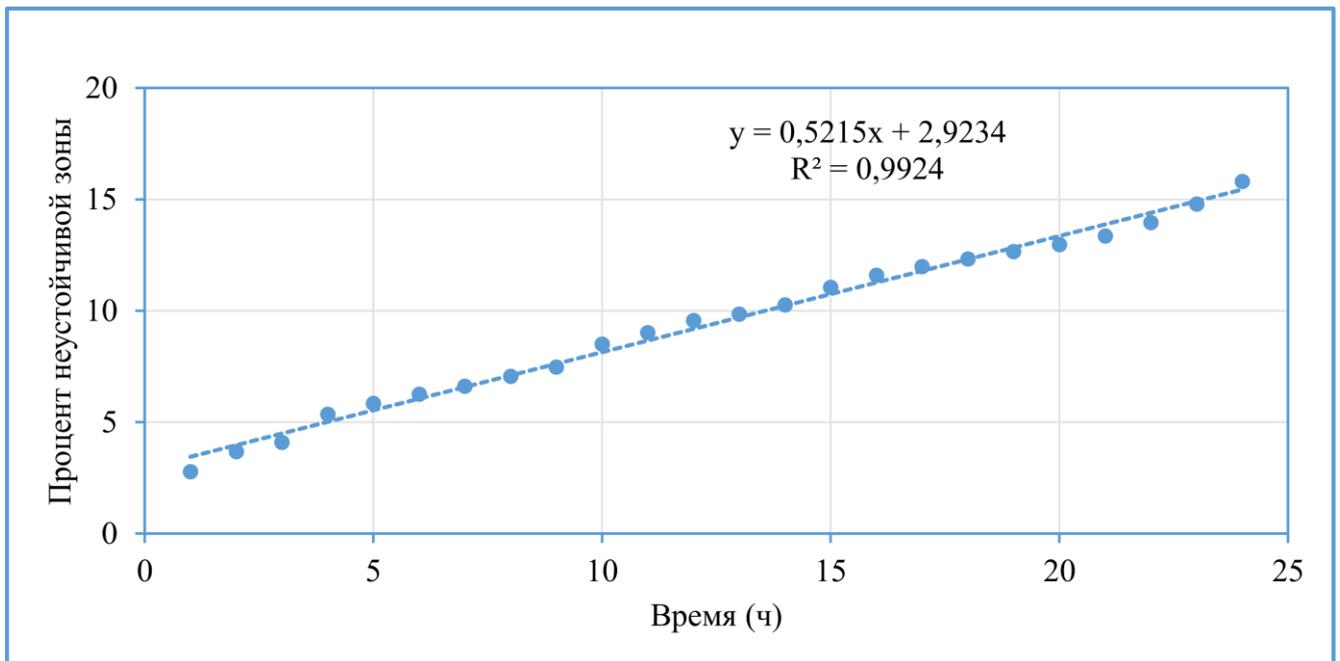
Для оценки влияния длительных интенсивных осадков, был взят «экстремальный случай» обильных ливней, прошедших в провинции Лаокай 31 мая 2020. Интенсивность осадков была принята в 6,5 мм/ч. Полученные карты оползневой опасности приведены на Рисунок 5.21а для продолжительности осадков 1 час и на Рисунок 5.21б для продолжительности осадков 24 часа соответственно.

Анализ полученных результатов показал, что зона с критическим уровнем оползневой опасности ( $FS < 1$ ) может возникнуть через час после начала интенсивных ливневых дождей. При этом, ее площадь будет линейно увеличиваться с течением времени, достигнув 15,8% от площади территории через 24 часа. Площадь с низкой оползневой опасностью ( $FS > 1,5$ ), наоборот закономерно уменьшается с 58,22% в первый час до 55,15% через 24 часа. Изменение площади неустойчивой зоны в зависимости от длительности ливневых осадков приведено на Рисунок 5.22.



(a)  $t = 1$ ч и (б)  $t = 24$ ч

Рисунок 5.21 – Карты оползневой опасности



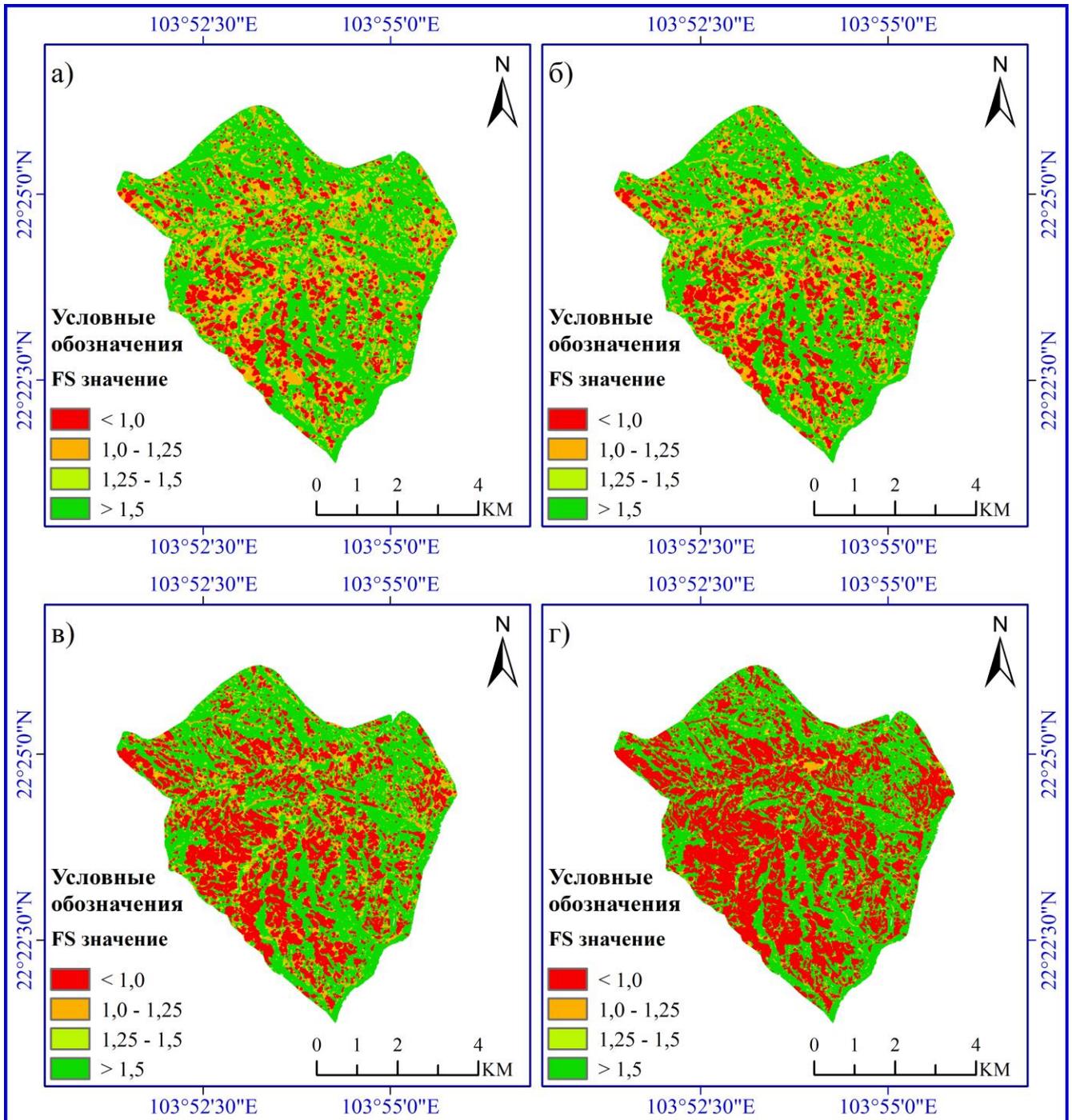
*Рисунок 5.22 – Изменение площади неустойчивой зоны в зависимости от длительности ливневых осадков*

### **5.3.5 Вариант расчета 6 (сочетание интенсивных ливневых осадков за 24ч и сейсмического воздействия)**

В данном варианте расчета было оценено совместное влияние сейсмического воздействия и интенсивных ливневых осадков (с учетом их продолжительности) на уровень оползневой опасности. Результаты моделирования с учетом продолжительности дождя 24 часа ( $t = 24\text{ч}$ ) для землетрясений интенсивностью 6, 7, 8 и 9 баллов показаны на картах оползневой опасности (Рисунок 5.23), распределение зон оползневой опасности при различных значениях  $k_{eq}$  на момент времени  $t = 24\text{ч}$  приведено на Рисунок 5.24, а на графиках (Рисунок 5.25; Рисунок 5.26; Рисунок 5.27; Рисунок 5.28) представлена зависимость площади неустойчивой зоны ( $FS < 1$ ) от длительности ливневых осадков для различных значений псевдостатического коэффициента  $k_{eq}$ .

Анализ графиков показал, что при сейсмическом воздействии интенсивностью 6 баллов по шкале MSK 64 ( $k_{eq} = 0,025$ ), площадь неустойчивой зоны в зависимости от длительности ливневых осадков изменяется от 7,73 ( $t = 1\text{ч}$ ) до 18,29% ( $t = 24\text{ч}$ ) от общей площади исследования. Аналогично, площадь неустойчивой зоны увеличивается от 11,63 до 22,77% для землетрясения

интенсивностью 7 баллов ( $k_{eq} = 0,05$ ), от 27,58 до 35,55 % для землетрясения интенсивностью 8 баллов ( $k_{eq} = 0,1$ ), и от 44,38 до 46,82 % для 9 бального землетрясения ( $k_{eq} = 0,2$ ).



(а)  $k_{eq} = 0,025$ , (б)  $k_{eq} = 0,05$ , (в)  $k_{eq} = 0,1$ , (г)  $k_{eq} = 0,2$

*Рисунок 5.23 – Карты оползневой опасности*

При этом следует отметить более высокий градиент прироста площади с критическим уровнем оползневой опасности при уровне сейсмического воздействия интенсивностью в 6 и 7 баллов (10,56% и 11,14% соответственно), в

сравнении с 8 и 9 бальными землетрясениями (7,97% и 2,44% соответственно).

Зона с критическим уровнем оползневой опасности сначала быстро развивается в районах с крутыми склонами и толстой корой выветривания с высокой водопроницаемостью. На пологих склонах, с тонкой толщиной коры выветривания и низкой водопроницаемостью, вероятность оползней снижается, что уменьшает уровень развития оползневой опасности.

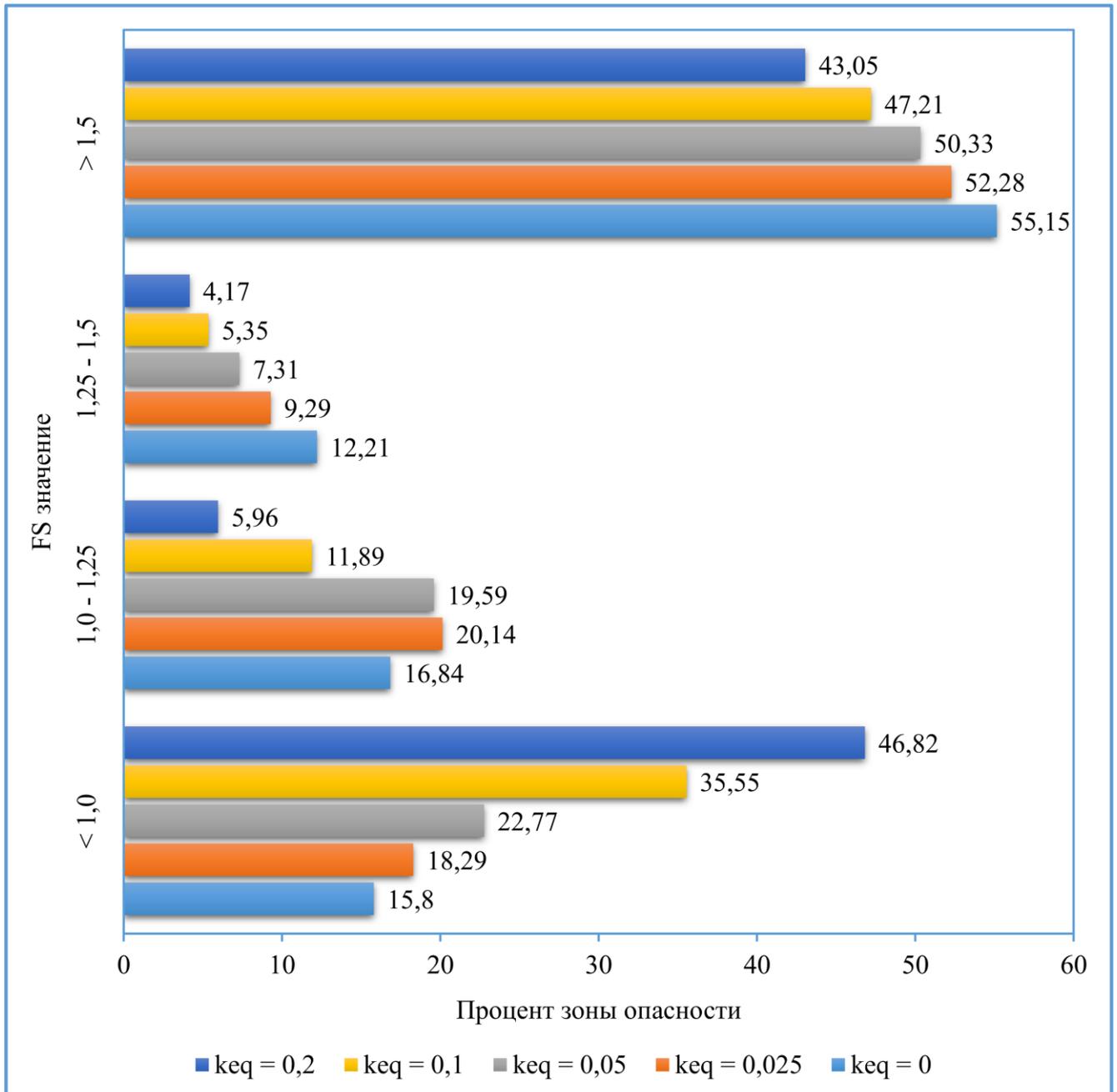


Рисунок 5.24 – Распределение зонах опасности по изменению  $k_{eq}$

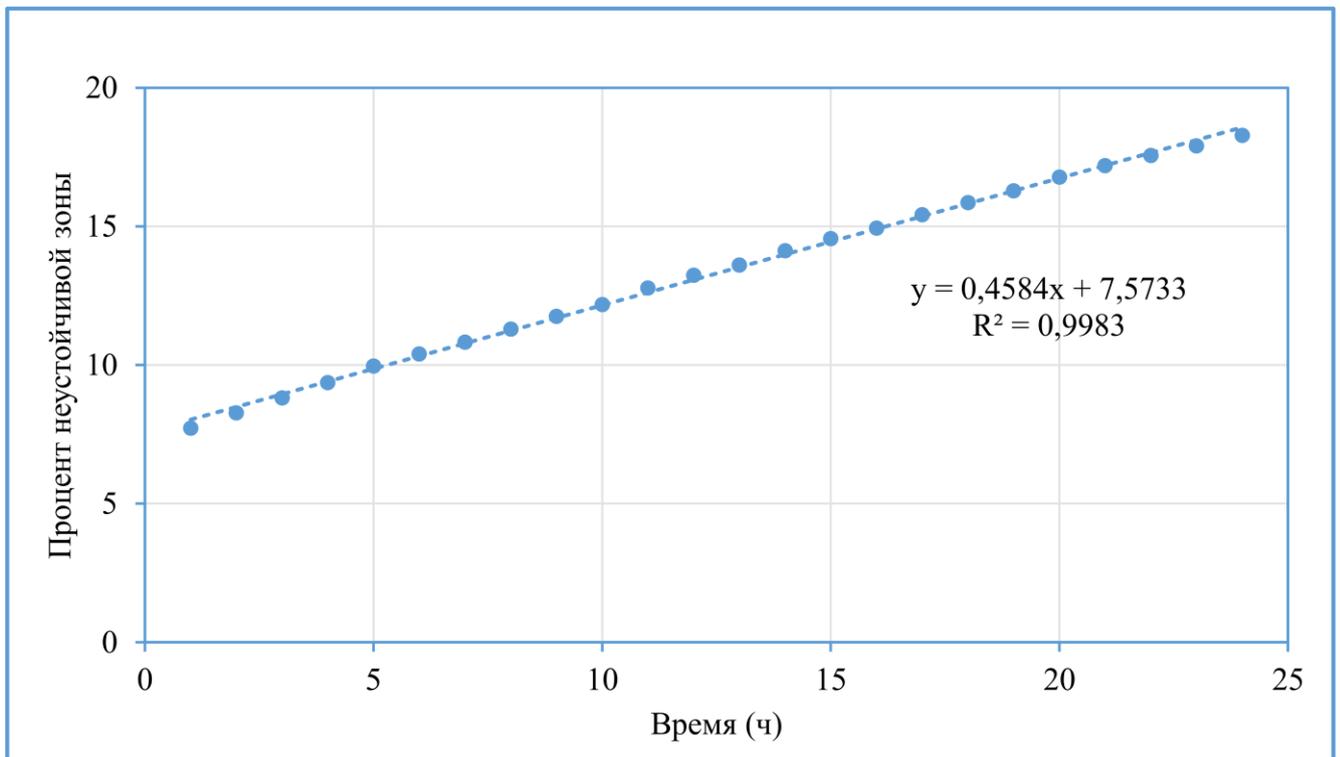


Рисунок 5.25 – Изменение площади неустойчивой зоны во времени с  $k_{eq} = 0,025$

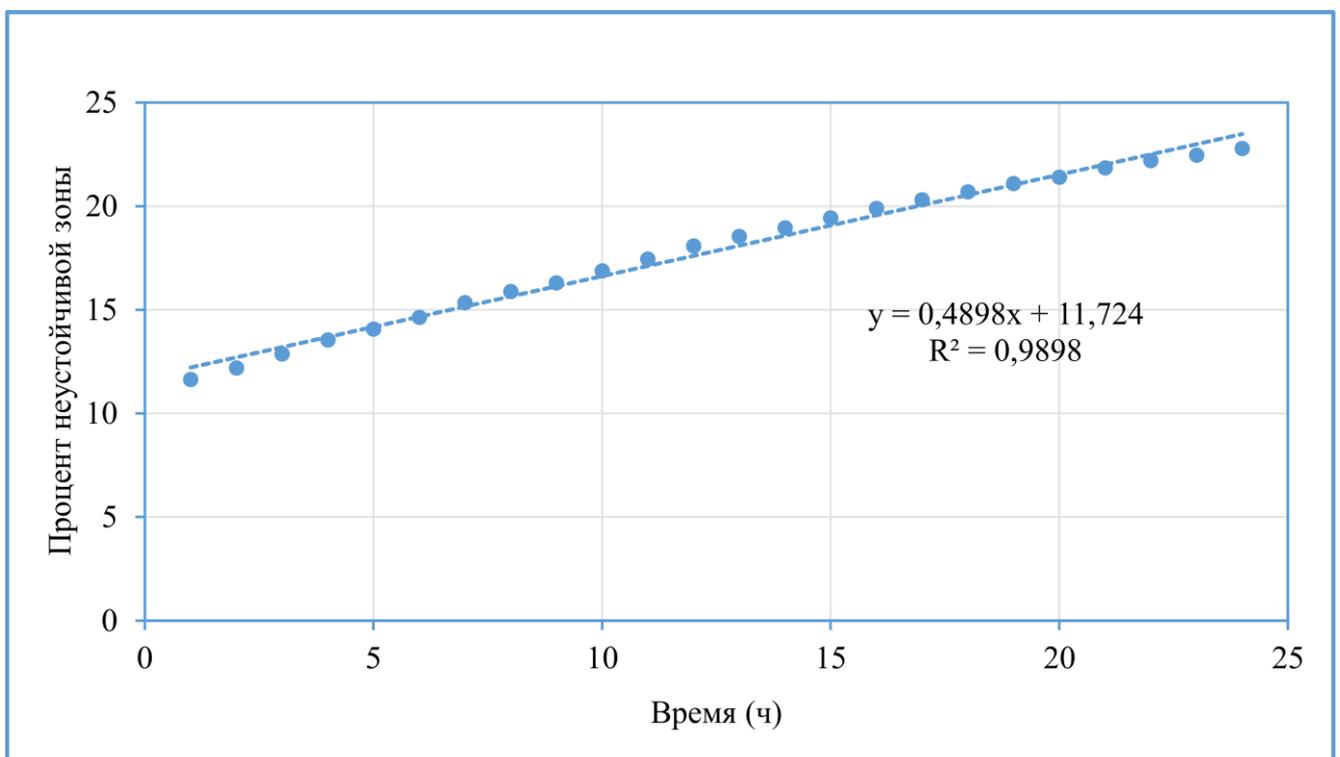


Рисунок 5.26 – Изменение площади неустойчивой зоны во времени с  $k_{eq} = 0,05$

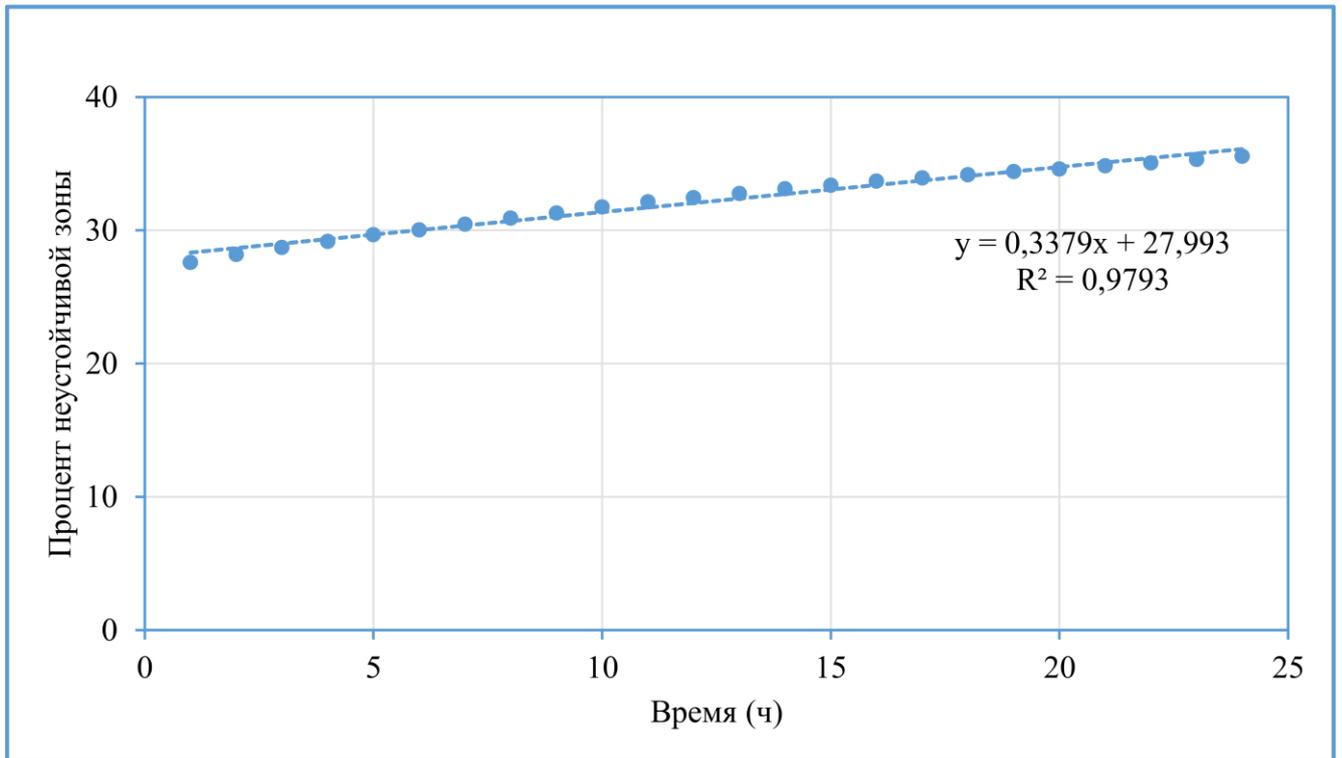


Рисунок 5.27 – Изменение площади неустойчивой зоны во времени с  $k_{eq} = 0,1$

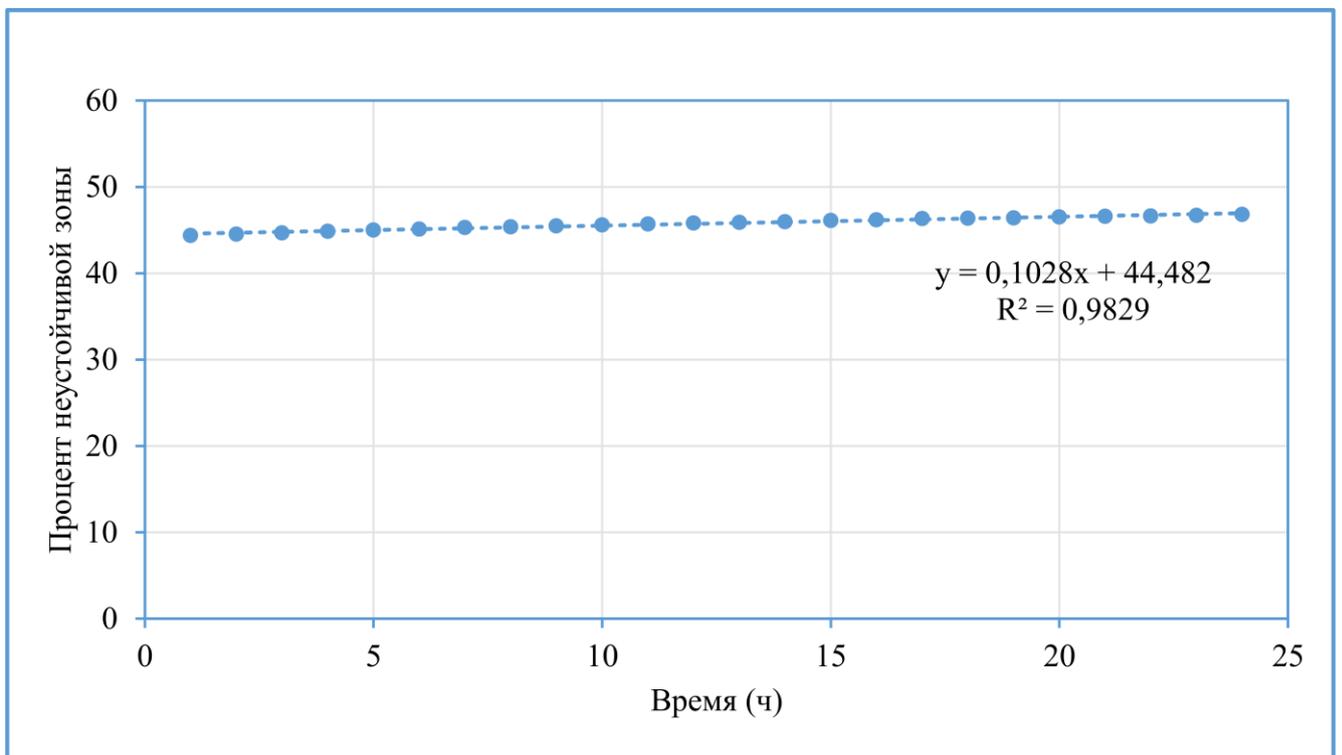


Рисунок 5.28 – Изменение площади неустойчивой зоны во времени с  $k_{eq} = 0,2$

## Выводы

Оценка оползневой опасности ПТС локального уровня была выполнена для коммуны Чунгчай (район Шапа провинции Лаокай) с применением детерминистического подхода, основанного на вычислении коэффициента устойчивости методом Бишопа и реализованного в Scoops3D, с последующим анализом в геоинформационной системе.

В процессе моделирования была выполнена количественная оценка влияния на устойчивость атмосферных осадков и сейсмического воздействия. С этой целью было проведено шесть различных вариантов расчета.

В результате участок исследования был разделен на четыре класса состояния склона по опасности: 1) устойчивое состояние (низкая опасность); 2) среднеустойчивое состояние (средняя опасность); 3) квазиустойчивое состояние (высокая опасность) и 4) неустойчивое состояние (критическая опасность).

Достоверность модели Scoops3D была оценена путем сравнения полученных результатов с картой инвентаризации оползней на основе индекса подтверждения ( $\%LR_{class}$ ). В выполненном исследовании  $\%LR_{class} = 64,19\%$ , что указывает на удовлетворительную эффективность. Для повышения достоверности результатов моделирования могут быть даны следующие рекомендации: повышение качества исходных данных; создание системы мониторинга порового давления; сочетание моделирования в Scoops3D с другими методами оценки оползневой опасности.

Выполненные расчеты позволили:

- Доказать тезис о том, что интенсивные осадки увеличивают опасность возникновения оползней.
- Количественно определить связь между площадью устойчивой/неустойчивой зоны и величиной псевдостатического коэффициента сейсмичности ( $k_{eq}$ ).
- Показать синергетический эффект от совместного воздействия землетрясения и осадков на степень оползневой опасности.
- Оценить динамику изменение площади неустойчивой зоны в зависимости от длительности ливневых осадков, в том числе с учетом интенсивности

сейсмического воздействия.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для управления землепользованием, территориального планирования и разработки комплексных систем мониторинга и раннего предупреждения.

Вышеизложенное позволяет сформулировать третье защищаемое положение:

*В основе оценки оползневой опасности на локальном уровне иерархии ПТС лежит детальное районирование территории, характеризующее устойчивость оползневых склонов с количественной оценкой влияния основных факторов оползнеобразования. Оптимальным подходом для решения этой задачи является применение детерминистического подхода, основанного на вычислении коэффициента устойчивости с последующим анализом результатов в геоинформационной системе.*

## **ГЛАВА 6 ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПТС ЭЛЕМЕНТАРНОГО УРОВНЯ (ОПОЛЗНЕВОЙ СКЛОН В КОММУНЕ ЧУНГЧАЙ)**

Элементарный уровень ПТС представляет систему, область взаимодействия которой, не пересекается и не граничит с другими сферами (например, отдельно стоящее сооружение). Оценка оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС, из-за своей конкретности, имеет наибольшее практическое значение. Она, как правило, осуществляется комплексом методов и глубже оценивает природу и механизм оползневой процесса. Как правило, она осуществляется в два последовательных этапа [48]:

1. Анализ изменения состояния склона в зависимости от вариации факторов оползнеобразования.

2. Прогноз изменений факторов оползнеобразования (нагрузок на склон, свойств пород, гидрогеологических и других условий) на рассматриваемом склоне.

При оценке оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС применяются, как правило, детерминистические методы, основанные на геотехническом подходе.

Все методы оценки оползневой опасности имеют свои ограничения в использовании. Проблема степени достоверности результатов в большинстве случаев может быть решена за счет комплексного использования методов, основанных на разных принципах с последующей оценкой их сходимости.

В этой главе представлены результаты оценки оползневой опасности ПТС элементарного уровня, полученные на основе обратных расчетов устойчивости оползневого склона в коммуне Чунгчай района Шапа.

Моделируемый оползневой склон расположен на провинциальной дороге 152 между км 12+600 и 12+900 в коммуне Чунгчай (Рисунок 6.1). Во время обследования в теле оползня были зафиксированы трещины и деформации. Главным фактором возникновения и развития оползневой процесса на исследуемом участке являются интенсивные ливневые осадки.

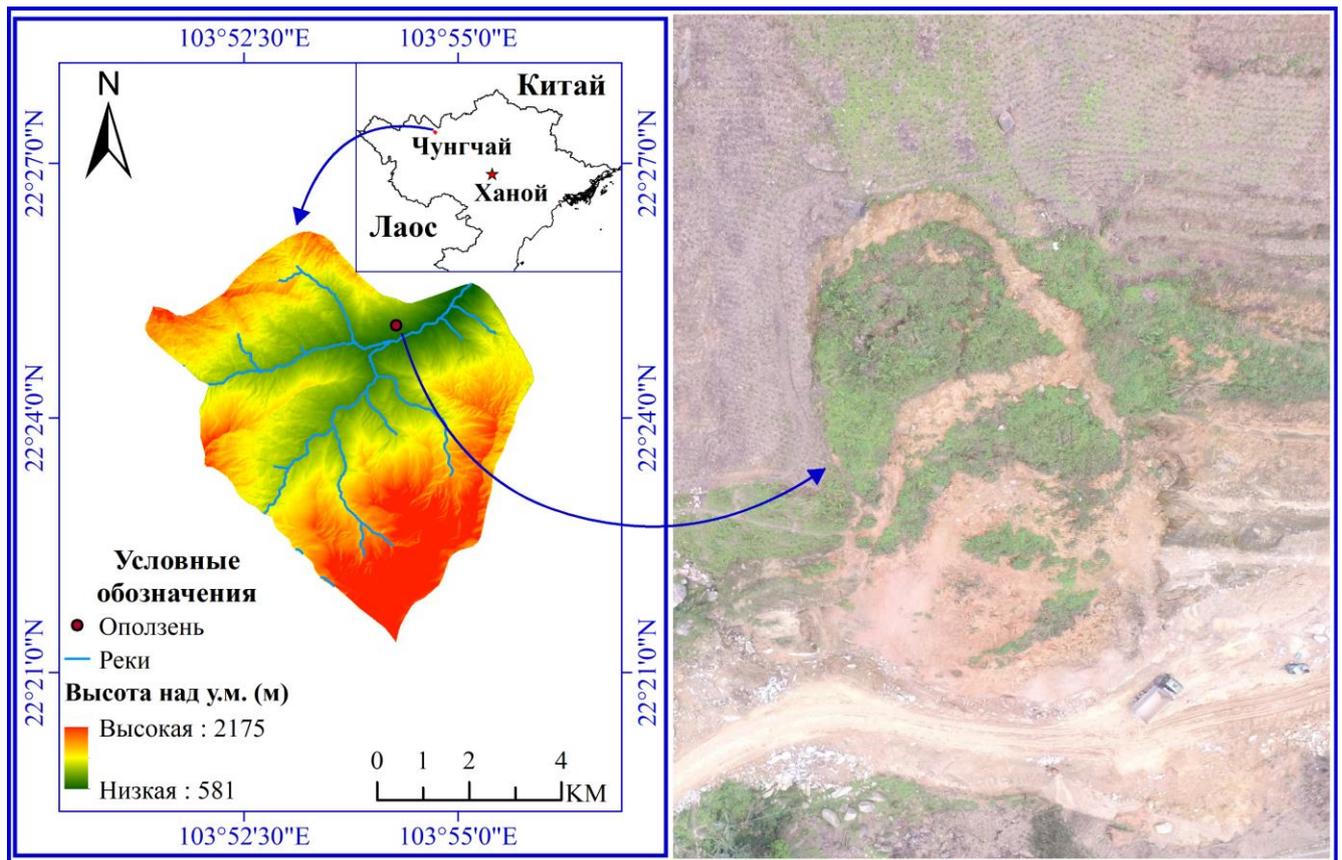


Рисунок 6.1 – Расположение места исследования

## 6.1 Методы исследования

Расчеты устойчивости были выполнены с использованием комплекса методов предельного равновесия и конечных элементов как в плоской, так и в объемной постановке задачи.

### 6.1.1 Метод предельного равновесия (МПР)

#### Основные положения

В настоящее время существует достаточно много различных методов, основанных на предельном равновесии. Это связано со статической неопределенностью задачи. Различия между методами заключаются в том, какие приняты допущения и как производится учет сил действующих на границе сегментов [48].

Методы предельного равновесия (МПР, LEM) можно разделить на 3 основные группы в зависимости от числа уравнений равновесия, которые ими удовлетворяются [126]:

1. Группа методов, которая удовлетворяет общему равновесию моментов.

2. Группа методов, которая удовлетворяет общему равновесию сил.

3. Группа методов, которая удовлетворяет общему равновесию моментов и сил.

В данном исследовании, для решения задачи устойчивости склона в плоской постановке был использован простой метод Янбу, в котором удовлетворяется равновесие сил и при этом не соблюдается равновесие моментов.

Метод разработан в 1954 году норвежским профессором геотехники Нилмаром Оскарсом Чарльзом Янбу [123]. Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные при расчёте по упрощённому методу Янбу показаны на Рисунок 6.2.

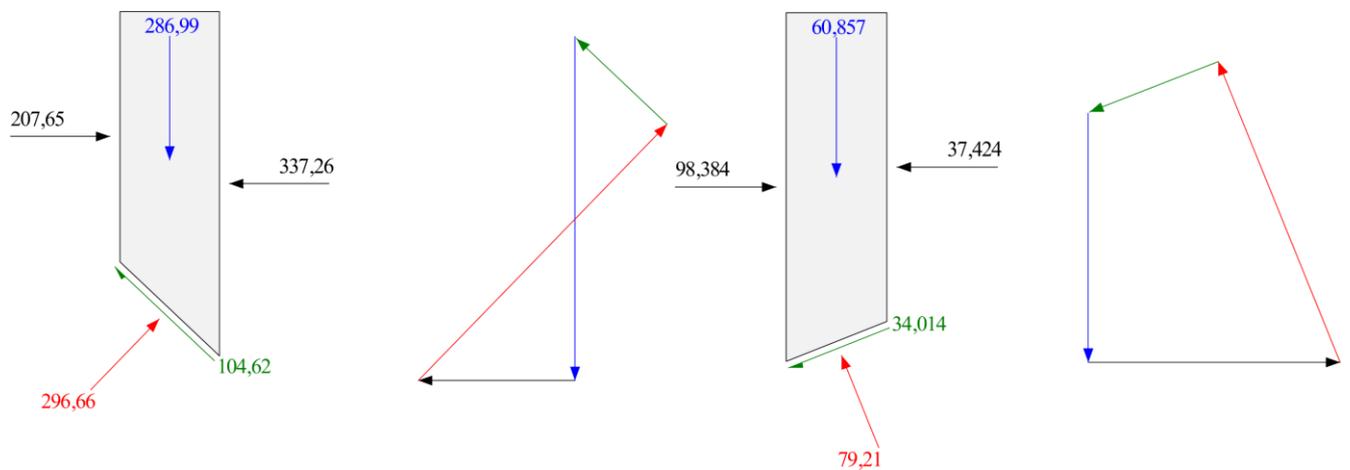


Рисунок 6.2 – Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные по упрощённому методу Янбу

Уравнение для вычисления коэффициента устойчивости по упрощённому методу Янбу выглядит так:

$$FS = \frac{\sum[(c \cdot \beta + N \cdot \tan \varphi) \cdot \sec \alpha]}{\sum W \cdot \tan \alpha + \sum \Delta E} \quad (6.1)$$

где  $FS$  – коэффициент устойчивости склона;  $c$  – величина сцепления грунта;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $W$  – вес отсека;  $N$  – сила реакции опоры отсека;  $\beta$  – длина основания отсека;  $\alpha$  – угол наклона основания отсека;  $\Delta E$  – разность горизонтальных удерживающих и сдвигающих горизонтальных сил, действующих на границах отсека.

Схематизация оползневых склонов двухмерной моделью представляет во многих случаях значительное и часто не всегда обоснованное упрощение реальной

ситуации [34]. Двумерные модели, предполагают условия плоского напряженного состояния, которое не выполняется для неоднородных склонов сложной структуры, с изменчивой литологией и рельефом.

При решении задачи в объемной постановке была использована модификация простого метода Янбу, выполненная Ченгом и Ипом [87], позволяющий использовать его для 3D расчетов.

### **Методы глобальной оптимизации поверхности скольжения**

Результатом решения задачи по расчету устойчивости методами предельного равновесия является нахождение положения и формы критической поверхности скольжения (характеризующейся минимальным коэффициентом устойчивости).

Нахождение критической поверхности скольжения (ПС) (если она не задана априори) в методах предельного равновесия является многошаговым. На первом шаге определяется вероятная ПС и высчитывается коэффициент устойчивости склона. Эта процедура повторяется для целого ряда возможных ПС. В итоге, поверхность скольжения с наименьшим коэффициентом устойчивости определяется как критическая [48]. Для повышения эффективности расчетов методами предельного равновесия, за последние десятилетия были разработаны алгоритмы поиска, существенно уменьшающие количество шагов при определении ПС с минимальным значением коэффициента устойчивости. Эти алгоритмы, в настоящее время известны как методы глобальной оптимизации поверхностей скольжения.

В данном исследовании в качестве методов глобальной оптимизации ПС были использованы: метод поиска кукушки (Cuckoo Search) и поиск Роя частиц (Particle Swarm Search).

#### ***Метод поиска кукушки***

Теория данного алгоритма поиска была вдохновлена агрессивной стратегией размножения кукушки, которая откладывает яйца в гнезда других птиц. Данный метод был предложен Янгом и Дебом в 2009 году. Он относится к алгоритмам эволюционной оптимизации и основан на поведении кукушки при размножении [218]. Поиск Кукушки основан на трёх важных правилах:

1. Каждая кукушка откладывает по одному яйцу за раз в случайно выбранное гнездо.
2. Лучшие гнезда будут переданы следующим поколениям.
3. Количество доступных гнезд фиксировано, и яйцо, снесенное кукушкой, обнаруживается птицей-хозяином гнезда с вероятностью  $p \in [0, 1]$ . В случае обнаружения птица-хозяин гнезда может либо выбросить яйцо, либо отказаться от гнезда и построить новое.

Опыт использования данного алгоритма глобальной оптимизации доказал его высокую эффективность [143].

### ***Поиск роя частиц (PSO)***

Инженер-электрик Рассел К. Эберхарт и социальный психолог Джеймс Кеннеди предложили и первоначально разработали метод оптимизации роя частиц в 1995 году [97, 131]. Этот метод моделирует поведение стаи птиц, когда они случайным образом ищут пищу на своем пути. Он относится к подмножеству методов известному как роевой интеллект - важному и быстро развивающемуся направлению в области естественных вычислений [101]. Оптимизация роя частиц является одним из наиболее широко используемых оптимизаторов на основе популяции с широким спектром применений. В 2004 году алгоритм PSO был впервые использован для определения критической поверхности скольжения при расчетах устойчивости склонов. Исследование устойчивости грунтовых склонов в рамках МПР состоит из двух последовательных этапов: вычисления коэффициента устойчивости потенциальных поверхностей скольжения и нахождения критической поверхности скольжения (КПС) среди всех кандидатов [70].

### **Методы локальной оптимизации поверхностей скольжения**

В классической постановке расчеты ведутся по поверхностям скольжения круглоцилиндрической (при плоской постановке задачи) или эллипсоидальной (при объемной постановке задачи) формы. Но, во-первых - в природе такая форма поверхности скольжения встречается не часто, что, в первую очередь, связано с геолого-структурными особенностями массивов грунтов, а, во-вторых - исследования выявили возможность инкрементального изменения частей

поверхности скольжения [108], в результате которого происходит снижение коэффициента устойчивости склона, а сама поверхность скольжения при этом приобретает вид, отличный от классического. Данная техника минимизации коэффициента устойчивости за счет пошагового изменения частей первоначально вычисленной ПС получила название локальной оптимизации поверхности скольжения. В данном исследовании в качестве метода локальной оптимизации ПС были использованы: метод случайного блуждания [108] и оптимизация с изменением поверхности (SA).

### *Метод случайного блуждания*

Данный метод был предложен Greco, V. R. [108] в 1996 году. Он основан на использовании метода Монте-Карло. Свое название он получил по той причине, что направление перемещения вершин в нем определяет случайно сгенерированное число. При этом, единственными данными, которые используются для определения предпочтительности одной поверхности перед другой, является коэффициент устойчивости.

Данный метод включает следующие шаги:

- На первом этапе рассчитывается коэффициент устойчивости для начальной поверхности скольжения.
- Далее расположение одной из вершин на поверхности изменяется случайным образом.
- Коэффициент устойчивости рассчитывается для новой поверхности.
- Если коэффициент устойчивости для измененной поверхности оказывается ниже, чем коэффициент устойчивости для исходной поверхности, новая поверхность заменяет исходную и изменяется местоположение следующей вершины.
- Затем процесс повторяется.
- Если коэффициент устойчивости для модифицированной поверхности оказывается выше, чем коэффициент устойчивости для исходной поверхности (или изменение коэффициента устойчивости ниже некоторого допуска), процесс завершается.

### ***Оптимизация с изменением поверхности***

Оптимизации с изменением поверхности (SA) – это метод локальной оптимизации, который использует результаты глобальной оптимизации (например, Cuckoo search). SA – это мощный инструмент для снижения коэффициентов устойчивости за счет изменения геометрии заданной поверхности скольжения.

### **Детерминистический и вероятностный анализ**

При применении детерминистических методов получаемые результаты в виде оценки устойчивости, не соответствуют по своей сути классическому определению оползневой опасности, под которой понимается вероятность развития оползневой опасности. В детерминистических моделях количественные вероятностные оценки невозможны по определению. Таким образом, классическим результатом использования методов, основанных на геотехническом подходе, является количественная оценка устойчивости склонов и, полученная на этой основе, качественная оценка оползневой опасности.

Коэффициент устойчивости в МПР определяется как отношение между доступной прочностью на сдвиг ( $s$ ) и равновесным напряжением сдвига ( $\tau$ ) (напряжение сдвига вдоль поверхности устойчивости скольжения, необходимое для поддержания устойчивости склона) (уравнение **Ошибка! Источник ссылки не найден.**):

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad (6.2)$$

В настоящее время коэффициент устойчивости (FS) является основным результатом количественной оценки устойчивости склона. Предполагая, что значения всех входных параметров модели точно известны, детерминистический анализ выдает единственное значение FS, которое служит оценкой возможности деформаций склона, связанных с оползневой процессом [99, 100]. Но известно, что любая оценка обладает неточностью. Сбор, накопление и анализ данных, как правило, сопровождаются ошибками измерения, искажающими и без того скудную информацию об инженерно-геологических условиях. Данная проблема усугубляется пространственно-временной случайной природой геологических

процессов, воздействующих на природно-технические системы [26]. Полученные на основании детерминистических расчетов коэффициенты устойчивости склонов в действительности не определяют фактический уровень опасности, поскольку невозможно установить взаимосвязь между ними и вероятностью развития оползневой процесса. По этой причине, вероятностный анализ устойчивости склонов приобретает все большую актуальность в мировой практике, и находит все большее применение с ростом понимания случайности и неопределенности имеющихся в распоряжении данных [16].

В отличие от детерминистического подхода, при вероятностном анализе, исходными параметрами являются не единичные значения свойств грунтов, а их функции распределения. Результатом решения, в этом случае является так же вероятностная функция распределения  $FS$ , на основе которой можно определить вероятность развития оползневой процесса ( $PF$ ) по следующей формуле:

$$PF = \frac{\text{Количество результатов расчетов с } FS < 1}{\text{Общее количество расчетов}} \quad (6.3)$$

Вероятностный анализ позволяет выполнять количественную оценку надежности. Под надежностью понимается обобщенное свойство, характеризующее работоспособность системы, т.е. ее безопасность, эксплуатационную пригодность и долговечность при всех вероятностных отклонениях условий работы [26].

Количественной мерой надежности является индекс надежности ( $RI$ ), который определяется как способность системы выполнять необходимые задачи при определенных условиях в течение определенного периода времени [212]. При оценке устойчивости склона индекс надежности может быть количественно определен согласно следующей формуле:

$$RI = \frac{FS - 1,0}{\sigma_{FS}} \quad (6.4)$$

Одной из основных проблем при проведении анализа надежности является определение приемлемого уровня безопасности. В настоящее время не существуют единого мнения по этому вопросу. Например, согласно рекомендациям

департамента военных инженеров армии США (Рисунок 6.3) [206], при  $RI > 3,0$  (т.е.  $PF = 0,001$ ) будет достигнут удовлетворительный уровень надежности.

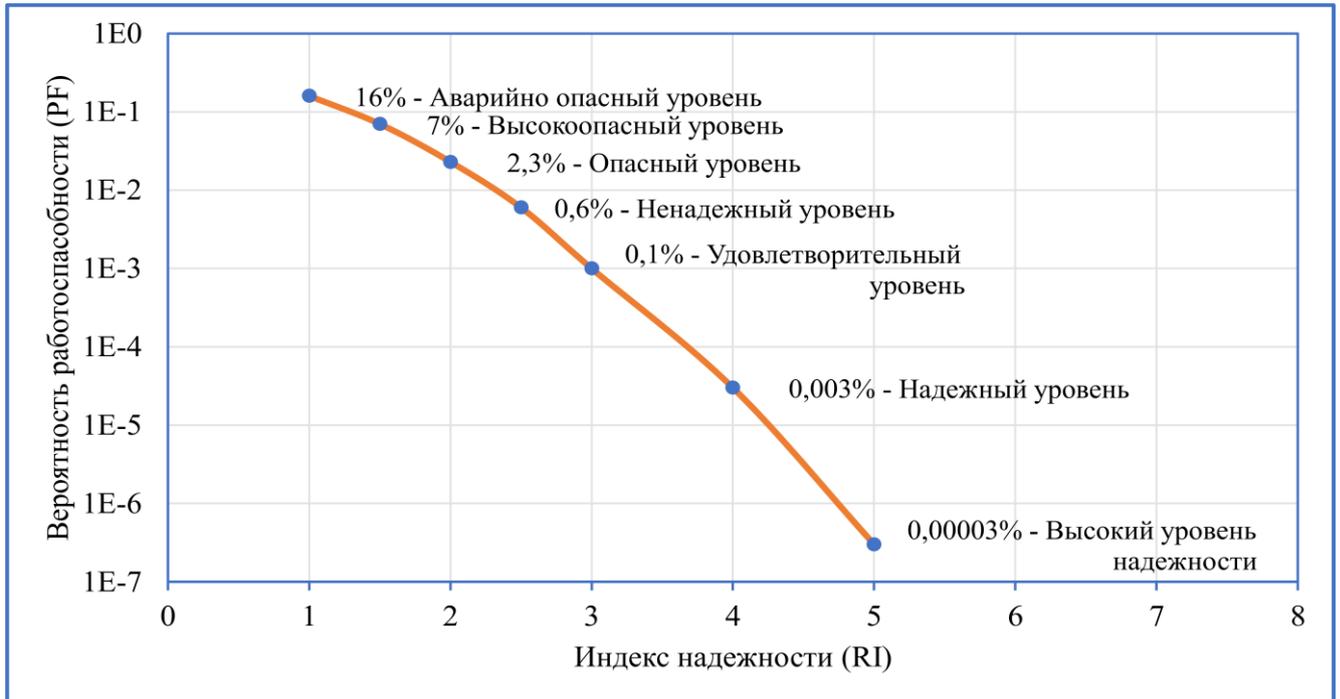


Рисунок 6.3 – Зависимость уровня вероятности работоспособности от индекса надежности (по рекомендациям [206])

Расчеты на основе МПР были выполнены с использованием программ Rocscience Slide2 (в плоской постановке задачи) и Slide3 (в объемной постановке задачи). Схема расчета устойчивости склона с использованием МПР представлена на Рисунок 6.4.

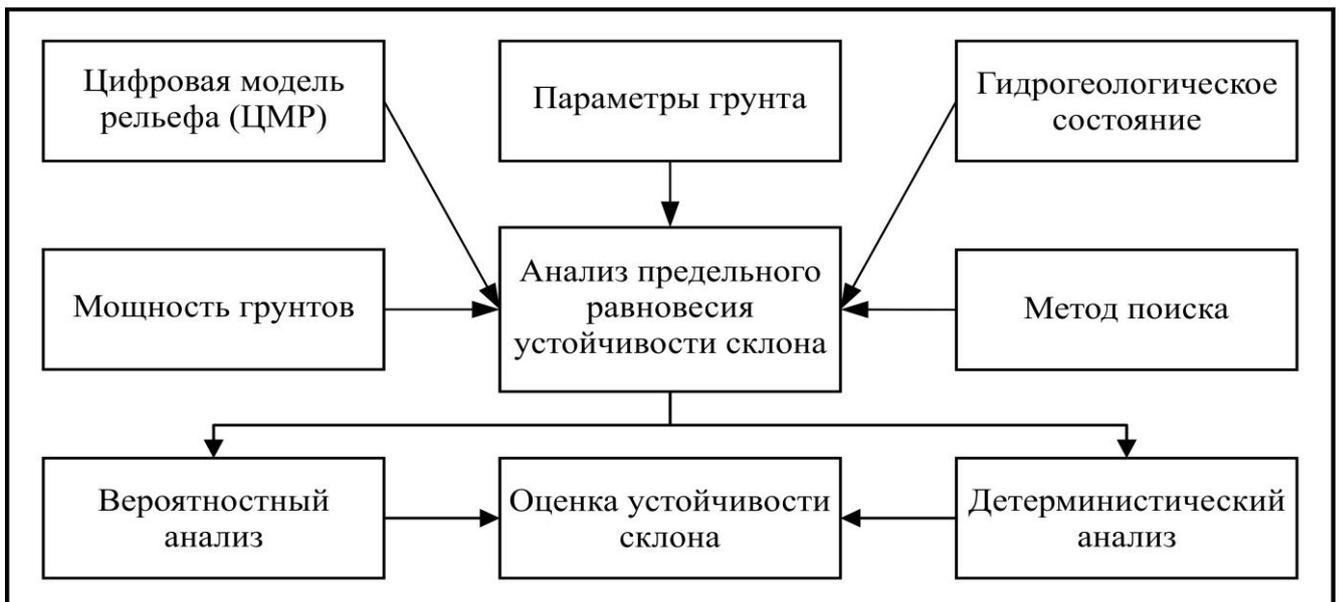


Рисунок 6.4 – Схема оценки устойчивости склона с использованием МПР

### 6.1.2 Метод конечных элементов (МКЭ)

Метод конечных элементов (МКЭ, FEM) является одним из основных численных методов решения задач механики сплошной среды.

Одна из особенностей МКЭ состоит в том, что он базируется скорее на интегральной формулировке анализируемого явления, нежели на дифференциальной форме, которую представляют уравнения в частных производных и граничные условия. Суть метода заключена в его названии. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается вычислительной мощностью. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разрежённый вид, что существенно упрощает её решение [48].

С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала (который представляет собой потенциальную энергию деформируемого тела) вариационной задачи осуществляется на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти. Такая потенциальная энергия системы является разностью энергии деформирования и работы внешних сил. Если говорить в матричных терминах, то собираются так называемые матрицы жёсткости. Они связывают вектор узловых сил с вектором вызываемых ими узловых перемещений с помощью

глобальной матрицы жесткости, элементами которой служат жесткости отдельных элементов, на которые разделена исследуемая область. Далее на эти матрицы накладываются граничные условия. Таким образом, при замене сплошной среды дискретной схемой с конечным числом параметров, исходная система дифференциальных уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние, заменяется линейной системой уравнений, которая может быть легко разрешена на основе методов линейной алгебры:

$$[K]\vec{u} = \vec{F} \quad (6.5)$$

где:  $[K]$  – матрица жесткостей;  $\vec{u}$  – вектор узловых перемещений;  $\vec{F}$  – вектор нагрузок.

Матрица жесткости  $[K]$  зависит от геометрических и физико-механических параметров изучаемой расчетной области и вида рассматриваемого напряженного состояния, а также типов используемых конечных элементов.

Определение устойчивости склона выполняется либо методом редукции (ступенчатого уменьшения прочностных параметров материалов модели), либо на основе предельного анализа (LAM).

Основная идея метода редукции состоит в нахождении таких критических значений прочностных характеристик грунта, когда наступает состояние предельного равновесия, за которое в МКЭ принимается состояние математической модели, при котором не может быть получено устойчивое решение краевой задачи вследствие безграничного нарастания деформаций расчетной области.

Коэффициент запаса несущей способности откосов и склонов определяется как отношение исходных прочностных параметров грунтов, слагающих рассматриваемый склон к их минимальным значениям, при которых решение краевой задачи еще возможно [96].

Основная идея, заложенная в LAM, заключается в том, что грунты, слагающие склон рассматриваются как идеально пластичное тело, удовлетворяющее условиям связанности пластичного течения. В этом случае их

поведение будет ограничено двумя предельными теоремами пластического разрушения (верхней и нижней границей).

Согласно верхней предельной теоремы пластического разрушения, используемой в LAM, смещение грунтов будет происходить, если будет происходить потеря энергии по поверхности скольжения, соответственно верхний предел может быть найден как минимум потери энергии по поверхности скольжения. Для нахождения верхнего предела вводятся два предположения: должна быть определена допустимая область смещения и смещение происходит с постоянной скоростью. Вычисляемыми показателями являются работа, выполняемая внешними силами (такими как вес или сейсмическое воздействие) и потеря энергии по поверхности скольжения. Нижняя предельная теорема пластического разрушения строится на предположении о допустимом поле напряжений, при этом поле напряжений не является непрерывным, а состоит из нескольких отдельных зон, охватывающих весь массив. Согласно нижней предельной теоремы, поле напряжений в каждой зоне должно удовлетворять уравнениям равновесия, заданным граничным условиям и быть ниже, чем напряжение начала вязкопластичного течения. В этом случае смещение грунтов происходить не будет. При этом стоит обратить внимание, что в нижней предельной теореме не рассматриваются деформации и смещения, а уровень напряжений не обязательно соответствует фактическому напряженному состоянию разрушения. Однако, изучая различные допустимые состояния напряжений, лучшая (самая высокая) нижняя граница, при которой наиболее вероятно смещение грунтов может быть найдена.

Гриффитс и Лейн (1999) [109] определили следующие преимущества метода конечных элементов по сравнению с методами предельного равновесия:

(а) Не нужно заранее делать никаких допущений относительно формы или местоположения поверхности разрушения.

(б) Поскольку в методе конечных элементов нет понятия отсеков, нет необходимости в допущениях о силах, действующих на их границе.

(в) В отличие от методов предельного равновесия МКЭ учитывает условие

неразрывности между напряжениями и деформациями и, таким образом на результаты влияют не только прочностные, но и деформационные свойства грунтов.

(г) МКЭ позволяет контролировать прогрессирующие деформации вплоть до полного разрушения.

Расчеты на основе МКЭ были выполнены с использованием программ Rocscience RS2 (в плоской постановке задачи) и RS3 (в объемной постановке задачи). Схема оценки устойчивости склона с использованием метода конечных элементов показана на Рисунок 6.5.

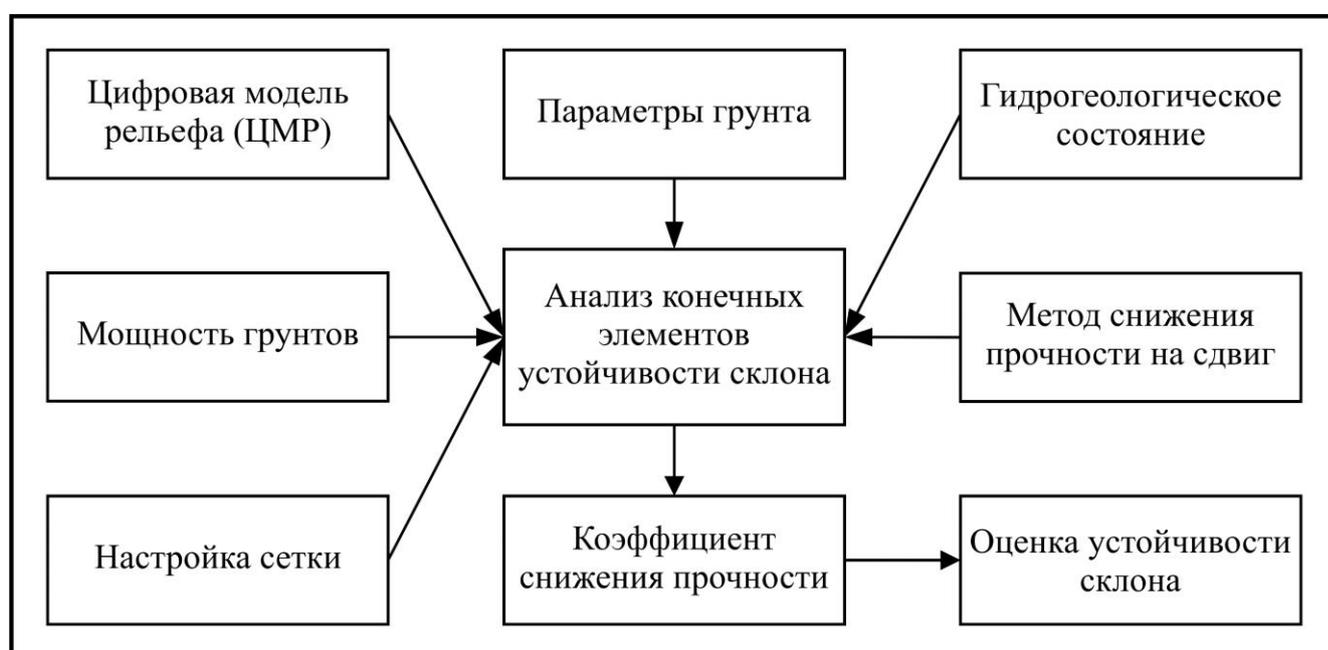


Рисунок 6.5 – Схема оценки устойчивости склона с использованием МКЭ

## 6.2 Построение геотехнической модели. Исходные данные

Одним из главных этапов выполнения работ по количественной оценке устойчивости склонов является схематизация при построении геотехнической модели. Выполнение схематизации можно разделить на два взаимосвязанных этапа:

- Схематизацию структуры склонового массива;
- Схематизацию свойств грунтов.

### 6.2.1 Схематизацию структуры склонового массива

В качестве топографической основы была использована цифровая модель

рельефа (ЦМР) с разрешением 1 метр.

В геологическом отношении участок исследования сложен грунтами комплекса По Сен, которые включают гранодиориты, граниты и гранит-мигматиты достаточно высокой прочности. Однако, в процессе выветривания коренных грунтов образовался мощный слой элювиально-делювиальных отложений суглинистого состава с включениями гравия и щебня коренных грунтов.

ЦМР и геологическая информация и стали основой при построении инженерно-геологического разреза (Рисунок 6.6) и объемной инженерно-геологической модели (Рисунок 6.7). На Рисунок 6.8 представлена легенда к инженерно-геологическим моделям.

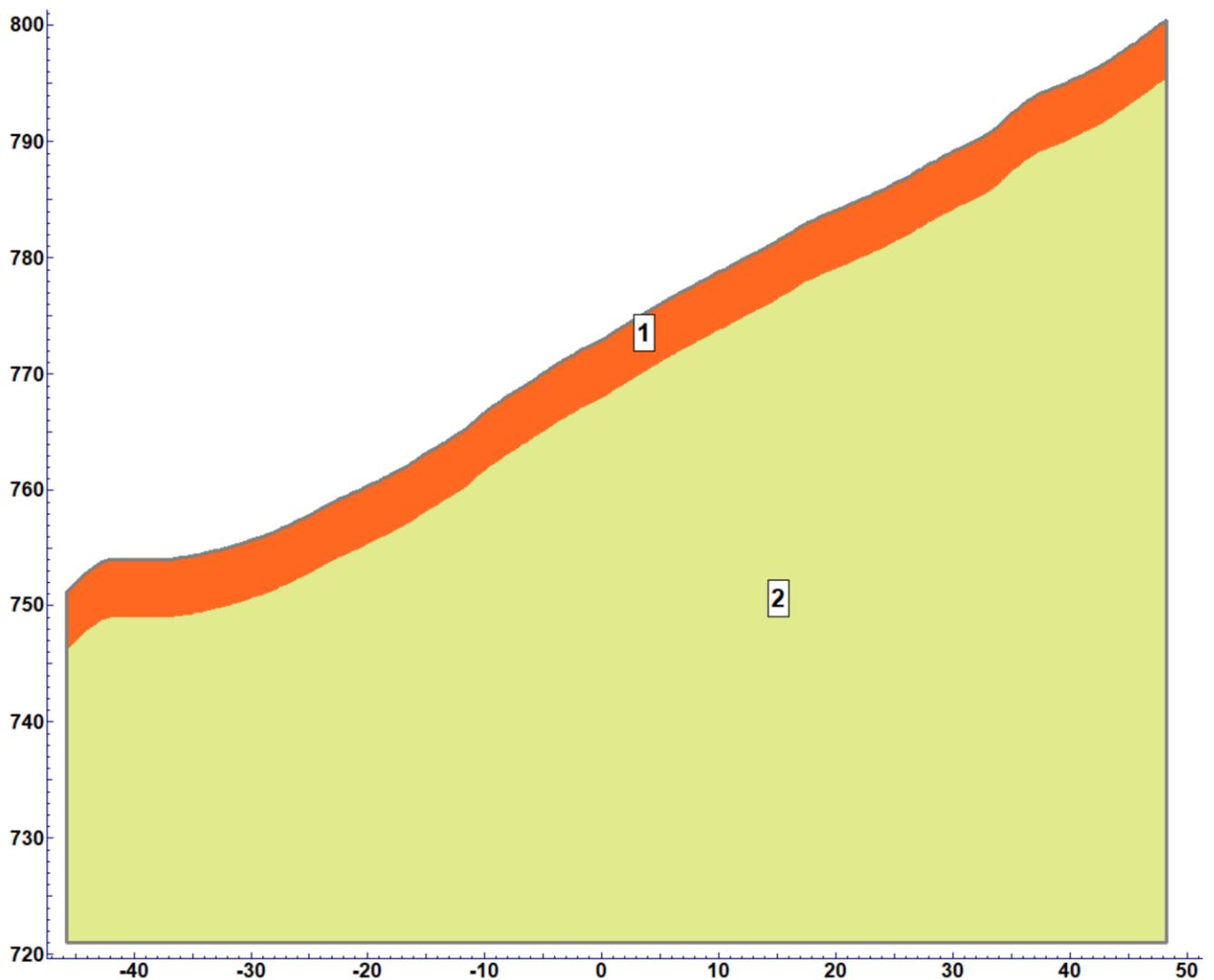
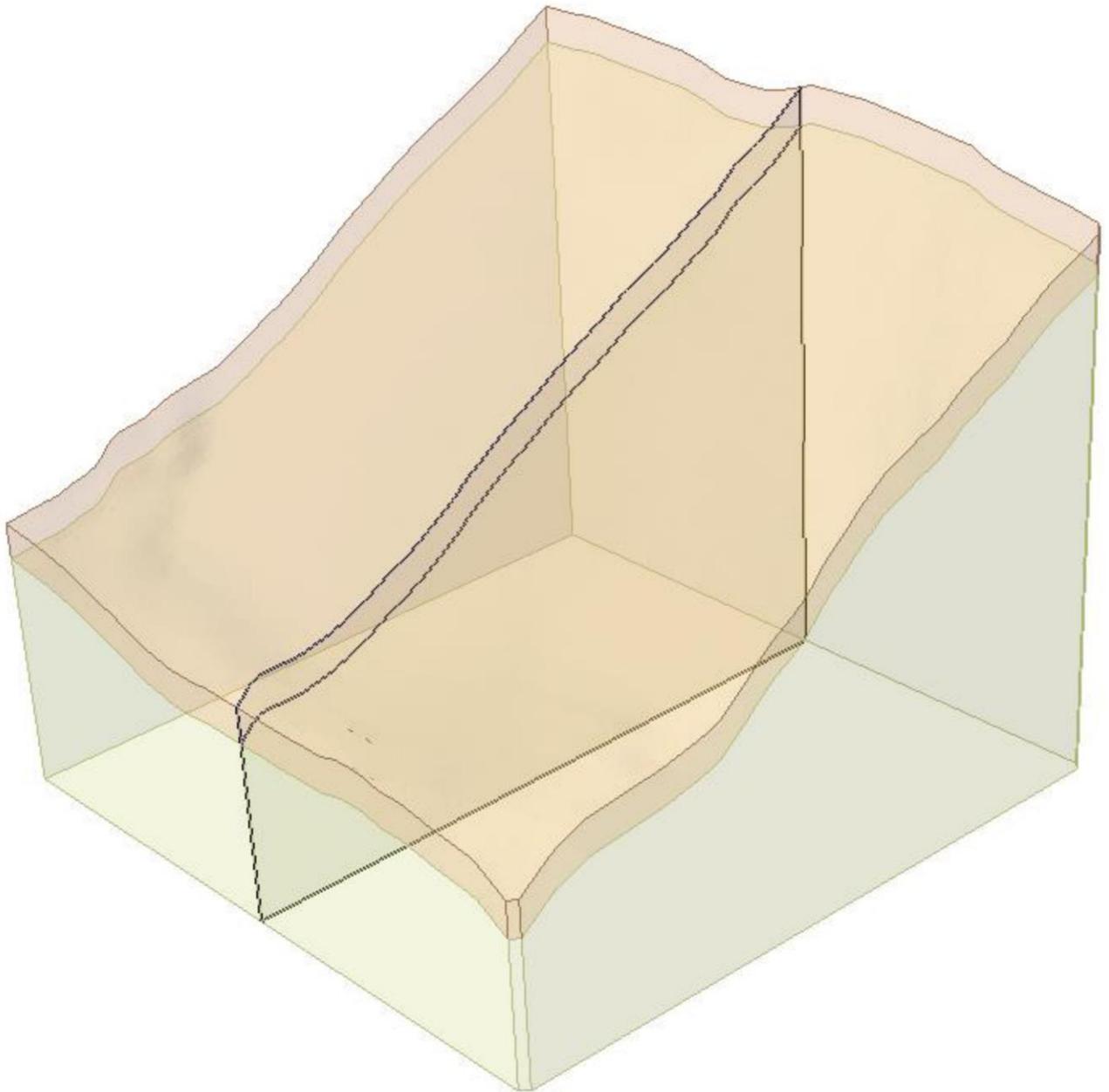


Рисунок 6.6 – Инженерно-геологический разрез участка



*Рисунок 6.7 – Объемная инженерно-геологическая модель*

ИГЭ	Описание грунтов
1	Элювиально-делювиальные отложения
2	Гранодиориты, граниты и гранит-мигматиты комплекса По Сен

*Рисунок 6.8 – Легенда к инженерно-геологическим моделям*

### **6.2.2 Схематизация физико-механических свойств грунтов**

В качестве исходных данных были использованы результаты инженерно-геологических изысканий и данные об осадках, собранные Институтом

геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

В расчетах была принята упругопластическая модель поведения грунтов Кулона-Мора, которая объединяет упруго идеально пластическое поведение и линейный критерий прочности материалов, прочность которых на сжатие существенно превышает прочность на растяжение.

В пространственной постановке прочность материала по Кулону – Мору представляется в виде равностороннего шестигранного (гексагонального) конуса, (Рисунок 6.9). Симметричность конуса характеризует изотропный материал. Очевидно, что точка, принадлежащая одной из плоскостей конуса, отражает предельное напряженное состояние. Так, например, точка D характеризуется напряженным состоянием, где  $\sigma'_1 = \max; \sigma'_2 = \sigma'_3$ . Соответственно математическая форма записи предельных плоскостей в пространстве будет иметь вид:

$$\begin{cases} (\sigma'_3 - \sigma'_2) \leq 2c' \cos \varphi' - (\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin \varphi' \\ (\sigma'_2 - \sigma'_3) \leq 2c' \cos \varphi' - (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi' \\ (\sigma'_3 - \sigma'_1) \leq 2c' \cos \varphi' - (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi' \\ (\sigma'_1 - \sigma'_3) \leq 2c' \cos \varphi' - (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' \\ (\sigma'_2 - \sigma'_1) \leq 2c' \cos \varphi' - (\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin \varphi' \\ (\sigma'_1 - \sigma'_2) \leq 2c' \cos \varphi' - (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \varphi' \end{cases} \quad (6.6)$$

где  $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$  - главные напряжения,  $c'$  - удельное сцепление,  $\varphi'$  - угол внутреннего трения.

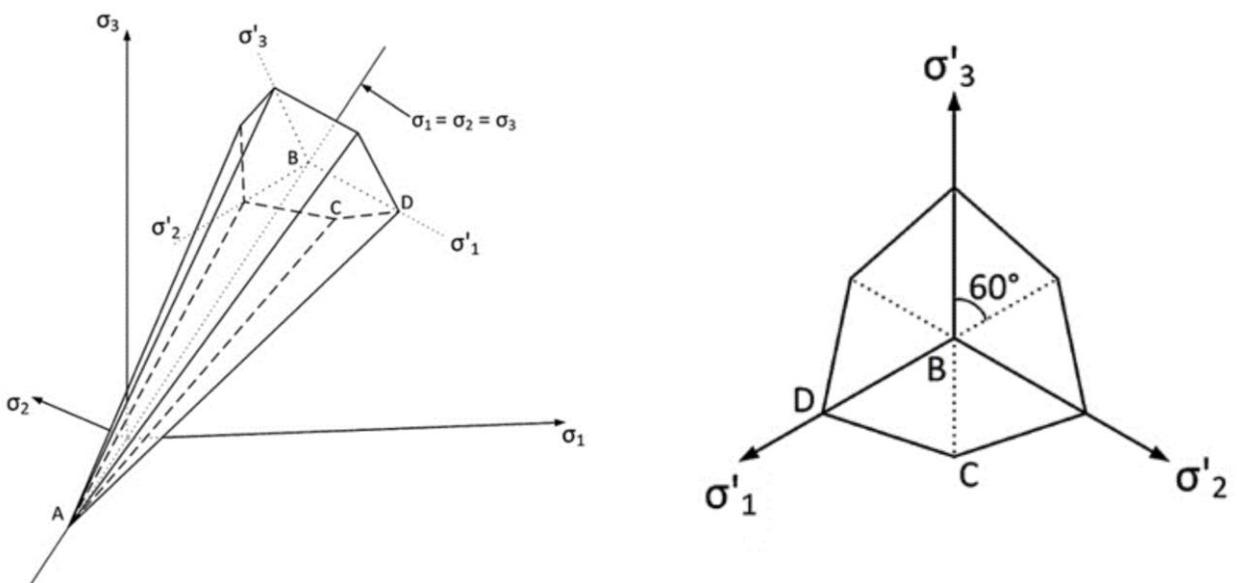


Рисунок 6.9 – Гексагональный конус критерия прочности Кулона-Мора

Параметры прочности – удельное сцепление и угол внутреннего трения были определены на основании консолидированных-дренированных испытаний на сдвиг по двум вариантам: при естественной влажности (для оценки устойчивости склона в сухой сезон) и в водонасыщенном состоянии (для оценки устойчивости склона в период ливневых осадков). Результаты испытаний на сдвиг грунтов элювиально-делювиального генезиса приведены в Таблица 6.1.

*Таблица 6.1 – Физико-механические свойства грунтов элювиально-делювиального генезиса*

Параметры	Символ	Единица	Вариант расчета	
			Сухой сезон	Сезон дождей
Плотность грунта	$\gamma$	кН/м <sup>3</sup>	18,9	19,3
Сцепление грунта	$c$	кПа	22,0	20,0
Угол внутреннего трения	$\varphi$	( <sup>0</sup> )	16,3	15,1

Из-за отсутствия фактических данных по замерам порового давления в этом исследовании, влияние порового давления на результаты расчета устойчивости склона учитывали путем введения в расчет коэффициента порового давления  $R_u$  предложенного Бишопом и Моргенштерном в 1960г. [77], которые определили его следующим образом:

$$R_u = \frac{u}{\gamma h} \quad (6.7)$$

где  $u$  – поровое давление;  $\gamma$  – удельный вес грунта;  $h$  – глубина рассматриваемой точки от поверхности грунта.

При перестановке переменных определение величины порового давления приобретает следующий вид:

$$u = R_u \gamma h \quad (6.8)$$

Использование коэффициента порового давления  $R_u$  широко представлено на диаграммах расчета устойчивости склонов, разработанных Бишопом и Моргенштерном [77].

Существенным недостатком данного подхода является допущение о постоянстве коэффициента порового давления ( $R_u$ ) по всему поперечному

сечению.

Учет изменения порового давления, так же, как и при оценке оползневой опасности ПТС локального уровня, основывался на анализе интенсивности осадков. В результате для определения коэффициента порового давления ( $R_u$ ) были использованы данные об осадках во время сильного ливня, который длился с 22ч 30 мая по 24ч 31 мая 2020 года. В 15ч 31 мая максимальное значение  $R_u$  составило 0,286. На Рисунок 6.10 приведена взаимосвязь между коэффициентом порового давления и интенсивностью осадков.

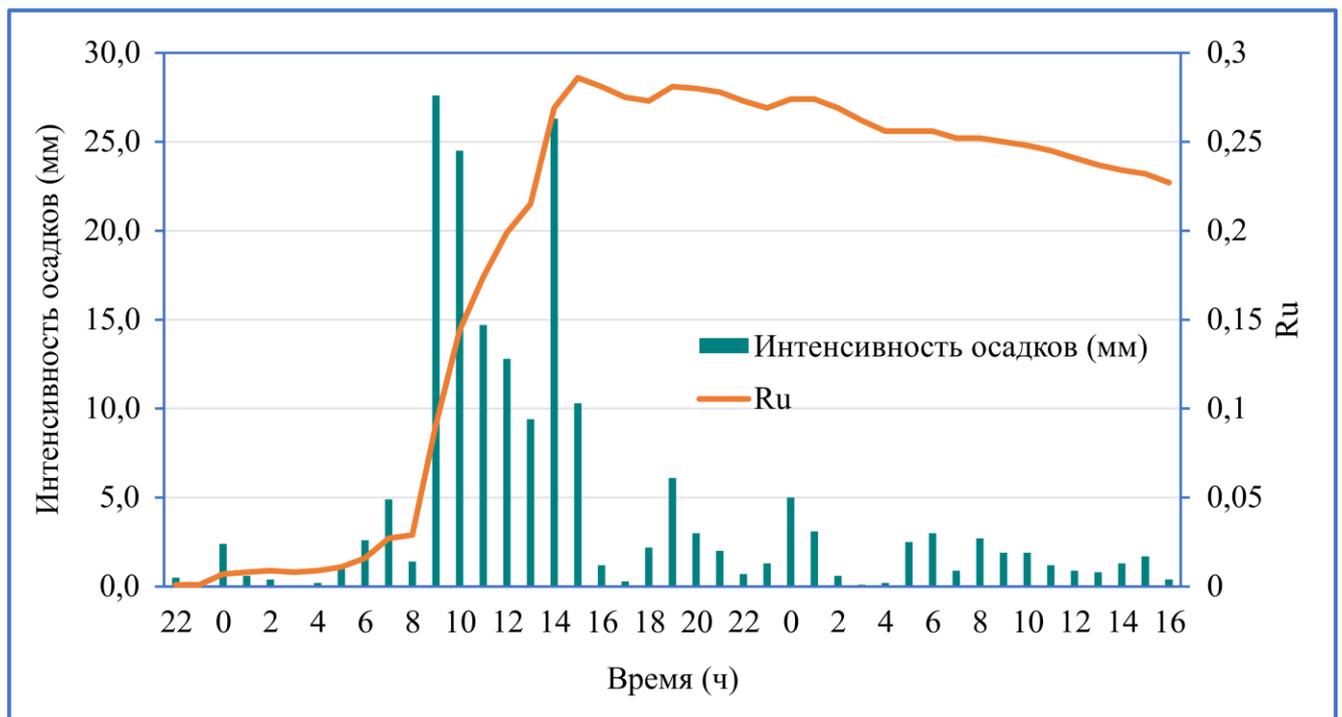


Рисунок 6.10 – Связь между интенсивностью осадков и  $R_u$

### 6.3 Результаты исследования

#### 6.3.1 Результаты расчета устойчивости склона методом предельного равновесия (МПР)

Расчеты МПР были выполнены для оценки изменения устойчивости склона, связанной с увеличением коэффициента порового давления, вызванного интенсивными ливневыми осадками. Моделирование осуществлялось в трех и двухмерной постановке задачи, по следующим вариантам:

- В «сухой» период (коэффициент порового давления  $R_u = 0$ );
- В период интенсивных ливневых осадков на момент времени 10ч, 31 мая,

2020 года (коэффициент порового давления  $R_u = 0,144$ ).

С целью оценки оползневой опасности был выполнен вероятностный анализ.

### Результаты расчета устойчивости склона в объемной постановке задачи

Расчеты были выполнены простым методом Янбу, с использованием мультимодальной оптимизации поверхности скольжения, позволяющей находить несколько локальных минимумов, на основе метода поиска роя частиц (PSO) при детерминистических расчетах и унимодальной оптимизации, на основе метода поиска кукушки при вероятностном анализе.

Итоговая геотехническая 3D модель, с результатами оценки устойчивости в «сухой» период приведена на Рисунок 6.11, в период интенсивных ливневых осадков - на Рисунок 6.12.

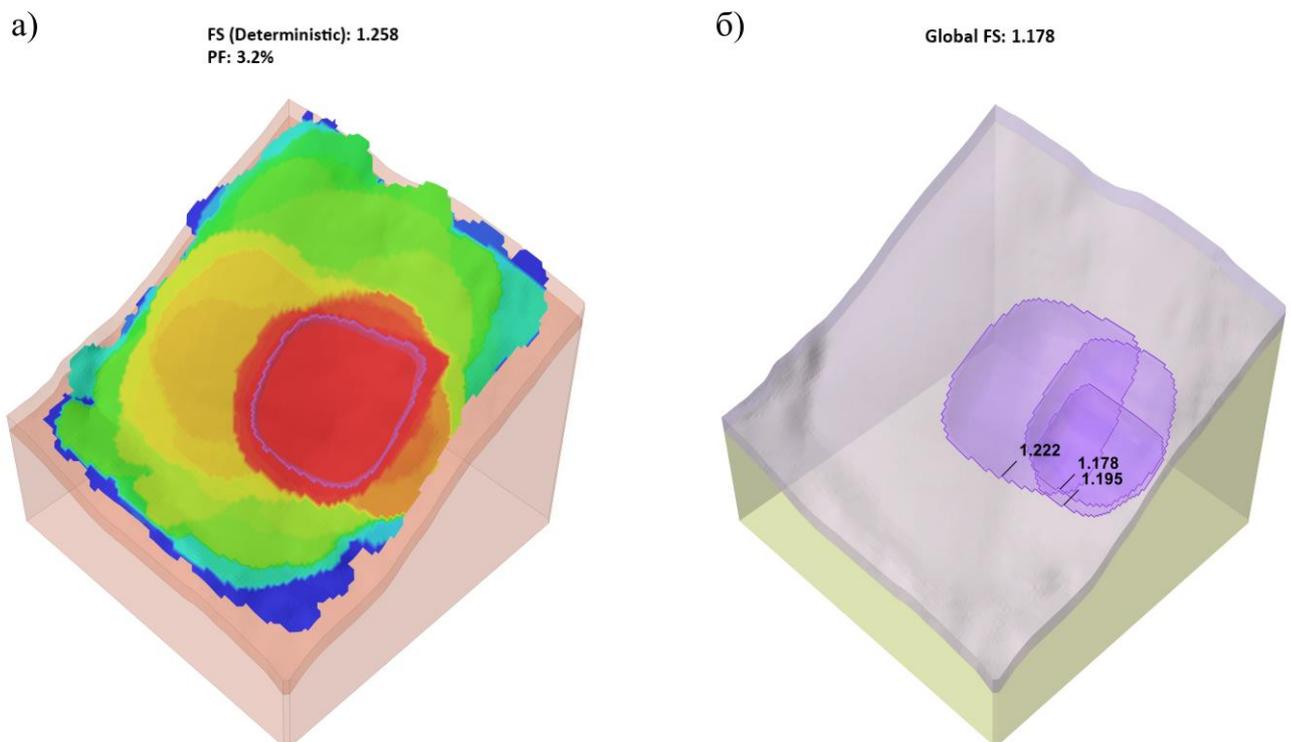
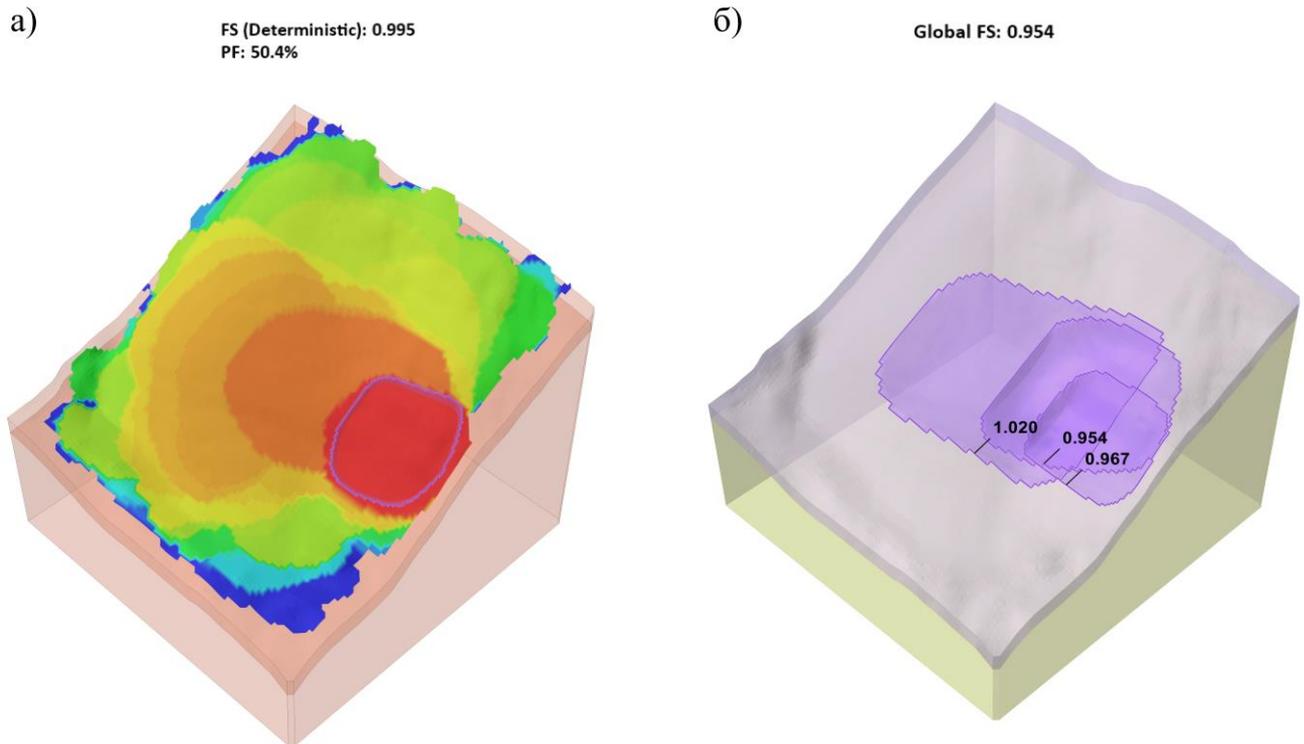


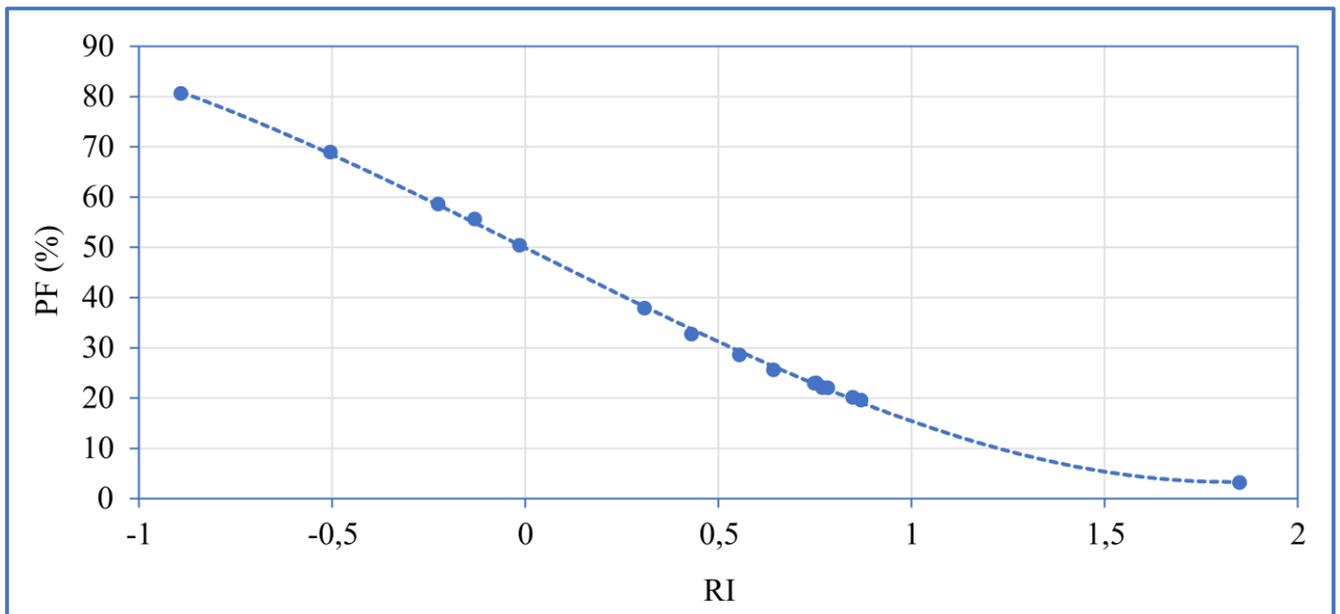
Рисунок 6.11 – Результат расчета устойчивости склона в «сухой» период: а) карта устойчивости склона; б) положение возможных поверхностей скольжения, полученных в процессе мультимодальной оптимизации PSO



*Рисунок 6.12 – Результат расчета устойчивости склона период интенсивных ливневых осадков на момент времени 10ч, 31 мая, 2020 года: а) карта устойчивости склона; б) положение возможных поверхностей скольжения, полученных в процессе мультимодальной оптимизации PSO*

Анализ полученных результатов показал, что в «сухой» период склон является устойчивым, FS составляет 1,258 и 1,178 при вероятностном и детерминистическом анализе соответственно. Вероятность активизации оползневой процесса (PF) составляет 3,2%. Много это или мало? Насколько такая вероятность реализации оползневой процесса является опасной? Как указывалось выше (см. Рисунок 6.3) при  $PF > 2,3\%$  уровень надежности системы оценивается как опасный. Поэтому, несмотря на тот факт, что моделируемый склон в «сухой» период является устойчивым, уровень надежности ПТС к развитию оползневой процесса следует оценивать как опасный [74].

Связь между вероятностью активизации оползневой процесса (PF) и индексом надежности (RI) с учетом  $R_u$ , полученная в результате выполненных расчетов приведена на Рисунок 6.13.



*Рисунок 6.13 – Связь между PF и RI с учетом  $R_u$ , полученная в результате выполненных расчетов в Slide 3*

В процессе интенсивных ливневых осадков, за счет инфильтрации воды в грунт, будет происходить увеличение порового давления, что, как следствие, приведет к снижению коэффициента устойчивости склона. Выполненный расчет показал, что при увеличении  $R_u$  от 0 до 0,286 (на момент времени 15ч 31 мая, 2020г.), FS уменьшается с 1,258 до 0,901 при вероятностном анализе и с 1,178 до 0,895 при детерминистическом расчете. Вероятность активизации оползневой процесса (PF) при этом увеличивается с 3,2 до 80,6%. Кроме того, результаты анализа показали, что склон теряет устойчивость около 10:00 утра 31 мая.

На Рисунок 6.14 показано изменение величины коэффициента устойчивости склона в зависимости от изменения коэффициента порового давления во времени, прошедшего от начала ливневого дождя. Его анализ показывает, что наибольшее падение FS наблюдается в первые два часа от начала ливня, далее коэффициент устойчивости снижается с очень незначительным градиентом. Следует отметить аномальное возрастание FS после 16 часов от начала дождя. Видимо это связано с двумя причинами: 1) за счет возможного изменения положения поверхности скольжения с минимальным FS в процессе вероятностного анализа; 2) за счет связанных с изменением положения поверхности скольжения ошибок расчета, в частности вероятностный анализ выполнялся только на один глобальный минимум,

определенный на основе детерминированного анализа.

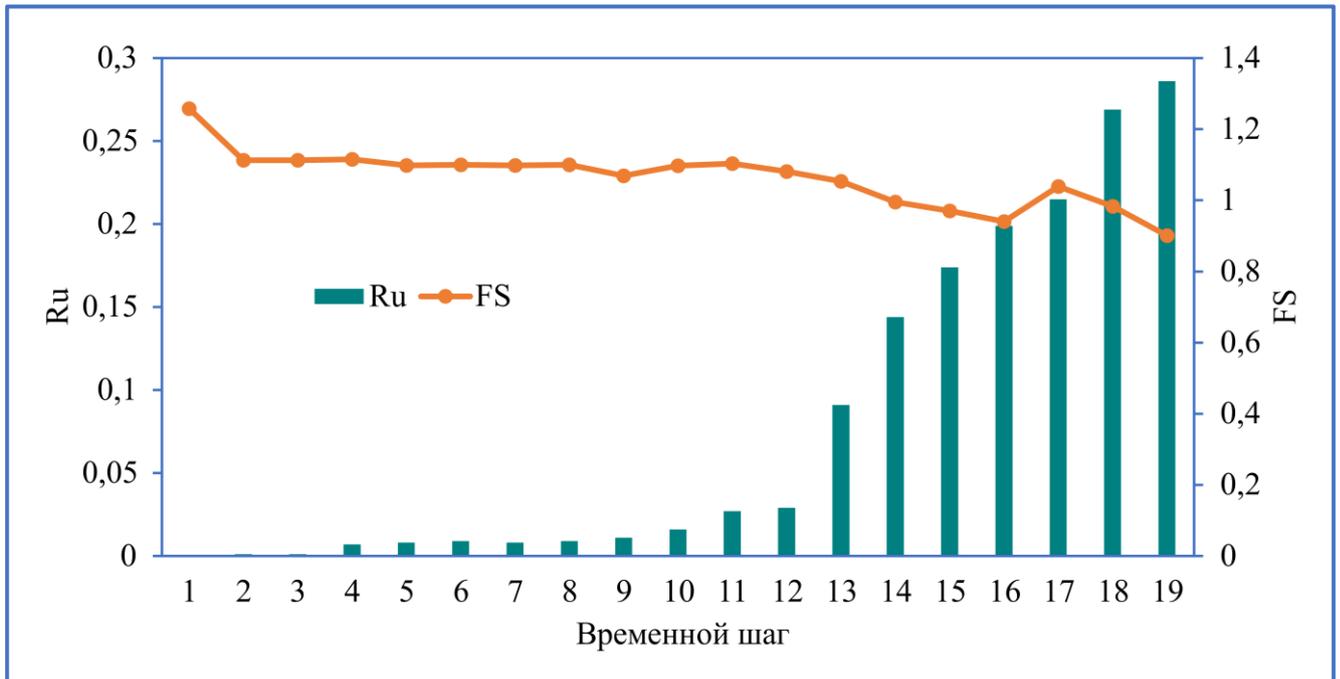


Рисунок 6.14 – Связь между FS и Ru от времени, прошедшего от начала ливневого дождя (вероятностный анализ)

На Рисунок 6.15 показано изменение величины вероятности развития оползневой процесса в зависимости от изменения коэффициента порового давления во времени, прошедшего от начала ливневого дождя.

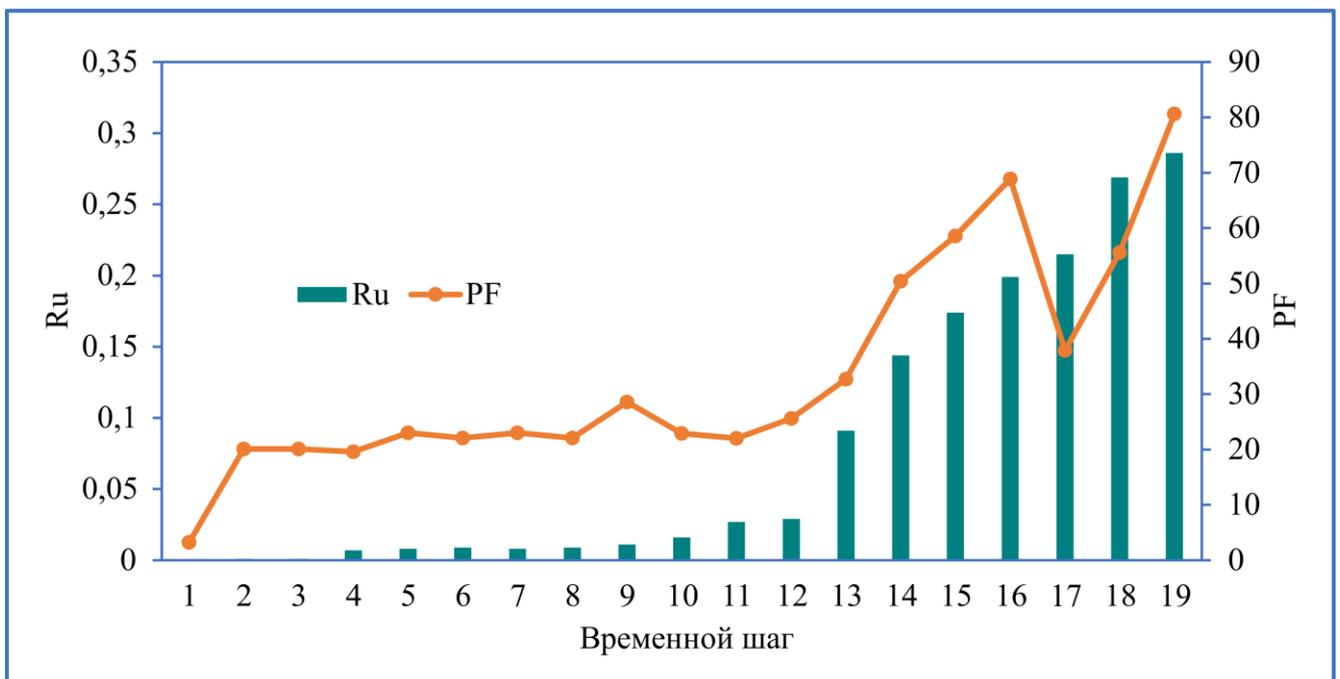


Рисунок 6.15 – Связь между PF и Ru от времени, прошедшего от начала ливневого дождя (вероятностный анализ)

Его анализ показывает более сложную, в сравнении с изменением величины FS зависимость. Наибольшее возрастание PF наблюдается так же в первые два часа от начала ливня, далее вероятность растёт с очень незначительным градиентом до момента времени 12 часов от начала дождя, после которого начинает быстро возрастать. Отмечается аномальное падение PF после 16 часов, вызванное теми же самыми причинами, что и аномальное возрастание FS.

Выполненная с помощью детерминистического анализа корреляция между FS и Ru (Рисунок 6.16), в целом показала, близкий к полученному при вероятностном анализе характер, за исключением аномального возрастания FS после 16 часов от начала дождя, что косвенно подтверждает причины, полученных при вероятностном анализе аномальных результатов.

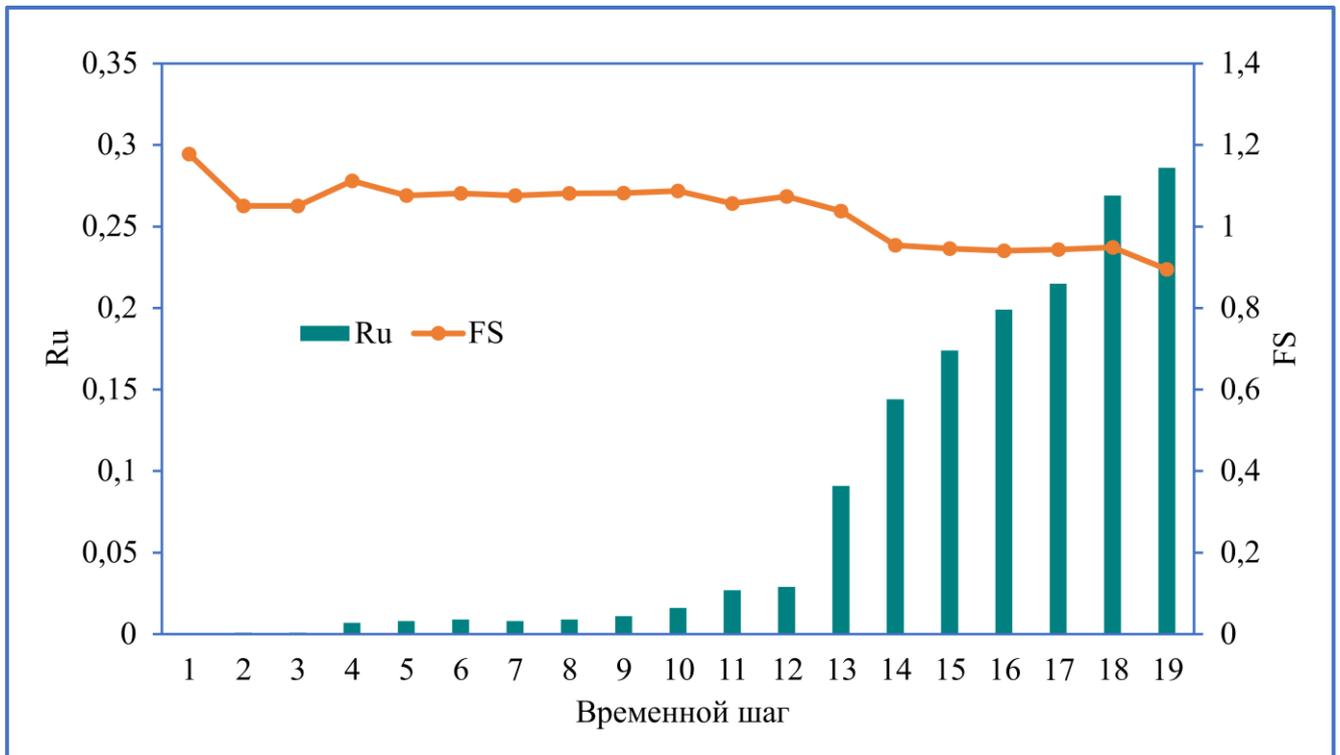


Рисунок 6.16 – Связь между FS и Ru от времени, прошедшего от начала ливневого дождя (детерминистический анализ)

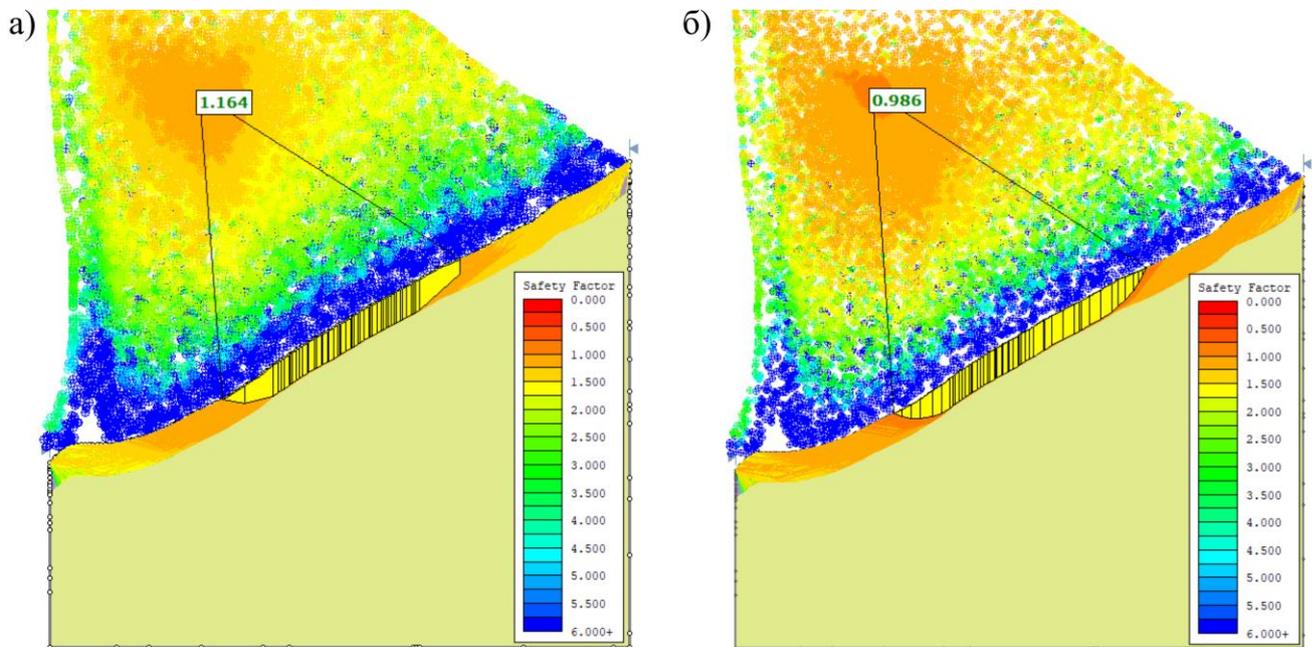
### Результаты расчета устойчивости склона в плоской постановке задачи

Геотехническая модель для выполнения расчета устойчивости в плоской постановке задачи в Slide 2 была построена на основе поперечного сечения, сгенерированного из трёхмерной модели, созданной в Slide3, вдоль линии

смещения оползневого блока.

Расчеты были выполнены в детерминированном варианте, простым методом Янбу, с использованием унимодальной оптимизации на основе метода поиска кукушки. Основной задачей являлась сравнение полученных результатов с решением, полученным при объемном моделировании.

Итоговая геотехническая 2D модель, с результатами оценки устойчивости в «сухой» период приведена на Рисунок 6.17а, в период интенсивных ливневых осадков - на Рисунок 6.17б. Положение поверхности скольжения располагается в середине исследуемого склона, что хорошо соотносится как с результатами полученными в Slide3, так и с ее фактически зафиксированным положением в результате полевого обследования участка.



(а) в сухом сезоне и (б) в 10ч, 31 Мая

Рисунок 6.17 – Результаты расчета устойчивости склона с использованием Slide2

Полученные результаты расчета, с учетом известной консервативности 2D-анализа, так же хорошо согласуются с результатами 3D моделирования. Их анализ показал, что склон устойчив в «сухом» периоде (FS - 1,16). В период интенсивных ливневых осадков, при увеличении коэффициента порового давления с 0 до 0,286, FS уменьшается до 0,902 (Рисунок 6.18). Кроме того, выполненный в Slide2 анализ

показал, что наиболее вероятное время развития оползневой процесса около 10ч утра 31 мая, когда значение  $R_u$  достигло 0,144, а FS упал ниже 1, что соответствует результатам моделирования, полученным в Slide3.

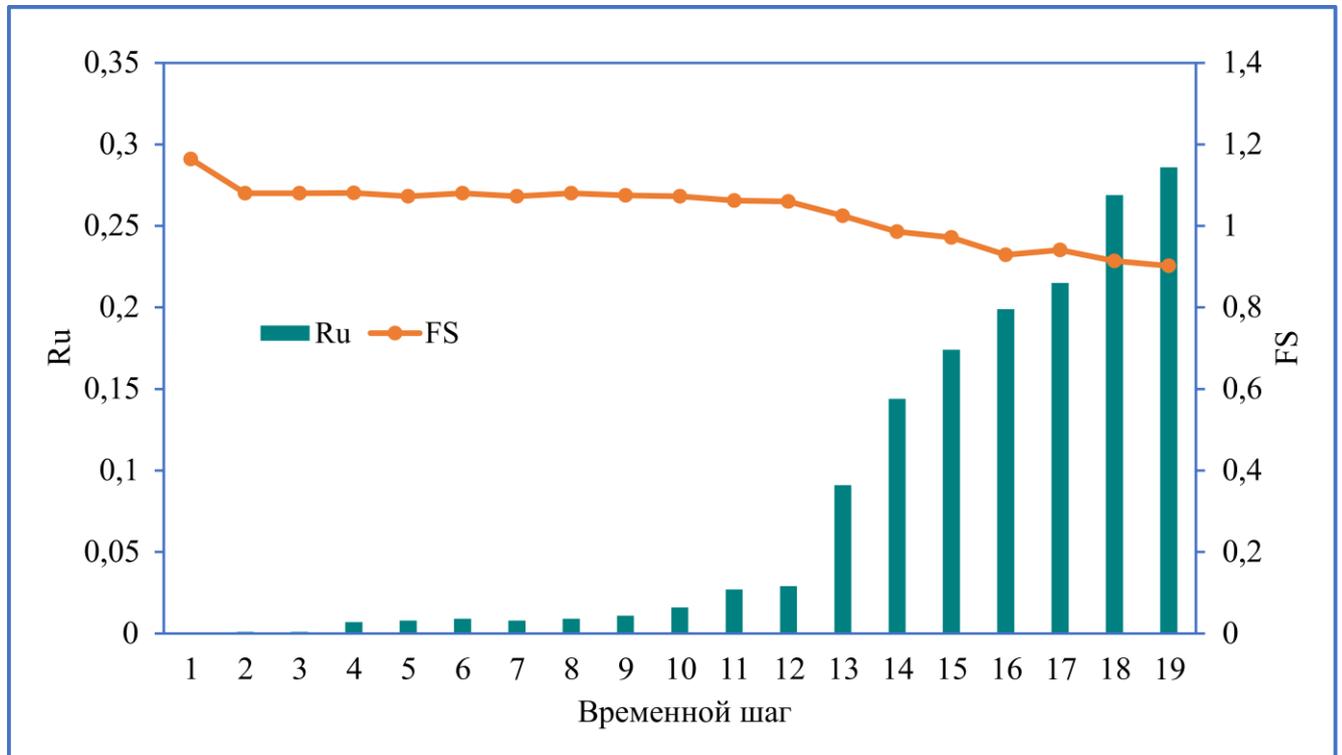


Рисунок 6.18 – Связь между FS и  $R_u$  от времени, прошедшего от начала ливневого дождя (детерминистический анализ)

Полученные в процессе расчётов МПР результаты обобщены в Таблица 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты расчета устойчивости склона МПР

Время (ч)	$R_u$	Slide3			Slide2	
		Вероятностный анализ		Детерминистический анализ		
		FS	PF (%)	RI		FS
	0	1,258	3,2	1,850	1,178	1,164
22	0,001	1,113	20,1	0,848	1,051	1,080
23	0,001	1,113	20,1	0,848	1,051	1,080
0	0,007	1,115	19,6	0,870	1,112	1,081
1	0,008	1,098	23,0	0,754	1,076	1,073
2	0,009	1,100	22,1	0,770	1,081	1,080
3	0,008	1,098	23,0	0,754	1,076	1,073
4	0,009	1,100	22,1	0,770	1,081	1,080

5	0,011	1,069	28,6	0,555	1,082	1,075
6	0,016	1,097	22,9	0,749	1,087	1,073
7	0,027	1,103	22,0	0,784	1,057	1,062
8	0,029	1,081	25,6	0,643	1,074	1,060
9	0,091	1,054	32,7	0,431	1,038	1,025
10	0,144	0,995	50,4	-0,014	0,954	0,986
11	0,174	0,970	58,6	-0,225	0,946	0,972
12	0,199	0,940	68,9	-0,504	0,941	0,929
13	0,215	1,039	37,9	0,309	0,944	0,941
14	0,269	0,983	55,6	-0,130	0,949	0,914
15	0,286	0,901	80,6	-0,891	0,895	0,902

### **6.3.2 Совместный учет сейсмического воздействия и ливневых осадков на устойчивость склона**

Как показали результаты, представленные в главах 2 и 5, важным оползнеобразующим фактором в районе исследования являются землетрясения. Кроме того, в случае если землетрясение произойдет в периоды дождей, вероятность развития оползневого процесса существенно возрастет.

С целью оценки влияния сейсмического воздействия и порового давления на основе МПР был выполнен анализ чувствительности, результаты которого представлены на Рисунок 6.19-Рисунок 6.21.

Анализ полученных графиков показывает, что возрастание коэффициента порового давления  $R_u$  вследствие осадков до значения 0,23 (Рисунок 6.19) или землетрясение со значением коэффициента горизонтального пикового ускорения  $k_{eq}$  более 0,08 (Рисунок 6.20) может привести к развитию оползня на исследуемом склоне. При высоком значении  $R_u$  даже незначительное землетрясение может стать причиной активизации оползневого процесса. Для комбинированного прогноза оползневой опасности от совместного влияния обоих триггеров, можно использовать уравнение, представленное на Рисунок 6.21.

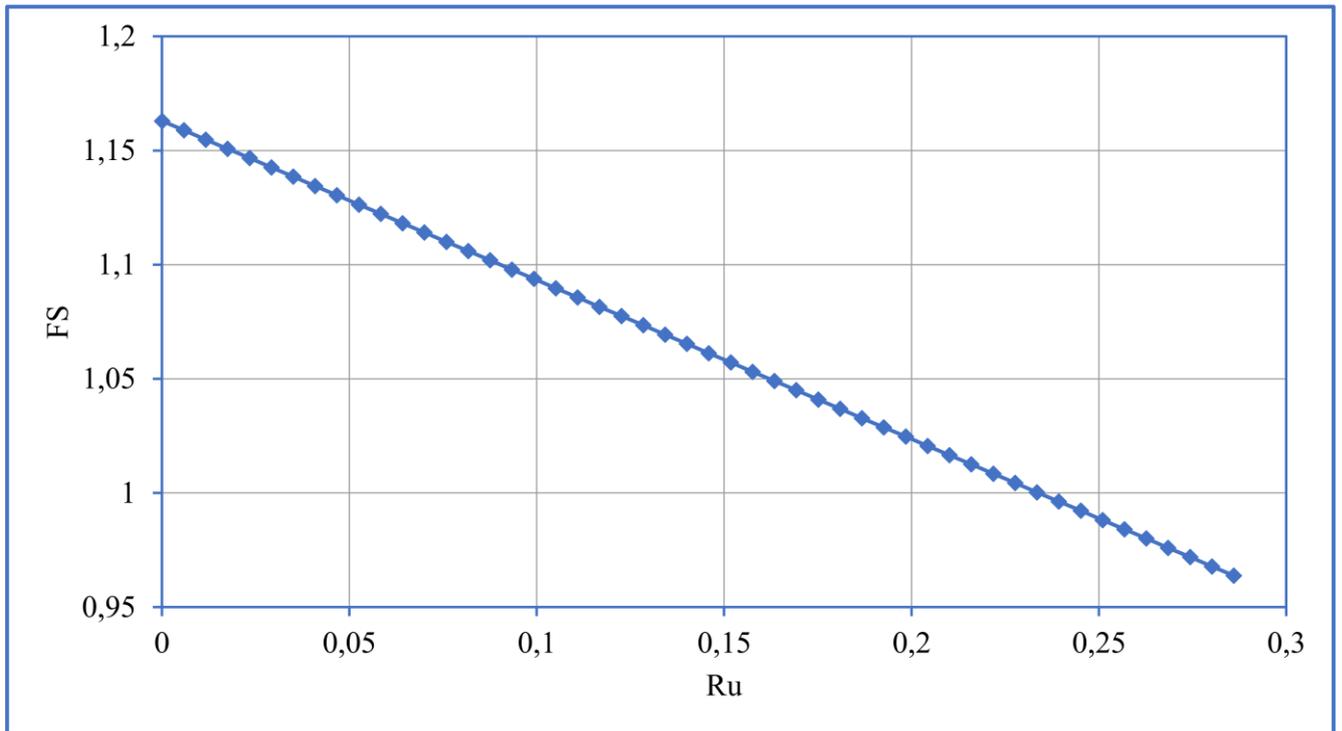


Рисунок 6.19 – Связь между значением  $FS$  и значением  $R_u$

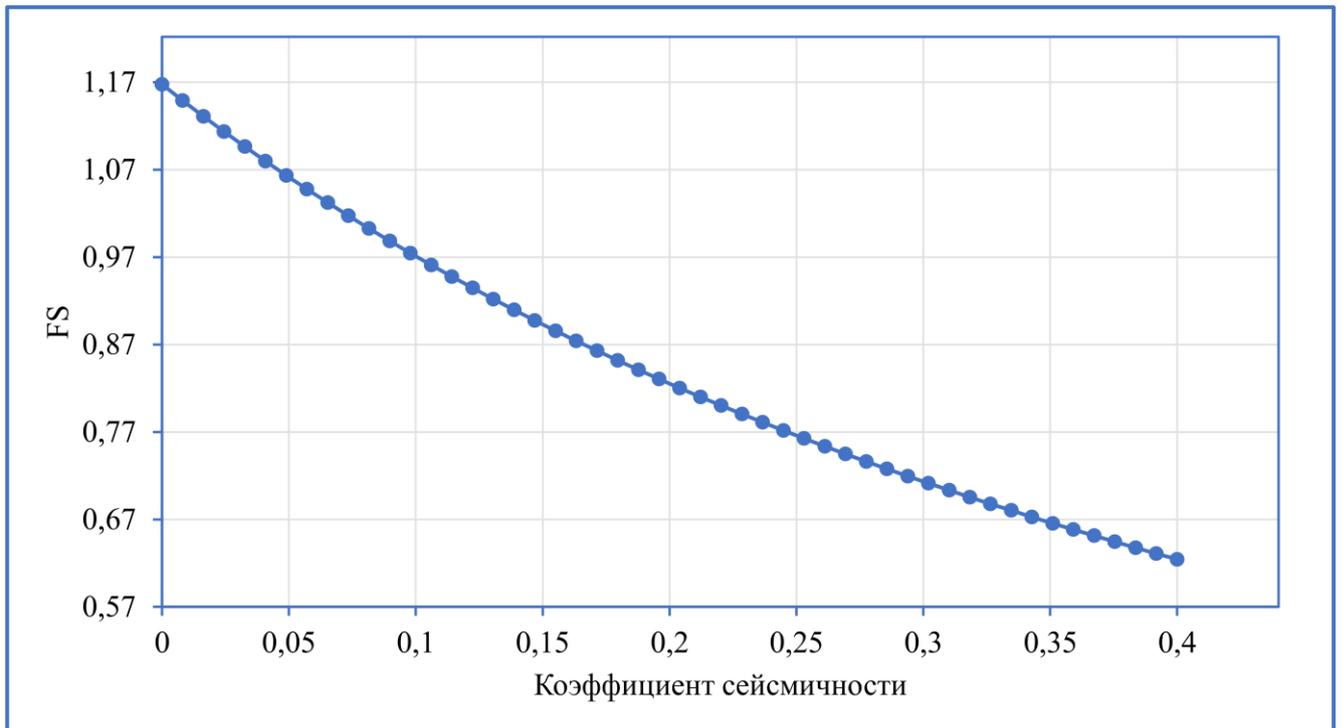
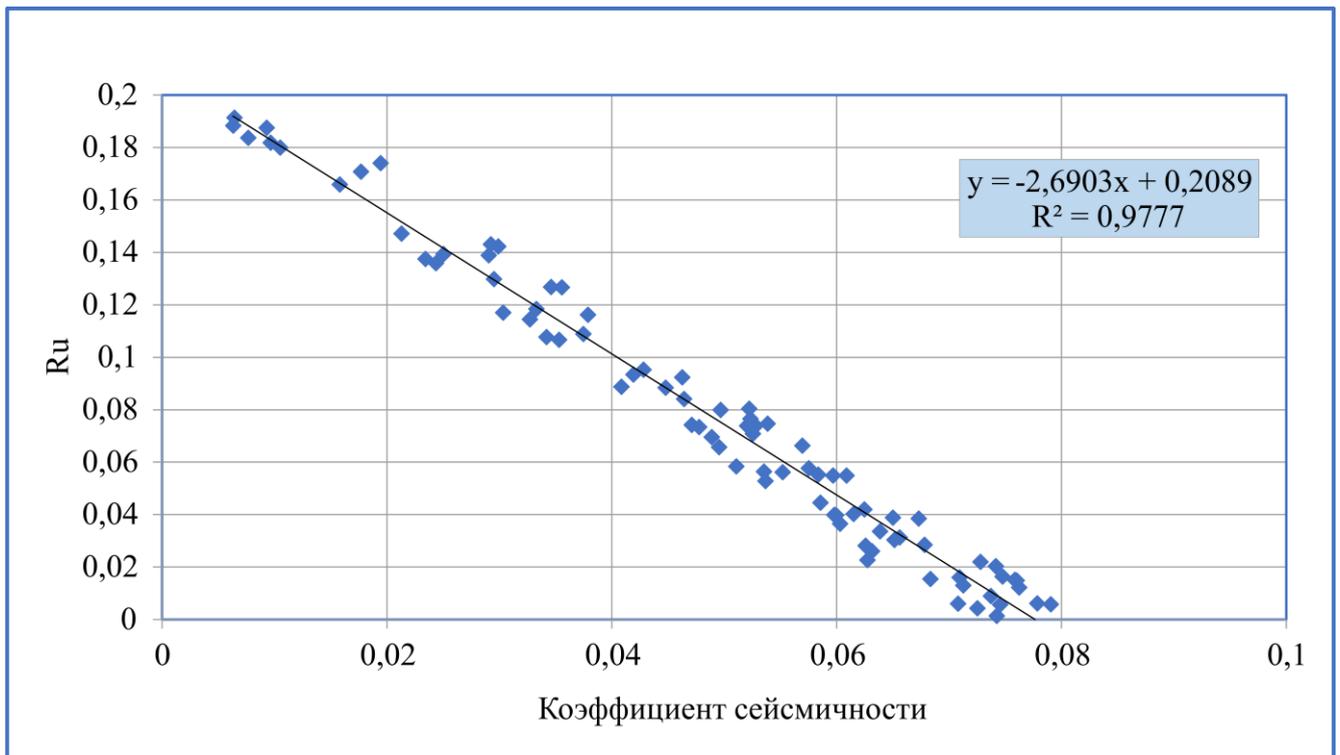


Рисунок 6.20 – Связь между значением  $FS$  и коэффициентом сейсмичности



*Рисунок 6.21 – Совместное влияние коэффициента порового давления и коэффициента сейсмичности на устойчивость склона*

Основные результаты выполненных расчетов заключаются в следующем:

1. Показано, что коэффициент устойчивости и вероятность развития оползневого процесса зависят от величины коэффициента порового давления, при этом, увеличение  $R_u$  приводит к снижению FS и увеличению PF.

2. Коэффициент устойчивости более инертен к изменению коэффициента порового давления в сравнении с вероятностью развития оползневого процесса.

3. Важнейшим показателем при оценке оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС является индекс надежности (RI). Несмотря на тот факт, что моделируемый склон в «сухой» период является устойчивым, индекс надежности данной ПТС к развитию оползневого процесса составляет 1,85 и, таким образом, уровень ее надежности следует оценивать как опасный.

### **6.3.3 Результаты расчета устойчивости склона методом конечных элементов (МКЭ)**

Моделирование МКЭ так же, как и расчеты МПР были выполнены для оценки изменения устойчивости склона, связанной с увеличением коэффициента

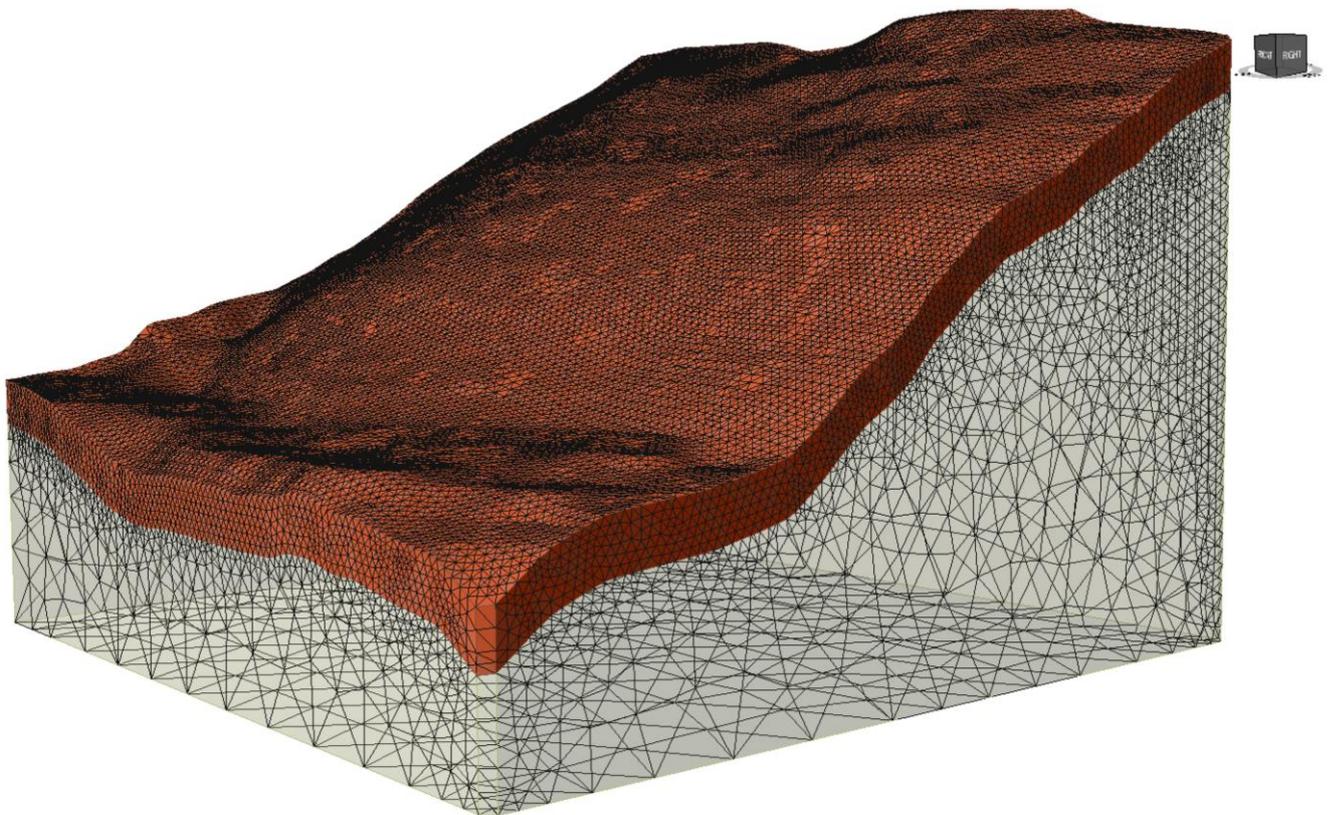
порового давления, вызванного интенсивными ливневыми осадками, с использованием тех же прочностных показателей грунтов. Аналогично расчетам МПР, моделирование осуществлялось в трех и двухмерной постановке задачи, по следующим вариантам:

- В «сухой» период (коэффициент порового давления  $R_u = 0$ ).
- В период интенсивных ливневых осадков на момент времени 14ч, 31 мая, 2020 года (коэффициент порового давления  $R_u = 0,269$ ).

С целью проверки достоверности, для плоской постановки задачи была произведена оценка влияния плотности конечноэлементной сетки на результаты моделирования.

### **Результаты расчета устойчивости склона в объемной постановке задачи**

Расчеты были выполнены с использованием градуированной тетраэдрической сетки, включающей 633472 элемента. Расчетная конечноэлементная модель представлена на Рисунок 6.22.

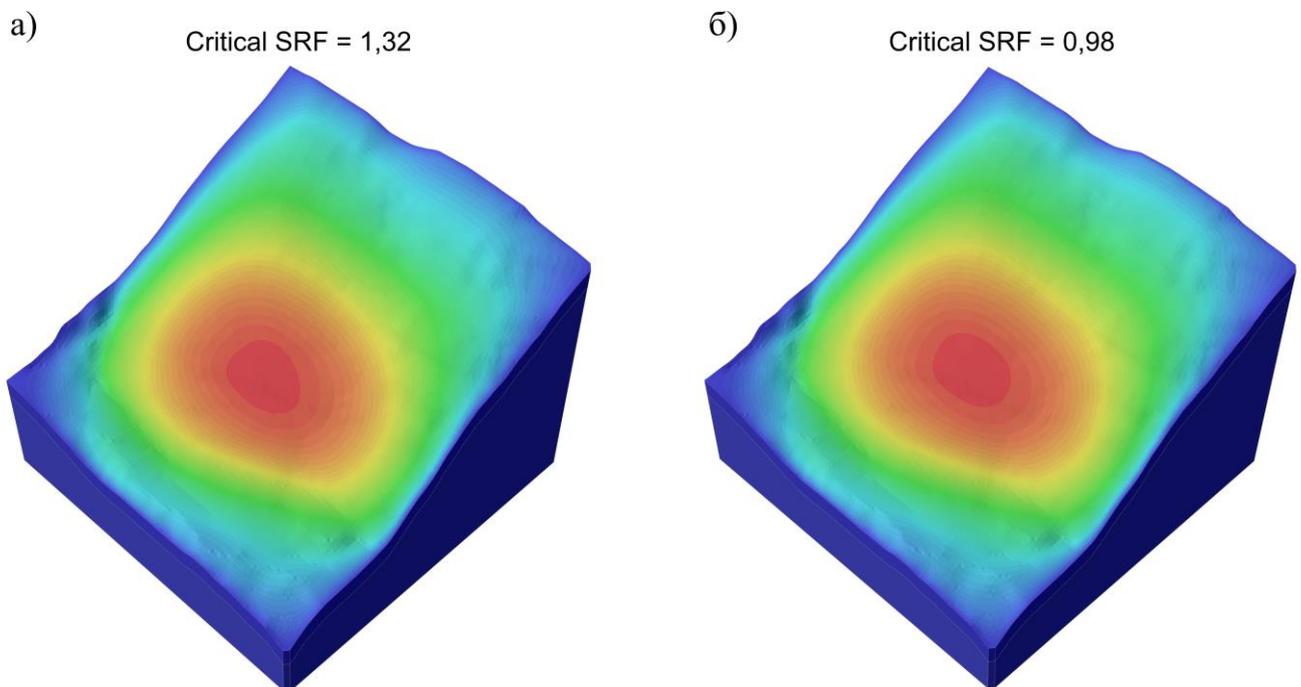


*Рисунок 6.22 – Расчетная конечноэлементная модель, включающей 633472 элемента*

Итоговая геотехническая 3D модель, с результатами оценки устойчивости в

«сухой» период приведена на Рисунок 6.23а, в период интенсивных ливневых осадков - на Рисунок 6.23б.

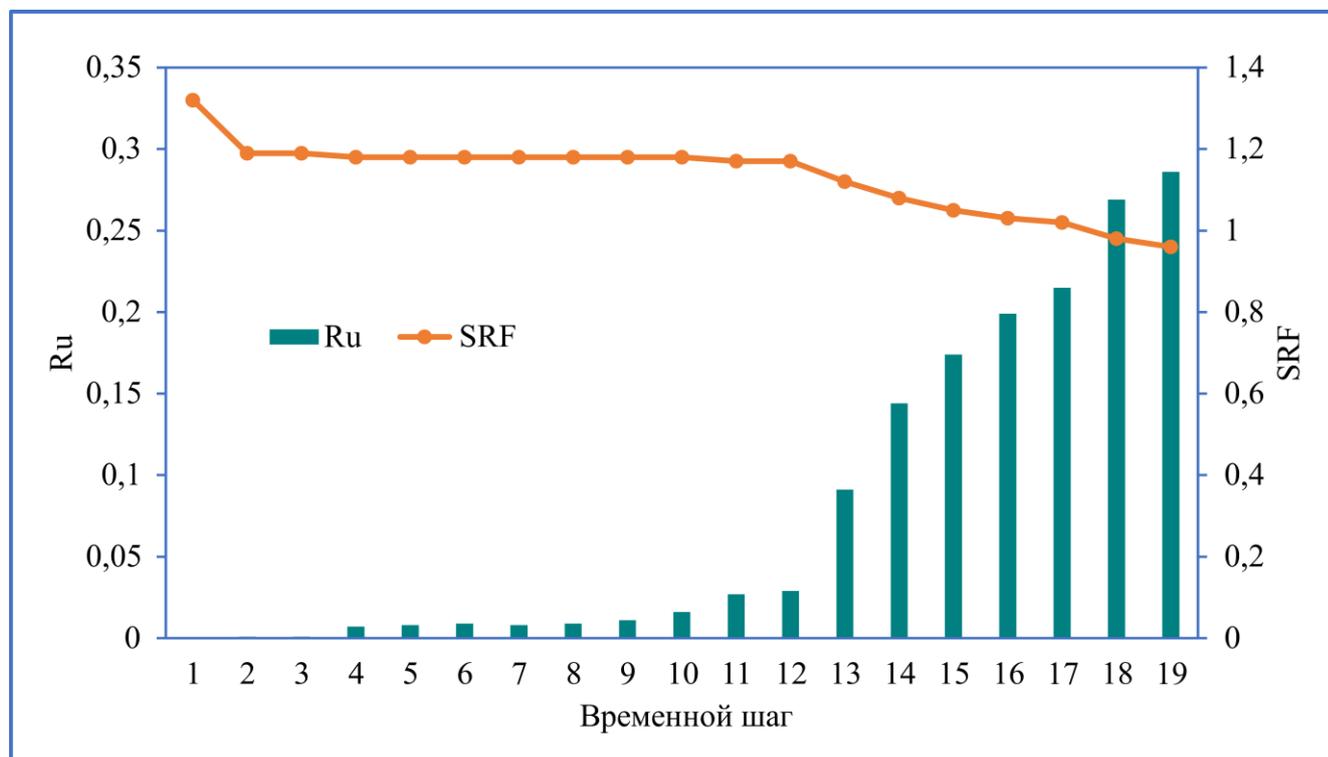
Анализ полученных результатов показал, что в «сухой» период склон является устойчивым, с критическим коэффициентом снижения прочности (SRF) - 1,32. В процессе интенсивных ливневых осадков, за счет инфильтрации воды в грунт, будет происходить увеличение порового давления, что как следствие, приведет к снижению коэффициента устойчивости склона. Выполненный расчет показал, что при увеличении  $R_u$  от 0 до 0,286 (на момент времени 15ч 31 мая, 2020г.), SRF уменьшается с 1,32 до 0,96. Кроме того, результаты анализа показали, что склон теряет устойчивость около 14 часов 31 мая (SRF – 0,98) (см. Таблица 6.3).



*Рисунок 6.23 – Результаты моделирования устойчивости склона с использованием RS3: а) в «сухой» период; б) в период интенсивных ливневых осадков на момент времени 14ч, 31 мая, 2020 года*

На Рисунок 6.24 показано изменение величины коэффициента устойчивости склона (SRF), определенного методом снижения прочности на сдвиг (SSR), в зависимости от изменения коэффициента порового давления во времени, прошедшего от начала ливневого дождя. Его анализ показывает, что наибольшее падение FS наблюдается в первые два часа от начала ливня, далее коэффициент устойчивости, в течение последующих 10 часов снижается с очень незначительным

градиентом, а затем скорость его падения снова несколько возрастает. В целом, полученные результаты хорошо согласуются с результатами МПР, хотя значения коэффициента устойчивости (SRF) в МКЭ в 1,06 раза превышают значения FS, полученный с помощью Slide3. Положение блока обрушения так же согласуется с результатами расчетов методом предельного равновесия [59].



*Рисунок 6.24 – Связь между SFR и Ru от времени, прошедшего от начала ливневого дождя*

### **Результаты расчета устойчивости склона в плоской постановке задачи**

Геотехническая модель для выполнения расчета устойчивости в плоской постановке задачи в RS2, так же, как и при расчетах МПР, была построена на основе поперечного сечения, сгенерированного из трёхмерной модели, созданной в RS3, вдоль линии смещения оползневого блока.

С целью проверки достоверности, для плоской постановки задачи была произведена оценка влияния плотности сетки на результаты моделирования с использованием однородных сеток, состоящих из 5000, 10000 и 20000 треугольных элементов [22].

Итоговые геотехнические 2D модели, с результатами оценки устойчивости

представлены:

- Для сетки, состоящей из 5000 элементов – на Рисунок 6.25а (в «сухой» период) и на Рисунок 6.25б (в период интенсивных ливневых осадков, на момент времени 14ч, 31 Мая);

- Для сетки, состоящей из 10000 элементов – на Рисунок 6.26а (в «сухой» период) и на Рисунок 6.26б (в период интенсивных ливневых осадков, на момент времени 14ч, 31 Мая);

- Для сетки, состоящей из 20000 элементов – на Рисунок 6.27а (в «сухой» период) и на Рисунок 6.27б (в период интенсивных ливневых осадков, на момент времени 14ч, 31 Мая).

В процессе выполненного в RS2 моделирования, аналогично расчетам МПР и RS3, была получена зависимость снижения коэффициента устойчивости от времени длительности ливневых осадков. Данная взаимосвязь была установлена с учетом плотности конечноэлементных сеток. Полученные результаты представлены:

- Для сетки, состоящей из 5000 элементов – на Рисунок 6.28;

- Для сетки, состоящей из 10000 элементов - на Рисунок 6.29;

- Для сетки, состоящей из 20000 элементов - на Рисунок 6.30.

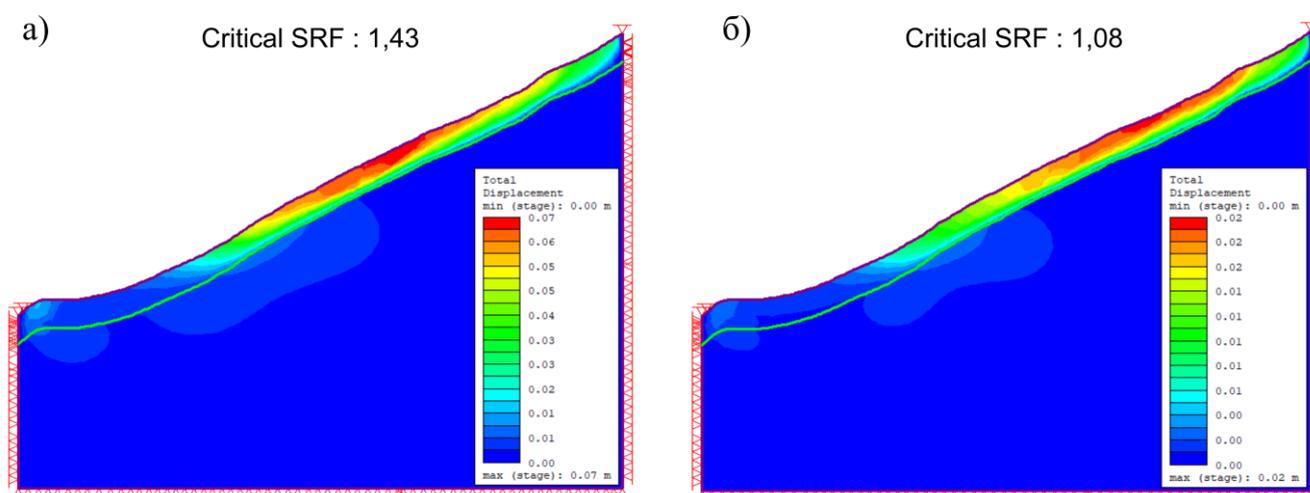


Рисунок 6.25 – Результат анализа устойчивости склона с использованием RS2 в сухом сезоне (а) и в 14ч, 31 Мая (б) (Сетка 5000 элементов)

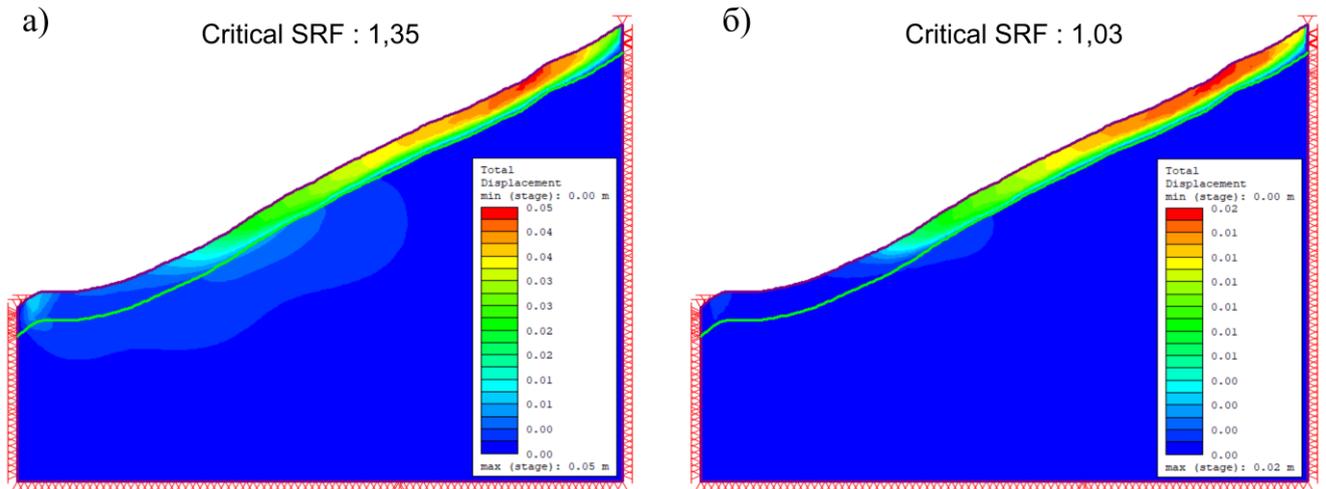


Рисунок 6.26 – Результат анализа устойчивости склона с использованием RS2 в сухом сезоне (а) и в 14ч, 31 Мая (б) (Сетка 10000 элементов)

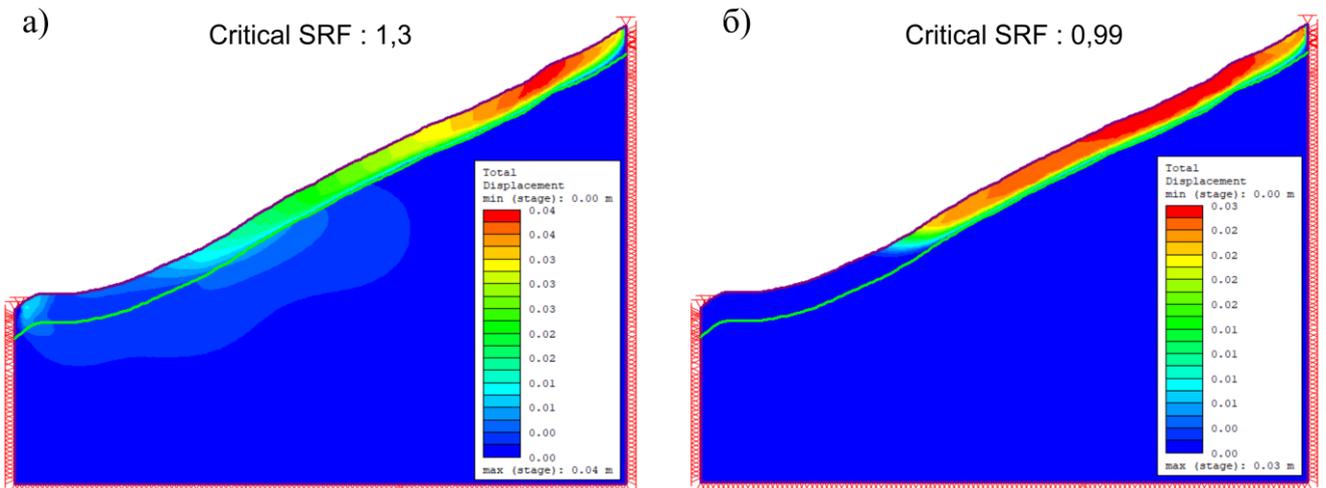


Рисунок 6.27 – Результат анализа устойчивости склона с использованием RS2 в сухом сезоне (а) и в 14ч, 31 Мая (б) (Сетка 20000 элементов)

Анализ полученных моделей показал существенное влияние плотности сетки на результаты расчетов. В частности, при плотности сеток с 5000 и 10000 элементами, не смотря на консервативность 2D моделирования, для сухого периода, были получены более высокие значения SRF (1,43 и 1,35 соответственно), чем при моделировании в RS3 (SRF – 1,32). И только с использованием сетки в 20000 элементов было получено более низкое значение коэффициента устойчивости (SRF – 1,3) в сравнении с 3D расчетами.

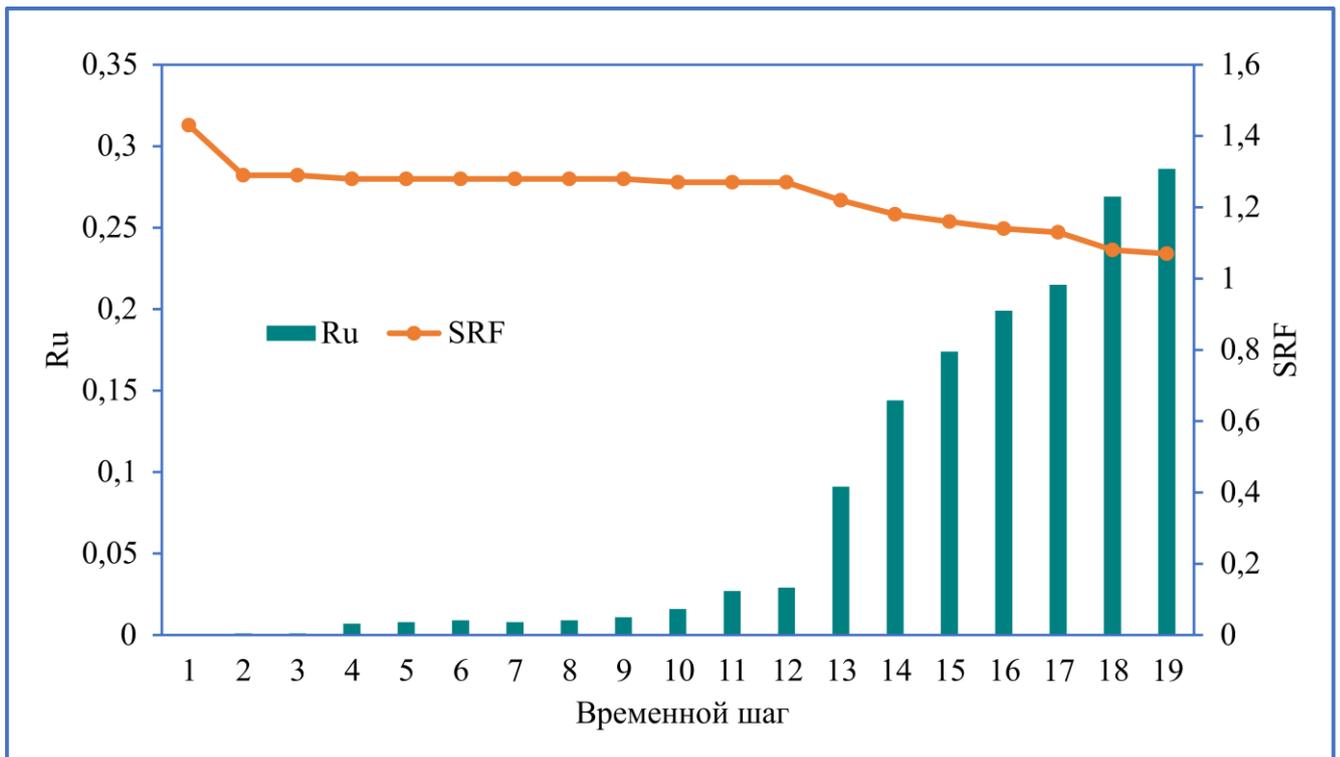


Рисунок 6.28 – Связь между SRF и коэффициентом Ru (Сетка 5000 элементов)

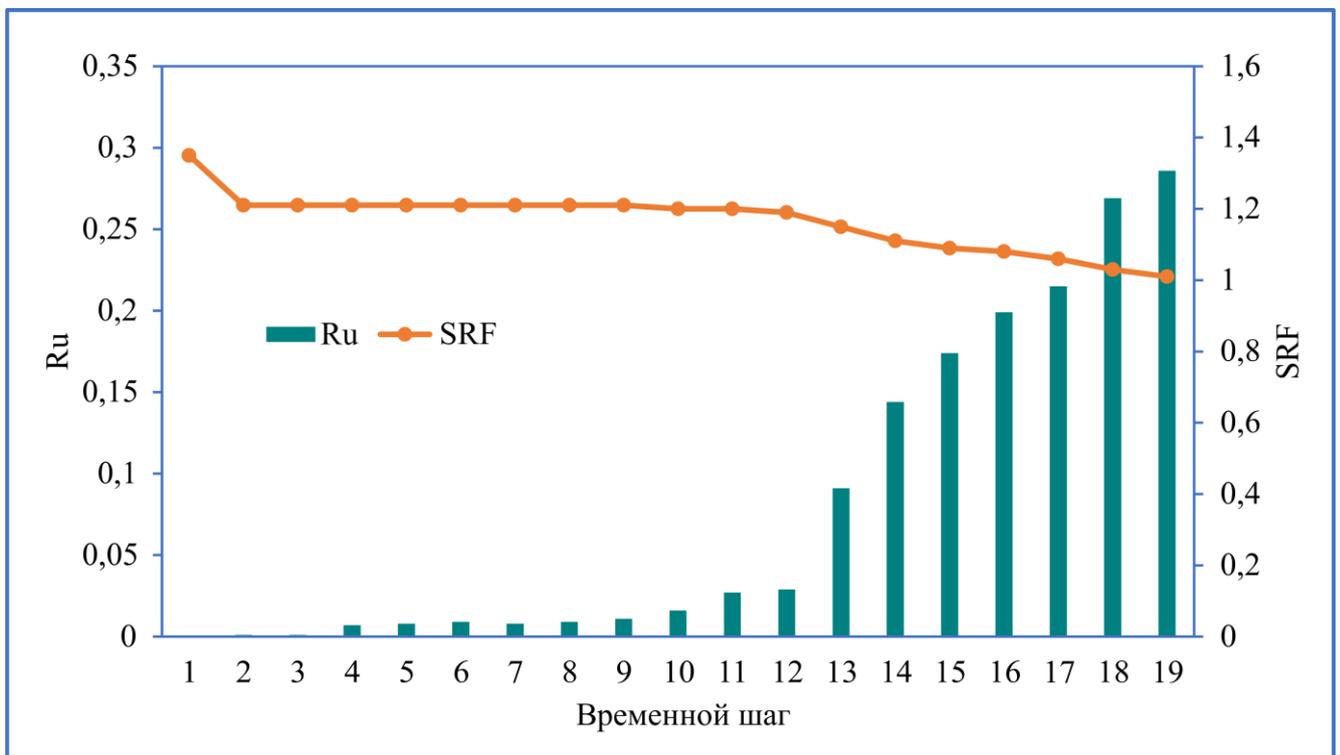


Рисунок 6.29 – Связь между SRF и коэффициентом Ru (Сетка 10000 элементов)

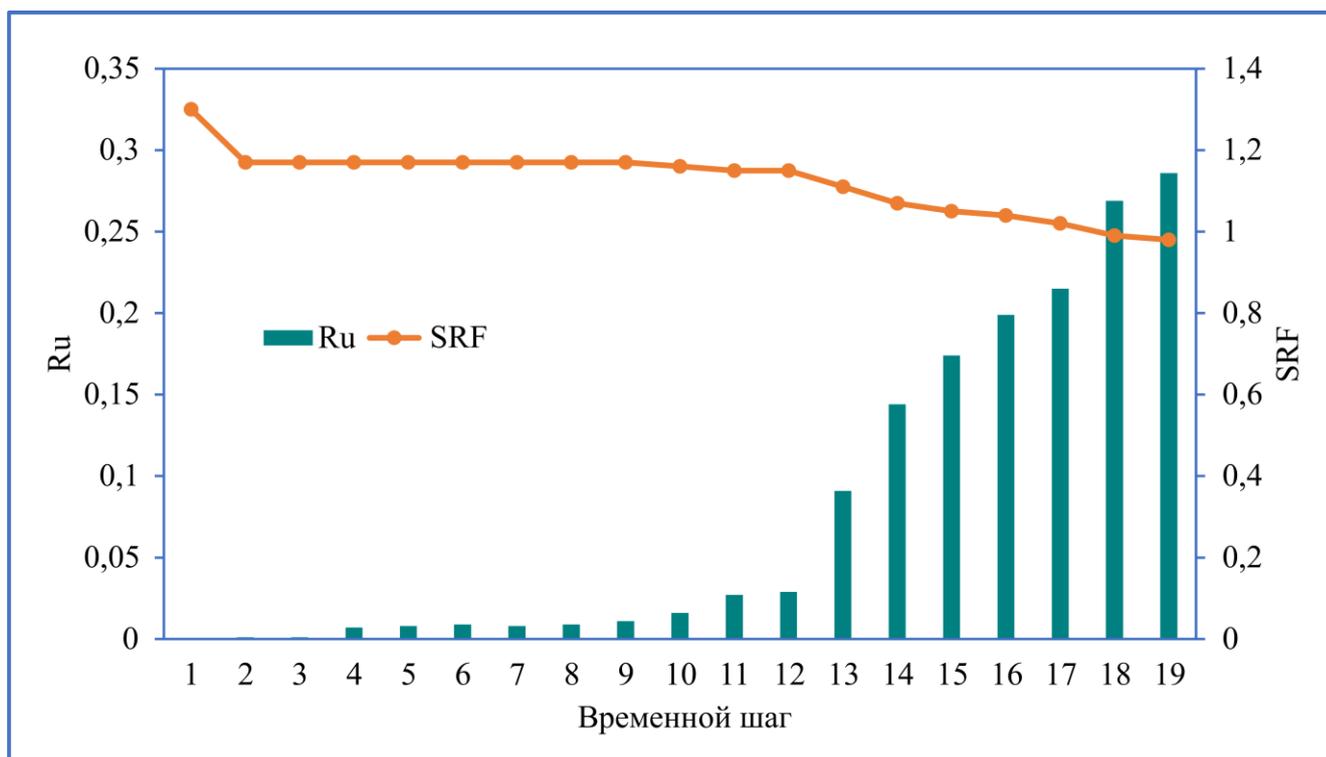


Рисунок 6.30 – Связь между SRF и коэффициентом Ru (Сетка 20000 элементов)

В случае расчетов в период ливневых осадков, полученные результаты оказались еще более критичными. При плотности сеток с 5000 и 10000 элементами, склон сохранил устойчивость на весь период времени выпадения ливневых осадков (минимальные значения SRF – 1,07 и 1,01 соответственно). При этом, расчет на сетке плотностью в 20000 элементов показал, что склон потерял устойчивость около 14ч 31 мая (SRF – 0,99), что хорошо согласуется с расчетом, выполненным в RS3.

На Рисунок 6.31 приведен обобщенный график влияния плотности элементов сетки на коэффициент устойчивости (SRF). Он показывает квазилинейную зависимость, с тенденцией к выполаживанию при увеличении плотности, между этими двумя параметрами. Выполненный анализ показал, что плотность конечноэлементной сетки является важным фактором, влияющим на результаты моделирования устойчивости склонов и без ее обоснования расчеты МКЭ не могут считаться достоверными. Как альтернативный вариант, рекомендуется использовать адаптивный метод конечных элементов (AFEM).

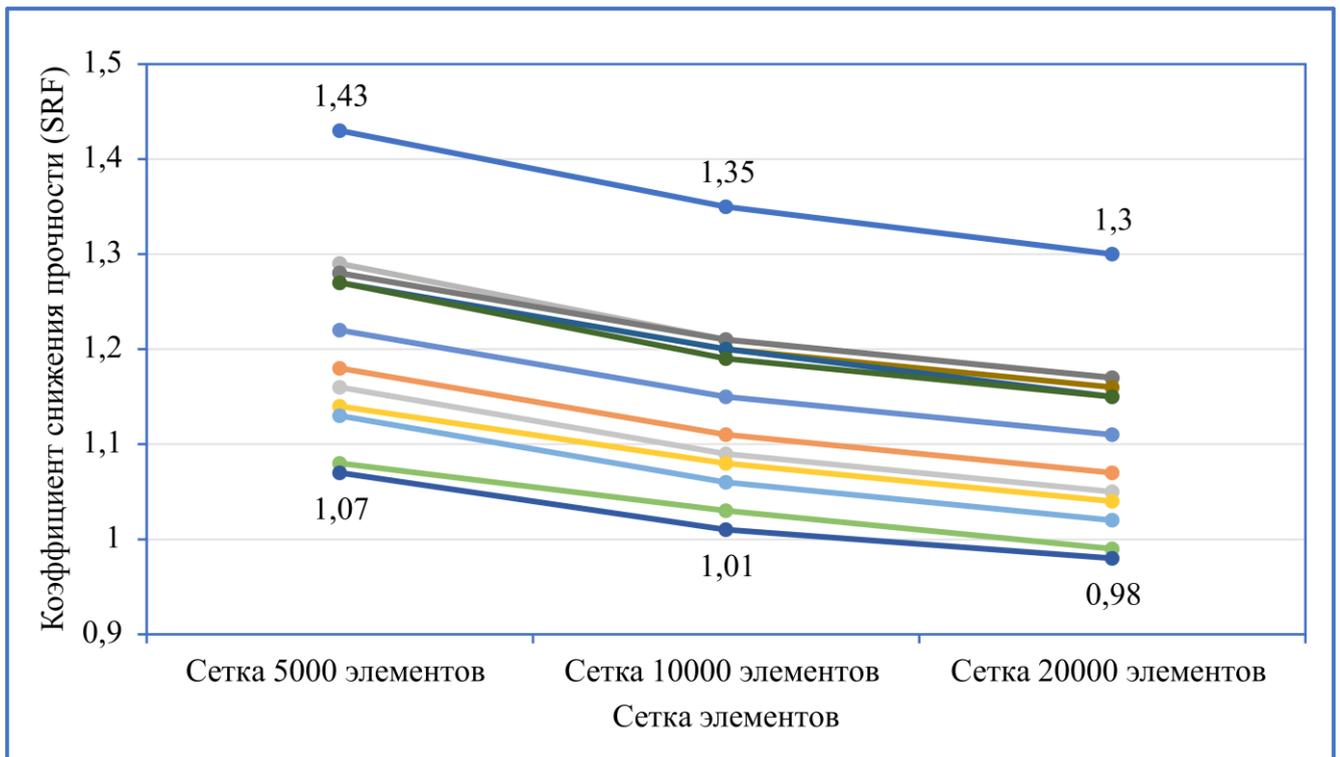


Рисунок 6.31 – Связь между изменением  $SRF$  и сеткой элементов

Полученные в процессе расчётов МКЭ результаты обобщены в Таблица 6.2.

Таблица 6.3 – Обобщенные результаты моделирования устойчивости склона, полученные с использованием МКЭ

Шаг	Время (ч)	$R_u$	RS3	RS2		
			SRF	Сетка 5000 элементов	Сетка 10000 элементов	Сетка 20000 элементов
				SRF	SRF	SRF
1		0	1,32	1,43	1,35	1,30
2	22	0,001	1,19	1,29	1,21	1,17
3	23	0,001	1,19	1,29	1,21	1,17
4	0	0,007	1,18	1,28	1,21	1,17
5	1	0,008	1,18	1,28	1,21	1,17
6	2	0,009	1,18	1,28	1,21	1,17
7	3	0,008	1,18	1,28	1,21	1,17
8	4	0,009	1,18	1,28	1,21	1,17
9	5	0,011	1,18	1,28	1,21	1,17
10	6	0,016	1,18	1,27	1,20	1,16
11	7	0,027	1,17	1,27	1,20	1,15

12	8	0,029	1,17	1,27	1,19	1,15
13	9	0,091	1,12	1,22	1,15	1,11
14	10	0,144	1,08	1,18	1,11	1,07
15	11	0,174	1,05	1,16	1,09	1,05
16	12	0,199	1,03	1,14	1,08	1,04
17	13	0,215	1,02	1,13	1,06	1,02
18	14	0,269	0,98	1,08	1,03	0,99
19	15	0,286	0,96	1,07	1,01	0,98

### **Выводы**

Оценка оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС, из-за своей большей конкретности, имеет наибольшее практическое значение. Она, как правило, осуществляется комплексом методов и глубже оценивает природу и механизм оползневой процесса.

В этой главе представлены результаты оценки оползневой опасности ПТС элементарного уровня, полученные на основе обратных расчетов устойчивости оползневой склона в коммуне Чунгчай района Шапа.

Расчеты устойчивости были выполнены с использованием комплекса методов предельного равновесия и конечных элементов как в плоской, так и в объемной постановке задачи.

Моделирование осуществлялось по следующим вариантам:

- В «сухой» период (коэффициент порового давления  $R_u = 0$ )
- В период интенсивных ливневых осадков.

Сравнение результатов расчетов, полученных разными методами по различным схемам представлено в виде графиков на Рисунок 6.32, а оценка разницы вычислений коэффициента устойчивости – в Таблица 6.4.

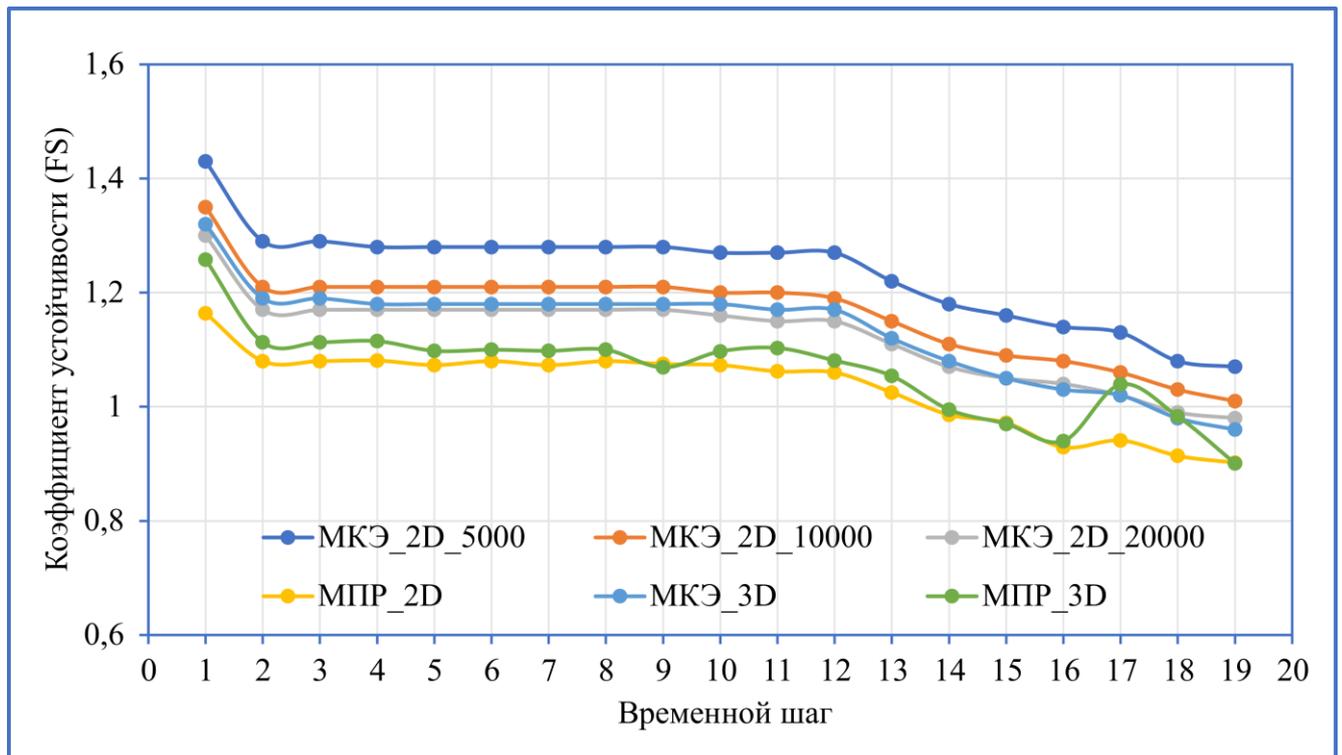


Рисунок 6.32 – Сравнение результатов расчетов, полученных с использованием МПР и МКЭ

Таблица 6.4 – Разница между значениями коэффициента

Сравнение	Средняя разница между значениями FS (%)	Мин-макс разница между значениями FS (%)
МКЭ 3D и МПР 3D	6,03	-1,86 – 9,41
МКЭ 2D (5000 элементов) и МПР 2D	16,30	15,37 – 18,6
МКЭ 2D (10000 элементов) и МПР 2D	11,28	10,58 – 13,78
МКЭ 2D (20000 элементов) и МПР 2D	8,08	7,43 – 10,67
МКЭ 2D (5000 элементов) и МКЭ 3D	8,31	7,09 – 10,28
МКЭ 2D (10000 элементов) и МКЭ 3D	2,81	1,65 – 4,95
МКЭ 2D (20000 элементов) и МКЭ 3D	-0,69	-1,74 – 2,04
МПР 3D и МПР 2D	2,78	-0,56 – 9,43
	0,09	-3,35 – 3,69

Анализ полученных моделей показал, что несмотря на некоторую неопределенность результатов, связанную как с используемыми методами расчета, можно заметить некоторые закономерности:

- Коэффициент устойчивости и вероятность развития оползневого процесса зависят от величины коэффициента порового давления, при этом, увеличение  $R_u$

приводит к снижению FS и увеличению PF.

- Коэффициент устойчивости более инертен к изменению коэффициента порового давления в сравнении с вероятностью развития оползневого процесса.

- Важнейшим показателем при оценке оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС является индекс надежности (RI). Несмотря на тот факт, что моделируемый склон в «сухой» период является устойчивым, индекс надежности данной ПТС к развитию оползневого процесса составляет 1,85 и, таким образом, уровень ее надежности следует оценивать как опасный.

- Совместный учет сейсмического воздействия и ливневых осадков на устойчивость склона показал, что землетрясение со значением коэффициента горизонтального пикового ускорения  $k_{eq}$  более 0,08 или возрастание коэффициента порового давления  $R_u$  вследствие осадков до значения 0,23 могут привести к развитию оползня на исследуемом склоне. При высоком значении  $R_u$  даже незначительное землетрясение может стать причиной активизации оползневого процесса.

- При моделировании МКЭ были получены более высокие значения SRF, в сравнении со значениями FS, полученные МПР.

- При объемном моделировании разница в значениях коэффициента устойчивости, полученная МПР и МКЭ составила 6,03%. При 2D-расчетах разница в значениях коэффициента устойчивости, полученного методом конечных элементов, с различной плотностью сетки и методом предельного равновесия составила 16,3% (для сетки, состоящей из 5000 элементов), 11,28% (для сетки, состоящей из 10000 элементов) и 8,08% (для сетки, состоящей из 20000 элементов). Во всех случаях разница в значениях коэффициента устойчивости при 3D-анализе оказалась ниже, чем при 2D-анализе. Так же, следует отметить, что увеличение плотности сетки в 2D расчётах МКЭ уменьшает разницу результатов в сравнении с 2D расчетами МПР.

- Сравнение результатов 3D и 2D моделирования с различной плотностью сетки методом конечных элементов, показало, что разница в значениях SRF составило 8,31 (для сетки, состоящей из 5000 элементов), 2,81 (для сетки,

состоящей из 10000 элементов) и -0,69% (для сетки, состоящей из 20000 элементов). Таким образом, увеличение плотности сетки в 2D уменьшает разницу результатов в сравнении с 3D расчетами.

- Разница в значениях FS между 2D и 3D расчетами с использованием метода предельного равновесия составляет 2,78% (вероятностный анализ) и 0,09% (детерминистический анализ), что указывает на меньшую неопределенность результатов метода МПР в сравнении с МКЭ.

Вышеизложенное позволяет сформулировать четвертое защищаемое положение:

***В основе оценки оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС лежит математическое моделирование устойчивости склона, с учетом механизма оползневого процесса и количественной оценкой влияния факторов оползнеобразования. Оптимальным подходом для решения этой задачи является комплексное применение геотехнических методов (методов предельного равновесия в сочетании с численными методами), дополненных вероятностным анализом.***

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа является научным обобщением теоретических и методологических исследований автора. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. При оценке опасности оползневые процессы целесообразно рассматривать как компоненты природно-технических систем с учетом их иерархии.

2. Исследование оползнеобразующих факторов и выявление взаимосвязей между ними дает возможность построить модель оценки оползневой опасности. В качестве основных факторов-условий, влияющих на оползневую опасность в районе Шапа, были определены следующие:

- Климатические условия
- Гидрография
- Геоморфологические условия
- Растительный покров
- Техногенные воздействия
- Особенности геологического строения и структурно-тектонические особенности
- Сейсмическая активность
- Особенности гидрогеологических условий
- Современные экзогенные процессы.

3. Все методы оценки оползневой опасности имеют свои ограничения в использовании. По этой причине при использовании того или иного метода всегда требуется анализ его применимости для решения конкретной задачи. Эффективный подход к оценке оползневой опасности должен базироваться на комплексном применении современных методов, основанных на разных принципах, с учетом уровня иерархии ПТС, в том числе: масштаба анализа, состава и значимости учитываемых факторов, качества и типа исходной информации, а также допустимом уровне достоверности результатов исследования.

4. На примере района Шапа провинции Лаокай (северо-запад Вьетнама)

апробирована методика оценки оползневой опасности ПТС регионального уровня с использованием ГИС, базирующейся на совместном анализе результатов комплекса статистических методов (частотного анализа, статистического индекса, анализа оползневой восприимчивости), а также основанного на мультикритериальном подходе, методе анализа иерархий. Выполненный на основе AUC ROC (площадь под кривой ошибок) анализ показал высокую достоверность всех трех используемых статистических моделей, превышающую 75%, что позволило сформулировать следующее утверждение: *оптимальным подходом для решения этой задачи является применение методов с использованием ГИС, базирующихся на совместном анализе результатов комплекса количественных статистических методов с обязательной валидацией моделей путем сравнения полученных карт оползневой опасности с картой инвентаризации оползней.*

Дополнительно была показана большая достоверность количественных статистических методов в сравнении с полуколичественным методом анализа иерархий. Так же выполнена оценка влияния разрешения ЦМР и набора факторов оползнеобразования на достоверность оценки оползневой опасности.

5. На примере коммуны Чунгчай (район Шапа провинции Лаокай), апробирована методика оценки оползневой опасности ПТС локального уровня с применением детерминистического подхода, основанного на вычислении коэффициента устойчивости, с последующим анализом результатов в геоинформационной системе. Локальный уровень ПТС при оценке оползневой опасности характеризуется подобием инженерно-геологических условий территории, причинами возникновения, а следовательно, типом и механизмом развития процесса, представляющего опасность для технического объекта, рассматриваемого как система структурно взаимосвязанных элементов, образующих единое целое. В процессе моделирования была выполнена количественная оценка влияния на устойчивость атмосферных осадков и сейсмического воздействия. С этой целью было проведено шесть различных вариантов расчета.

Анализ полученных результатов позволил:

- Доказать тезис о том, что интенсивные осадки увеличивают опасность возникновения оползней.

- Количественно определить связь между площадью устойчивой/неустойчивой зоны и величиной псевдостатического коэффициента сейсмичности ( $k_{eq}$ ).

- Показать синергетический эффект от совместного воздействия землетрясения и осадков на степень оползневой опасности.

- Оценить динамику изменение площади неустойчивой зоны в зависимости от длительности ливневых осадков, в том числе с учетом интенсивности сейсмического воздействия.

Достоверность результатов была оценена на основе индекса подтверждения ( $\%LR_{class}$ ), который составил 64,19%, что позволяет сделать вывод об их удовлетворительной эффективности и сформулировать следующее утверждение: ***оптимальным подходом для оценки оползневой опасности на локальном уровне иерархии ПТС является применение детерминистического подхода, основанного на вычислении коэффициента устойчивости с последующим анализом результатов в геоинформационной системе.***

6. На примере обратных расчетов устойчивости оползневого склона в коммуне Чунгчай района Шапа, апробирована методика оценки оползневой опасности ПТС элементарного уровня. Расчеты устойчивости были выполнены с использованием комплекса методов предельного равновесия и конечных элементов как в плоской, так и в объемной постановке задачи. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- Коэффициент устойчивости (FS) и вероятность развития оползневого процесса (PF) зависят от величины коэффициента порового давления, при этом, увеличение  $R_u$  приводит к снижению FS и увеличению PF.

- Коэффициент устойчивости более инертен к изменению коэффициента порового давления в сравнении с вероятностью развития оползневого процесса.

- Важнейшим показателем при оценке оползневой опасности на

элементарном уровне иерархии ПТС является индекс надежности (RI). Несмотря на тот факт, что моделируемый склон в «сухой» период является устойчивым, индекс надежности данной ПТС к развитию оползневому процессу составляет 1,85 и, таким образом, уровень ее надежности следует оценивать как опасный.

- Совместный учет сейсмического воздействия и ливневых осадков на устойчивость склона показал, что землетрясение со значением коэффициента горизонтального пикового ускорения  $k_{eq}$  более 0,08 или возрастание коэффициента порового давления  $R_u$  вследствие осадков до значения 0,23 могут привести к развитию оползня на исследуемом склоне. При высоком значении  $R_u$  даже незначительное землетрясение может стать причиной активизации оползневому процессу.

- При моделировании МКЭ были получены более высокие значения SRF, в сравнении со значениями FS, полученными МПР.

- При объемном моделировании разница в значениях коэффициента устойчивости, полученная МПР и МКЭ составила 6,03%. При 2D-расчетах разница в значениях коэффициента устойчивости, полученного методом конечных элементов, с различной плотностью сетки и методом предельного равновесия составила 16,3% (для сетки, состоящей из 5000 элементов), 11,28% (для сетки, состоящей из 10000 элементов) и 8,08% (для сетки, состоящей из 20000 элементов). Во всех случаях разница в значениях коэффициента устойчивости при 3D-анализе оказалась ниже, чем при 2D-анализе. Так же, следует отметить, что увеличение плотности сетки в 2D расчётах МКЭ уменьшает разницу результатов в сравнении с 2D расчетами МПР.

- Сравнение результатов 3D и 2D моделирования с различной плотностью сетки методом конечных элементов показало, что разница в значениях SRF составило 8,31% (для сетки, состоящей из 5000 элементов), 2,81% (для сетки, состоящей из 10000 элементов) и -0,69% (для сетки, состоящей из 20000 элементов). Таким образом, увеличение плотности сетки в 2D уменьшает разницу результатов в сравнении с 3D расчетами.

- Разница в значениях FS между 2D и 3D расчетами с использованием метода

предельного равновесия составляет 2,78% (вероятностный анализ) и 0,09% (детерминистический анализ), что указывает на меньшую неопределенность результатов метода МПР в сравнении с МКЭ.

Результаты выполненных исследований позволили сформулировать следующее утверждение: *оптимальным подходом для оценки оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС является комплексное применение геотехнических методов (методов предельного равновесия в сочетании с численными методами), дополненных вероятностным анализом.*

### **7. Направление дальнейших исследований**

Разработка мер по минимизации ущерба от развития и активизации оползневой процесса является важнейшим компонентом по уменьшению последствий стихийных бедствий.

Научно – обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды естественных и искусственных взаимодействий и составление на этой основе оценки оползневой опасности даёт возможность правильно спланировать мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных природно-технических систем, обосновать пространственно – временную структуру мониторинга ПТС, разработать эффективную систему раннего предупреждения.

Создание систем раннего предупреждения оползневой процесса (СРПОП) является общемировой тенденцией, однако эффективность этих систем часто вызывает вопросы.

Краеугольными камнями систем оползневой раннего предупреждения являются: оценка оползневой опасности; мониторинг и анализ информации. Прогноз оползневой опасности должен предоставлять качественную информацию о характеристиках оползневой процесса, таких как местоположение, время и величина потенциально опасного события, вероятность его реализации. Мониторинг должен быть направлен на наблюдение и непрерывный сбор топографических, геологических (включая сейсмические), гидрологических и климатических данных. Анализ информации должен обеспечивать эффективную

обработку данных для создания постоянно действующей прогнозной модели оползневой опасности, позволяющей разработать систему управления оползневыми рисками. По мнению автора, эффективная СРПОП должна основываться на иерархии ПТС.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Акад. К. Н. Паффенгольц (отв. ред.) и др., 1973. Геологический словарь. Том 2. 456 с. Недра, Москва.
2. Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н., 2004. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. 352 с. Финансовый издательский дом "Деловой экспресс", Москва.
3. Белый Л. Д., Попов В. В., 1975. Инженерная геология. - 312 с. Стройиздат, Москва.
4. Бондарик Г. К., 1981. Общая теория инженерной (физической) геологии. 256 с. Недра, Москва.
5. Бондарик Г. К., Пендин В. В., Ярг Л. А., 2007. Инженерная геодинамика. 327 с. КДУ, Москва.
6. Бондарик Г. К., Ярг Л. А., 2015. Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии. 296 с. КДУ, Москва.
7. Бондарик Г. К., Ярг Л. А., 2018. Инженерно-геологические изыскания. КДУ, Добросвет, Москва.
8. Варнс Д. Дж., 1981. Движение склонов, типы и процессы. Оползни Исследование и Укрепление / пер с англ А А Варги и Р Р Тизделя / Под ред Г С Золотарева. Мир, Москва. с. 32-85.
9. Ву К. М., 1996. Исследование по прогнозам оползней и селей в Лайчау и мер борьбы (На вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), Ханой.
10. Ву К. М., 2000. Исследование оползней во Вьетнаме (На вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), Ханой.
11. Григоренко А. Г., Кюнтцель В. В., Новак В. Е., Тамутис З. П., 1992. Инженерная геодинамика. 296 с. Лыбидь, Киев.
12. Гулакян К. А., Кюнтцель В. В., Постоев Г. П., 1977. Прогнозирование оползневых процессов. 135 с. Недра, Москва.

13. Емельянова Е.П., 1971. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней. 104 с. Недра, Москва.
14. Емельянова Е.П., 1972. Основные закономерности оползневых процессов. 308 с. Недра, Москва.
15. Зеркаль О. В., 2021. Оползни скольжения и оползни сдвига: особенности развития и типизация. Инженерная геология, Том XVI, № 1, с. 38–58. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-1-38-58>
16. Зеркаль О. В., Фоменко И. К., 2016. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов. Инженерная геология, № 1, с. 16-21.
17. Золотарев Г. С., 1983. Инженерная геодинамика. 328 с. Издательство МГУ, Москва.
18. Зыонг В. Б., Фоменко И. К., Ву Х. Д., et al., 2021. Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геоинформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама). Инженерная геология, Т. XVI, № 2, с. 6-20. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20>
19. Зыонг В. Б., Фоменко И. К., Ву Х. Д., Сироткина О. Н. Оценка оползневой восприимчивости в районе Батсат провинции Лаокай с применением метода соотношения частотностей. X Международная научная конференция молодых ученых «Молодые - Научкам о Земле», Москва, 2022, Том 5, с. 133-137. Издательство МГРИ.
20. Зыонг В. Б., Фоменко И. К., Нгуен З. Ф., et al., 2022. Локальная оценка оползневой опасности с использованием Scoops3D на примере территории коммуны Чунгчай (Шапа, Вьетнам). Инженерная геология, Том XVII, № 1, с. 34–47. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-1-34-47>
21. Зыонг В. Б., Фоменко И. К., Нгуен Ч. К., et al., 2022. Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам. Известия Томского политехнического университета Инжиниринг георесурсов, Т. 333, № 4, с. 126-140. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473>

22. Зыонг В. Б., Фоменко И. К., Нгуен Ч. К., et al., 2022. Анализ устойчивости склона под воздействием осадков с использованием метода конечных элементов: на примере коммуны Чунгчай (Шапа Вьетнам). Инновации в геологии, геофизике и географии-2022, Севастополь, 2022, с. 67-68. Издательство Перо Москва, Москва.
23. Зыонг М. Х., Фоменко И. К., Пендин В. В., 2013. Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг-Кам Фа на севере-востоке Вьетнама. Инженерная геология, № 1, с. 46-54.
24. Иванов И. П., Тржцинский Ю. Б., 2001. Инженерная геодинамика. 416 с. Наука, Санкт-Петербург.
25. Кривогуз Д. О., 2018. Методические подходы к пространственному региональному анализу устойчивости территории к склоновым процессам. ГЕОИНФОРМАТИКА, №2, с. 20-26.
26. Кургузов К. В., 2019. Стохастическое моделирование литотехнических систем, в диссертации ... кандидата Геолого-минералогических наук: 25.00.08. МГРИ, Москва.
27. Кюнцель В. В., 1980. Закономерности оползневой опасности на европейской территории СССР и его региональный прогноз. Недр, Москва.
28. Ле К. Х., 2014. Исследование, оценка и рфйонирование оползневой опасности в горных районах Вьетнама. Фаза 1: Исследование и создание текущей карты оползней 1:50000 в горном районе провинции Лаокай. Отчёт о НИР (на вьетнамском языке). Вьетнамский институт наук о Земле и минеральных ресурсах, Ханой.
29. Ле Т. Ш., 2000. Очаговый механизм землетрясений Та Хоа, Лай Чау и Муонг Луан на северо-западе Вьетнама (на вьетнамском языке). Журнал наук о Земле, Т. 22, № 4, с. 355-360.
30. Ле Т. Ш., 2012. Исследование предсказанного индуцированного землетрясения в окрестностях озера Шонла. Государственный проект в области науки и техники DTDL.2009T/09, отчет о НИР, (на вьетнамском языке). Институт геофизики, Ханой.
31. Ломтадзе В. Д., 1977. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. 480 с. Недр, Ленинград.

32. Ломтадзе В. Д. Словарь по инженерной геологии. СПб: Изд. СПбГИ, 360 с., 1999.
33. Маслов Н. Н., 1982. Основы инженерной геологии и механики грунтов. 511 с. Высшая школа, Москва.
34. Маций С. И., 2010. Противооползневая защита и управление риском, в диссертации ... доктора технических наук : 05.23.11. Кубанский государственный аграрный университет, Волгоград.
35. Нгуен В. Х., Ынг К. К., 2011. Модель инфильтрации дождевой воды для анализа устойчивости склона в районе Кокпай уезда Синман, провинция Хазьанг (На вьетнамском языке). Журнал наук о Земле, Т. 33, № 1, с. 78-84.
36. Нгуен К. Т., 2008. Исследование по созданию противооползневой системы в ключевых районах (район Хоа Бинь). Отчет о НИР (На вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), Ханой.
37. Нгуен К. Т. и др., 2015. Дополнительные исследования, создание и публикация карт стихийных бедствий материка Вьетнама на основе результатов исследований с 2000 г. по настоящее время. Государственный проект, отчет о НИР, (на вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), Ханой.
38. Нгуен К. Х., 2016. Оценка опасности оползней в общине Намзан, уезда Симан, провинции Хазьанг (на вьетнамском языке). Научный журнал Вьетнамского национального университета, Ханой, Т. 32, № 4, с. 12-21.
39. Нгуен Н. Т., 2005. Детальное зонирование землетрясений для северо-западного Вьетнама. Государственный проект в области науки и техники КС 08-10, отчет о НИР, (на вьетнамском языке). Институт геофизики, Ханой.
40. Нгуен Н. Т., Нгуен Д. С., Нгуен Т. Т., 1993. Вызванные землетрясения в водохранилище Хоабинь (на вьетнамском языке). Журнал наук о Земле, Т. 12, № 4, с. 97-101.
41. Нгуен Т. Л., 2010. Применение геолого-географической информационной системы для оценки опасности оползней для устойчивого социально-экономического развития в районе водохранилища Шонла - Шонгда, применимое

в регионах. Мьонглай, Туатюа, Туанзяо, Мьонгте и Шинхо. Министерский проект, отчет о НИР (на вьетнамском языке). Вьетнамский институт наук о Земле и минеральных ресурсов, Ханой.

42. Нгуен Ч. Й., 1998. Изучение и оценка важных экологических инцидентов и предложение мер по предотвращению и смягчению последствий стихийных бедствий для социально-экономического развития в северо-западном регионе Вьетнама. Отчёт о НИР (на вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), Ханой.

43. Нгуен Ч. Й., 1999. Изучение и оценка важных экологических инцидентов и предложение мер по предотвращению и смягчению последствий стихийных бедствий для социально-экономического развития в регионе Тэйнгун, в северо-восточном регионе и в центральном побережье Вьетнама. Отчёт о НИР (на вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), Ханой.

44. Нгуен Ч. Й., 2006. Оценка оползней и селей в некоторых горных районах Вьетнама и рекомендации по мерам борьбы и уменьшения ущерба. Отчёт о НИР (на вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), 134 с., Ханой.

45. Нгуен Ч. К., 2018. Научно-методические основы региональной оценки риска от оползневых процессов (на примере района северо-западный Лаокай Вьетнама), в дис ... кандидата геол. минер. наук: 25.00.08. МГРИ-РГГРУ, Москва.

46. Нгуен Ч. К., Фоменко И. К., Пендин В. В., Нгуен К. Т., 2017. Применение метода анализа иерархий при региональной оценке оползневой опасности (на примере района северо-западный Лаокай, Вьетнам). Геоинформатика, № 2, с. 53-66.

47. Осипов В. И., Кутепов В. М., Зверев В. П., и др, 1999. Опасные экзогенные процессы / Под ред. Осипова В. И. 290 с. ГЕОС, Москва.

48. Пендин В. В., Фоменко И. К., 2015. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. 320 с. ЛЕНАНД, Москва.

49. Петров Н. Ф., 1988. Оползневые системы. Сложные оползни. 211 с. Штиинца, Кишинев.

50. ПНИИИС, 1984. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов. 80 с. Стройиздат, Москва.
51. Погребов Н. Ф., 1935. Сравнительная характеристика оползневых районов СССР. Труды Первого Всесоюзного оползневого совещания, Ленинград.
52. Попов И. В., 1959. Инженерная геология. 512 с. МГУ, Москва.
53. Пуанкаре А., 1983. О науке : [сборник] : перевод с французского / под ред. Л. С. Понтрягина. 560 с. Наука, Москва.
54. Рукавицын В. В., 2018. Определение устойчивости геологической среды с применением методов машинного обучения (на примере г. Москвы), в дис ... кандидата геол. минер. наук: 25.00.08. МГРИ-РГГРУ, Москва.
55. Саати Т. Л., 1993. Принятие решений - Метод анализа иерархий (Пер.с англ). Радио и связь, Москва.
56. Сергеев Е. М., 1978. Инженерная геология. 384 с. Издательство МГУ, Москва.
57. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ГОСТ Р 51898-2002 Аспекты безопасности. Москва: Стандартинформ, 8 с., 2018.
58. Фоменко И. К., 2014. Методология оценки и прогноза оползневой опасности, в дис . . . доктора геол.минер. наук: 25.00.08. МГРИ-РГГРУ, Москва.
59. Фоменко И. К., Зыюнг В. Б., Нгуен Ч. К., et al., 2022. Оценка оползневой опасности природно-технической системы элементарного уровня на примере оползневого склона в коммуне Чунгчай (Шапа, Вьетнам). ГеоРиск, Том XVI, № 1, с. 55-65. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-1-56-65>
60. Чан Т. Х., Данг В. Б., Нгуен Х., Нго В. Л., 2004. Применение ГИС и методов мультистандартной оценки при изучении оползней в Лаокай (на вьетнамском языке). Научная конференция Вьетнамского национального университета, Ханой.
61. Чан Ч. Х., 1999. Исследование и оценка геологических опасностей на территории Вьетнама и рекомендации по мерам борьбы. Фаза I: Северо-Центральный регион Вьетнама. Государственный проект, отчет о НИР (на вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), Ханой.

62. Чан Ч. Х., 2004. Исследование и оценка геологических опасностей на территории Вьетнама и рекомендации по мерам борьбы. Фаза II: Исследование Северных горных провинций Вьетнама. Государственный проект, отчет о НИР, (на вьетнамском языке). Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), 210 с., Ханой.
63. Чан Ч. Х., 2010. Изучение, оценка и прогнозирование оползней и разработка мер борьбы для города Кокпай, района Синман, провинции Хазьанг. Отчет о НИР. Государственный проект (на вьетнамском языке) Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), 346 с., Ханой.
64. Шеко А. И., 1980. Закономерности формирования и прогноз селей. 296 с. Недра, Москва.
65. Яцало Б. И., Грицюк С. В., Мирзеабасов О. А., Василевская М. В., 2011. Учет неопределенностей в рамках многокритериального анализа решений с использованием концепции приемлемости. Управление большими системами, Т. 32, с. 5-30.
66. Abdollahizad S., Balafar M. A., Feizizadeh B., et al., 2021. Using hybrid artificial intelligence approach based on a neuro-fuzzy system and evolutionary algorithms for modeling landslide susceptibility in East Azerbaijan Province, Iran. *Earth Science Informatics*, Vol. 14, Issue 4, pp. 1861-1882. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00644-z>
67. Anbalagan R., Kumar R., Lakshmanan K., et al., 2015. Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach, a case study of Lachung Valley, Sikkim. *Geoenvironmental Disasters*, Vol. 2, Issue 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-014-0009-y>
68. Armaş I., Vartolomei F., Stroia F., Braşoveanu L., 2014. Landslide susceptibility deterministic approach using geographic information systems: application to Breaza town, Romania. *Natural Hazards*, Vol. 70, Issue 2, pp. 995-1017. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0857-x>
69. Ayalew L., Yamagishi H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan.

Geomorphology, Vol. 65, Issue 1, pp. 15-31.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>

70. Baker R., 1980. Determination of the critical slip surface in slope stability computations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 4, Issue 4, pp. 333-359. <https://doi.org/10.1002/nag.1610040405>

71. Baum R. L., Savage W. Z., Godt J. W., 2002. TRIGRS; a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. (eds), Open-File Report, 2002-424. <https://doi.org/10.3133/ofr02424>

72. Berhane G., Tadesse K., 2021. Landslide susceptibility zonation mapping using statistical index and landslide susceptibility analysis methods: A case study from Gindeberet district, Oromia Regional State, Central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 180. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104240>

73. Binh Van Duong, Fomenko I. K., Kien Trung Nguyen, et al., 2022. Earthquake-induced landslide hazard assessment in Trung Chai commune, Sapa, Vietnam using a deterministic method. *Earth sciences and natural resources for sustainable development (ERSD2022)*, Hanoi, 2022, pp. 107-112. Transport Publishing House, Hanoi.

74. Binh Van Duong, Igor K. Fomenko, Lan Chau Nguyen, et al., 2023. Mathematical and numerical modeling of slope stability for the Mong Sen landslide event in the Trung Chai commune, Sapa, Vietnam. In Sassa K, Editor, *Progress in Landslide Research and Technology*. Springer Cham, Switzerland.

75. Binh Van Duong, Igor Konstantinovich Fomenko, Ha Viet Nhu, et al., 2022. Landslide hazard assessment for Batxat area of Vietnam using GIS-based spatial prediction models. *Journal of Mining and Earth Sciences*, Vol. 63, Issue 5a, pp. 70-82.

76. Bishop A. W., 1955. The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, Vol. 5, Issue 1, pp. 7-17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>

77. Bishop A. W., Morgenstern N., 1960. Stability Coefficients for Earth Slopes. *Géotechnique*, Vol. 10, Issue 4, pp. 129-153. <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.4.129>

78. British Standards Institution. EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. London, UK, 2004.

79. Brosens L., Campforts B., Robinet J., et al., 2020. Slope Gradient Controls Soil Thickness and Chemical Weathering in Subtropical Brazil: Understanding Rates and Timescales of Regional Soilscape Evolution Through a Combination of Field Data and Modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 125, Issue 6, pp. 1-26. <https://doi.org/10.1029/2019JF005321>
80. Calcaterra D., Parise M., 2010. Weathering as a predisposing factor to slope movements: an introduction. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, Vol. 23, Issue 1, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1144/EGSP23.1>
81. California Division of Mines and Geology, California State Mining and Geology Board, 1997. Guidelines for Evaluating and Mitigating Seismic Hazards in California. DMG special publication 117. 74p. Department of Conservation, Division of Mines and Geology.
82. Cardinali M., Reichenbach P., Guzzetti F., et al., 2002. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 2, Issue 1/2, pp. 57-72. <https://nhess.copernicus.org/articles/2/57/2002/>
83. Carrara A., 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, Vol. 15, Issue 3, pp. 403-426. <https://doi.org/10.1007/BF01031290>
84. Carrara A., Cardinali M., Detti R., et al., 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 16, Issue 5, pp. 427-445. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>
85. Chang K.-T., Merghadi A., Yunus A. P., et al., 2019. Evaluating scale effects of topographic variables in landslide susceptibility models using GIS-based machine learning techniques. *Scientific Reports*, Vol. 9, Issue 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48773-2>
86. Chen Y., Yu J., Khan S., 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 25, Issue 12, pp. 1582-1591. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001>

87. Cheng Y. M., Yip C. J., 2007. Three-Dimensional Asymmetrical Slope Stability Analysis Extension of Bishop's, Janbu's, and Morgenstern-Price's Techniques. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, Issue 12, pp. 1544-1555. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1544))
88. Ciurleo M., Cascini L., Calvello M., 2017. A comparison of statistical and deterministic methods for shallow landslide susceptibility zoning in clayey soils. *Engineering Geology*, Vol. 223, pp. 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.023>
89. Corominas J., van Westen C., Frattini P., et al., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 73, Issue 2, pp. 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
90. Costanzo D., Rotigliano E., Irigaray C., et al., 2012. Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 12, Issue 2, pp. 327-340. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-327-2012>
91. Crawford M. M., 2014. Kentucky Geological Survey Landslide Inventory: From Design to Application. 18p. Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
92. Crozier M., 1989. *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. 252p. Routledge, London.
93. Cruden D., Varnes D. J., 1996. *Landslide Types and Processes*. Landslides: investigation and mitigation. Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences. pp. 36-75. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
94. Dai F. C., Lee C. F., Ngai Y. Y., 2002. Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineering Geology*, Vol. 64, pp. 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
95. Dang K. B., Burkhard B., Müller F., Dang V. B., 2018. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, Vol. 16, Issue 4, pp. 767-781. <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6>

96. Duncan J. M., Wright Stephen G., Brandon Thomas L., 2014. Soil strength and slope stability. 2nd ed. 336p. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
97. Eberhart R., Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. MHS'95 Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995, pp. 39-43. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/494215>
98. Feizizadeh B., Shadman Roodposhti M., Jankowski P., Blaschke T., 2014. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. Computers & Geosciences, Vol. 73, pp. 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.001>
99. Fomenko I., Zerkal O., Kurguzov C., Shubina D. D., 2019. Probabilistic Analysis of Slope Stability and Landslide Risk Assessment. Disaster & Development, Vol. 8, Issue 1&2, pp. 1-9.
100. Fomenko I. K., Zerkal O. V., 2017. The Application of Anisotropy of Soil Properties in the Probabilistic Analysis of Landslides Activity. Procedia Engineering, Vol. 189, pp. 886-892. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.138>
101. Freitas D., Lopes L. G., Morgado-Dias F., 2020. Particle Swarm Optimisation: A Historical Review Up to the Current Developments. Entropy, Vol. 22, Issue 3. <https://doi.org/10.3390/e22030362>
102. Fressard M., Thiery Y., Maquaire O., 2014. Which data for quantitative landslide susceptibility mapping at operational scale? Case study of the Pays d'Auge plateau hillslopes (Normandy, France). Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 14, Issue 3, pp. 569-588. <https://nhess.copernicus.org/articles/14/569/2014/>
103. Froude M. J., Petley D. N., 2018. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 18, Issue 8, pp. 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
104. Getachew N., Meten M., 2021. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. Geoenvironmental Disasters, Vol. 8, Issue 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z>

105. Gian Q. A., Tran D.-T., Nguyen D. C., et al., 2017. Design and implementation of site-specific rainfall-induced landslide early warning and monitoring system: a case study at Nam Dan landslide (Vietnam). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 8, Issue 2, pp. 1978-1996. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1401561>
106. Glade T., Anderson M., Crozier M., 2005. *Landslide Hazard and Risk*. 824p. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England.
107. Gorokhovich Y., Vustianiuk A., 2021. Implications of slope aspect for landslide risk assessment: A case study of Hurricane Maria in Puerto Rico in 2017. *Geomorphology*, Vol. 391. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107874>
108. Greco Venanzio R., 1996. Efficient Monte Carlo Technique for Locating Critical Slip Surface. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, Issue 7, pp. 517-525. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(517\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(517))
109. Griffiths D. V., Lane P. A., 1999. Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, Vol. 49, Issue 3, pp. 387-403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
110. Guzzetti F., 2005. *Landslide Hazard and Risk Assessment*. PhD Thesis. University of Bonn, Bonn, Germany. [http://geomorphology.irpi.cnr.it/Members/fausto/PhD-dissertation/Landslide\\_Hazard\\_and\\_Risk\\_Assessment.pdf](http://geomorphology.irpi.cnr.it/Members/fausto/PhD-dissertation/Landslide_Hazard_and_Risk_Assessment.pdf)
111. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, Vol. 31, Issue 1, pp. 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
112. Guzzetti F., Mondini A. C., Cardinali M., et al., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, Vol. 112, Issue 1, pp. 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
113. Hang H. T., Tung H., Hoa P. D., et al., 2021. Spatial prediction of landslides along National Highway-6, Hoa Binh province, Vietnam using novel hybrid models. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1912195>
114. Haque U., da Silva P. F., Devoli G., et al., 2019. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of The Total Environment*, Vol. 682, pp. 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415>

115. Hasekioğulları G. D., Ercanoglu M., 2012. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). *Natural Hazards*, Vol. 63, Issue 2, pp. 1157-1179. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0218-1>
116. He J., Qiu H., Qu F., et al., 2021. Prediction of spatiotemporal stability and rainfall threshold of shallow landslides using the TRIGRS and Scoops3D models. *CATENA*, Vol. 197. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104999>
117. Highland L., Bobrowsky P., 2008. *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. 129p. US Geological Survey Circular 1325, Reston, Virginia.
118. Hsu Y.-C., Chang Y.-L., Chang C.-H., et al., 2018. Physical-based rainfall-triggered shallow landslide forecasting. *Smart Water*, Vol. 3, Issue 1. <https://doi.org/10.1186/s40713-018-0011-8>
119. Hung L. Q., Van N. T. H., Duc D. M., et al., 2016. Landslide susceptibility mapping by combining the analytical hierarchy process and weighted linear combination methods: a case study in the upper Lo River catchment (Vietnam). *Landslides*, Vol. 13, Issue 5, pp. 1285-1301. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0657-3>
120. Hutchinson J. N., Chandler M. P., 1991. A preliminary landslide hazard zonation of the Undercliff of the Isle of Wight. *Slope stability engineering developments and applications*. Thomas Telford, London. pp. 197-205. <https://doi.org/10.1680/ssedaa.16606.0031>
121. Hynes-Griffin M. E., Franklin A. G., 1984. Rationalizing the seismic coefficient method. Miscellaneous paper (US Army Engineer Waterways Experiment Station); GL-84-13. 37p. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
122. IITK-GSDMA, 2005. *Guidelines for seismic design of earth dams and embankments*. 46p. Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur.
123. Janbu N. Application of composite slip surfaces for stability analysis. *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes*, Stockholm, 1954, Vol. 3, pp. 43-49.
124. Japan International Cooperation Agency (JICA), 2018. *Data collection survey on strategy development of disaster risk reduction and management in the Socialist Republic of Vietnam*. Japan International Cooperation Agency (JICA), Earth System Science Co.

- L, Nikken Sekkei Civil Engineering Ltd., IDEA Consultants I, Tokyo, Japan.  
[https://openjicareport.jica.go.jp/216/216/216\\_123\\_12323879.html](https://openjicareport.jica.go.jp/216/216/216_123_12323879.html)
125. Jeong S., Lee K., Kim J., Kim Y., 2017. Analysis of Rainfall-Induced Landslide on Unsaturated Soil Slopes. *Sustainability*, Vol. 9, Issue 7, pp. 1-20.  
<https://doi.org/10.3390/su9071280>
126. John Krahn, 2004. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. 1st ed. 396p. GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
127. Kanungo D. P., Arora M. K., Sarkar S., Gupta R., 2009. Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping - A Review. *Journal of South Asia Disaster Studies*, Vol. 2, Issue 1, pp. 81-105.
128. Kanungo D. P., Arora M. K., Sarkar S., Gupta R. P., 2006. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology*, Vol. 85, Issue 3, pp. 347-366. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.03.004>
129. Kavazanjian E., Jr., Matasovic N., Hadj-Hamou T., Sabatini P. J., 1997. Geotechnical Engineering Circular No. 3: Design Guidance. Geotechnical Earthquake Engineering for Highways. Volume I - Design Principles. 186p. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Engineering: Office of Technology Applications, Washington, DC.
130. Kayastha P., Dhital M. R., De Smedt F., 2013. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, Vol. 52, pp. 398-408.  
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.003>
131. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995, Vol. 4, pp. 1942-1948. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/488968>
132. Kose D. D., Turk T., 2019. GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods. *Physical Geography*, Vol. 40, Issue 5, pp. 481-501. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559583>
133. Lal R., Stewart B. A., 1990. Soil degradation. 345p. Springer-Verlag, New York.

134. Lei T., Zhang Y., Lv Z., et al., 2019. Landslide Inventory Mapping From Bitemporal Images Using Deep Convolutional Neural Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 16, Issue 6, pp. 982-986. <http://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2889307>
135. Leroi E., 1996. Landslide hazard-Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments. *Landslides Processes International Symposium on Landslides*, pp. 35-52.
136. Li X., Luo J., Jin X., et al., 2020. Improving Soil Thickness Estimations Based on Multiple Environmental Variables with Stacking Ensemble Methods. *Remote Sensing*, Vol. 12, Issue 21. <https://doi.org/10.3390/rs12213609>
137. Liao Z., Hong Y., Wang J., et al., 2010. Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, Vol. 7, Issue 3, pp. 317-324. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0219-7>
138. Long N. T., De Smedt F., 2019. Analysis and Mapping of Rainfall-Induced Landslide Susceptibility in A Luoi District, Thua Thien Hue Province, Vietnam. *Water*, Vol. 11, Issue 1. <https://doi.org/10.3390/w11010051>
139. Luo W., Liu C.-C., 2018. Innovative landslide susceptibility mapping supported by geomorphon and geographical detector methods. *Landslides*, Vol. 15, Issue 3, pp. 465-474. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0893-9>
140. Mandal S., Maiti R., 2015. *Semi-quantitative Approaches for Landslide Assessment and Prediction*. Springer Natural Hazards. 292p. Springer, Singapore.
141. Mandal S., Mondal S., 2019. *Statistical Approaches for Landslide Susceptibility Assessment and Prediction*. 200p. Springer International Publishing, Switzerland.
142. Marcuson W. F., Franklin A. G., 1983. Seismic Design, Analysis, and Remedial Measures to Improve Stability of Existing Earth Dams-Corps of Engineers Approach. A Symposium of ASCE Convention, Pennsylvania, 1983, pp. 65-78. American Society of Civil Engineers, New York.
143. Mareli M., Twala B., 2018. An adaptive Cuckoo search algorithm for optimisation. *Applied Computing and Informatics*, Vol. 14, Issue 2, pp. 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2017.09.001>

144. Martínez-Álvarez F., Reyes J., Morales-Esteban A., Rubio-Escudero C., 2013. Determining the best set of seismicity indicators to predict earthquakes. Two case studies: Chile and the Iberian Peninsula. *Knowledge-Based Systems*, Vol. 50, pp. 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.06.011>
145. Masanori Numata, 1965. Earthquake-Resistant Design for Civil Engineering Structures, Earth Structures and Foundation in Japan. The Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto, Japan, 1960, Vol. 3, pp. 1917-1946. Science Council of Japan, Tokyo, Japan.
146. Moharrami M., Naboureh A., Gudiyangada Nachappa T., et al., 2020. National-Scale Landslide Susceptibility Mapping in Austria Using Fuzzy Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 9, Issue 6. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060393>
147. Mokhtari M., Abedian S., 2019. Spatial prediction of landslide susceptibility in Taleghan basin, Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 33, Issue 7, pp. 1297-1325. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01696-w>
148. Montgomery D., Dietrich W., 1994. A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research*, Vol. 30, Issue 4, pp. 1153-1171. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>
149. Montrasio L., Valentino R., 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 8, Issue 5, pp. 1149-1159. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1149-2008>
150. Nahayo L., Mupenzi C., Habiyaemye G., et al., 2019. Landslides Hazard Mapping in Rwanda Using Bivariate Statistical Index Method. *Environmental Engineering Science*, Vol. 36, Issue 8, pp. 892-902. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493>
151. Nguyen A. D., 2014. Tectonic deformation and earthquake hazard in Northwestern Vietnam inferred from GPS observations [Doctoral Thesis]. Nagoya University, Nagoya, Japan. <https://nagoya.repo.nii.ac.jp/records/18129>
152. Nguyen L. M., Lin T.-L., Wu Y.-M., et al., 2011. The first ML scale for North of Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 40, Issue 1, pp. 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.07.005>

153. Nguyen Q. P., Phuong N., Nguyen K. L., 2012. Statistical and heuristic approaches for spatial prediction of landslide hazards in Laocai, Vietnam. International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences, Ho Chi Minh city, 1-7.
154. Nguyen V. C., Dao V. T., 2007. Investigation and research of landslide geohazard in north-western part of Vietnam for the sustainable development of the territory. Annual Report of FY 2006, The Core University Program between Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and Vietnamese Academy of Science and Technology (VAST). Core University Program Office, Ike Laboratory, Div. Of Sustainable Energy and Environmental Engineering, Osaka University, Osaka. pp. 269-280.
155. Oh H.-J., Lee S., Hong S.-M., 2017. Landslide Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio Technique with Iterative Random Sampling. Journal of Sensors, Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3730913>
156. Pack R., Tarboton D., Goodwin C. Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.001998.
157. Palazzolo N., Peres D. J., Bordoni M., et al., 2021. Improving Spatial Landslide Prediction with 3D Slope Stability Analysis and Genetic Algorithm Optimization: Application to the Oltrepò Pavese. Water, Vol. 13, Issue 6. <https://doi.org/10.3390/w13060801>
158. Park D. W., Nikhil N. V., Lee S. R., 2013. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 13, Issue 11, pp. 2833-2849. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2833-2013>
159. Patton N. R., Lohse K. A., Godsey S. E., et al., 2018. Predicting soil thickness on soil mantled hillslopes. Nature Communications, Vol. 9, Issue 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05743-y>
160. Peart M. R., Ng K. Y., Zhang D. D., 2005. Landslides and sediment delivery to a drainage system: some observations from Hong Kong. Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 25, Issue 5, pp. 821-836. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2004.08.004>

161. Pham B. T., Prakash I., Singh S. K., et al., 2019. Landslide susceptibility modeling using Reduced Error Pruning Trees and different ensemble techniques: Hybrid machine learning approaches. *CATENA*, Vol. 175, pp. 203-218. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.018>
162. Pham B. T., Shirzadi A., Tien Bui D., et al., 2018. A hybrid machine learning ensemble approach based on a Radial Basis Function neural network and Rotation Forest for landslide susceptibility modeling: A case study in the Himalayan area, India. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 33, Issue 2, pp. 157-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.09.008>
163. Pham T. T., Shellnutt J. G., Tran T.-A., Lee H.-Y., 2020. Petrogenesis of Eocene to early Oligocene granitic rocks in Phan Si Pan uplift area, northwestern Vietnam: Geochemical implications for the Cenozoic crustal evolution of the South China Block. *Lithos*, Vol. 372-373. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105640>
164. Phong T. V., Phan T. T., Prakash I., et al., 2021. Landslide susceptibility modeling using different artificial intelligence methods: a case study at Muong Lay district, Vietnam. *Geocarto International*, Vol. 36, Issue 15, pp. 1685-1708. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1665715>
165. Pourghasemi H. R., Rahmati O., 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *CATENA*, Vol. 162, pp. 177-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.022>
166. Pourghasemi H. R., Teimoori Yansari Z., Panagos P., Pradhan B., 2018. Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016). *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 11, Issue 9. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3531-5>
167. Pradhan A. M. S., Kim Y.-T., 2021. Development and Evaluation of Relative Relief Based Soil Thickness Model: A Comparative Study in Hilly Terrain, South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, Issue 6, pp. 2186-2198. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1379-9>

168. Pu X., Wan L., Wang P., 2021. Initiation mechanism of mudflow-like loess landslide induced by the combined effect of earthquakes and rainfall. *Natural Hazards*, Vol. 105, Issue 3, pp. 3079-3097. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04442-6>
169. Quang Khanh N., Tien Bui D., Hoang N.-D., et al., 2017. A Novel Hybrid Approach Based on Instance Based Learning Classifier and Rotation Forest Ensemble for Spatial Prediction of Rainfall-Induced Shallow Landslides using GIS. *Sustainability*, Vol. 9, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/su9050813>
170. Raghuvanshi T. K., Ibrahim J., Ayalew D., 2014. Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme – An approach for landslide hazard zonation. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 99, pp. 595-612. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.05.004>
171. Rashid B., Iqbal J., Su L.-j., 2020. Landslide susceptibility analysis of Karakoram highway using analytical hierarchy process and scoops 3D. *Journal of Mountain Science*, Vol. 17, Issue 7, pp. 1596-1612. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5195-8>
172. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B. D., et al., 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, Vol. 180, pp. 60-91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
173. Reid E., Christian S. B., Brien D. L., Henderson S. T., 2015. Scoops3D - Software to analyze 3D slope stability throughout a digital landscape. (eds), *Techniques and Methods*, 218 p. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA. <https://doi.org/10.3133/tm14A1>
174. Reid M. E., Christian S. B., Brien D. L., 2000. Gravitational stability of three-dimensional stratovolcano edifices. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 105, Issue B3, pp. 6043-6056. <https://doi.org/10.1029/1999JB900310>
175. Rigon R., Bertoldi G., Over T. M., 2006. GEOTop: A Distributed Hydrological Model with Coupled Water and Energy Budgets. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, Issue 3, pp. 371-388. <https://doi.org/10.1175/JHM497.1>
176. Roy J., Saha S., Arabameri A., et al., 2019. A Novel Ensemble Approach for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Darjeeling and Kalimpong Districts, West Bengal, India. *Remote Sensing*, Vol. 11, Issue 23. <https://doi.org/10.3390/rs11232866>

177. Saadatkhah N., Kassim A., Lee L. M., 2015. Hulu Kelang, Malaysia regional mapping of rainfall-induced landslides using TRIGRS model. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 8, Issue 5, pp. 3183-3194. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1410-2>
178. Saaty T. L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, Issue 3, pp. 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
179. Saaty T. L., Vargas L., 2001. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. International Series in Operations Research & Management Science. 333p. Springer US, New York.
180. Salciarini D., Volpe E., Cattoni E., 2020. Probabilistic vs. Deterministic Approach in Landslide Triggering Prediction at Large-scale. In Francesco Calvetti, Federica Cotecchia, Andrea Galli, Cristina Jommi, (eds), *Geotechnical Research for Land Protection and Development*. Springer, Cham, Switzerland. pp. 62-70. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6_7)
181. Santi P. M., Hewitt K., VanDine D. F., Barillas Cruz E., 2011. Debris-flow impact, vulnerability, and response. *Natural Hazards*, Vol. 56, Issue 1, pp. 371-402. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9576-8>
182. Sassa K., Fukuoka H., Wang F., Wang G., 2007. Landslides Induced by a Combined Effect of Earthquake and Rainfall. In Sassa K, Fukuoka H, Wang F, Wang G, (eds), *Progress in Landslide Science*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. pp. 193-207. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-70965-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70965-7_14)
183. Schicker R., Moon V., 2012. Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale. *Geomorphology*, Vol. 161-162, pp. 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.036>
184. Seed H. B., 1979. Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams. *Géotechnique*, Vol. 29, Issue 3, pp. 215-263. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.3.215>
185. Shano L., Raghuvanshi T. K., Meten M., 2020. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. *Geoenvironmental Disasters*, Vol. 7, Issue 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>

186. Soeters R., van Westen C. J., 1996. Slope instability recognition analysis and zonation. In A. Keith Turner, Robert L. Schuster, (eds), Landslides, investigation and mitigation Special report (National Research Council (US) Transportation Research Board). National Academy Press, Washington, D.C. pp. 129-177. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf>
187. Su Z., Chow J. K., Tan P. S., et al., 2021. Deep convolutional neural network–based pixel-wise landslide inventory mapping. *Landslides*, Vol. 18, Issue 4, pp. 1421-1443. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6>
188. Süzen M. L., Doyuran V., 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, Vol. 45, Issue 5, pp. 665-679. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8>
189. Swets J. A., 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, Vol. 240, Issue 4857, pp. 1285-1293. <http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615>
190. Tam DM, 2001. Flooding and landslides at the highways of Vietnam. Proceedings of the International Workshop on “Saving Our Water and Protecting Our Land”, Hanoi, 18-27.
191. Terzaghi K., 1950. Mechanism of Landslides. In Paige S, Editor, *Application of Geology to Engineering Practice*. Geological Society of America. pp. 83-123. <https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83>
192. Tesfa T. K., Tarboton D. G., Chandler D. G., McNamara J. P., 2009. Modeling soil depth from topographic and land cover attributes. *Water Resources Research*, Vol. 45, Issue 10, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1029/2008WR007474>
193. Thanh N. K., Miyagi T., Isurugi S., et al., 2021. Developing Recognition and Simple Mapping by UAV/SfM for Local Resident in Mountainous Area in Vietnam - A Case Study in Po Xi Ngai Community, Laocai Province. In Guzzetti F, Mihalić Arbanas S, Reichenbach P, Sassa K, Bobrowsky PT, Takara K, (eds), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Volume 2 From Mapping to Hazard and Risk Zonation WLF 2020*. Springer International Publishing, Cham. pp. 103-109. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_10)

194. Thiery Y., Malet J. P., Sterlacchini S., et al., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, Vol. 92, Issue 1, pp. 38-59. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.020>
195. Tien Bui D., Tuan T. A., Hoang N.-D., et al., 2017. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization. *Landslides*, Vol. 14, Issue 2, pp. 447-458. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9>
196. Tien Bui D., Tuan T. A., Klempe H., et al., 2016. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides*, Vol. 13, Issue 2, pp. 361-378. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6>
197. Tien P., Luong L., Thanh Nhan T., et al., 2021. Secondary Processes Associated with Landslides in Vietnam. pp. 192-209. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60269-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60269-7_10)
198. Tran T. H., Lan C.-Y., Usuki T., et al., 2015. Petrogenesis of Late Permian silicic rocks of Tu Le basin and Phan Si Pan uplift (NW Vietnam) and their association with the Emeishan large igneous province. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 109, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.009>
199. Tran T. V., Alvioli M., Lee G., An H. U., 2018. Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: a case study. *Landslides*, Vol. 15, Issue 6, pp. 1071-1084. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0931-7>
200. Tran T. V., Hoang V. H., Pham H. D., Sato G., 2021. Use of Scoops3D and GIS for the Assessment of Slope Stability in Three-Dimensional: A Case Study in Sapa, Vietnam. *International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining (ISRM 2020)*, Hanoi, 2020, Vol. 2, pp. 210-229. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60269-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60269-7_11)
201. Tran T. V., Lee G., An H., Kim M., 2017. Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides.

- Environmental Earth Sciences, Vol. 76, Issue 8, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6635-4>
202. Tran T. V., Lee G., Kim M., 2016. Shallow landslide assessment considering the influence of vegetation cover. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 17, Issue 4, pp. 17-31. <https://doi.org/10.14481/jkges.2016.17.4.17>
203. Tran T. V., Lee G., Trinh M. T., An H., 2017. Effect of Digital Elevation Model Resolution on Shallow Landslide Modeling Using TRIGRS. *Natural Hazards Review*, Vol. 18, Issue 2, pp. 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000233](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000233)
204. UNICEF Viet Nam, 2019. Viet Nam child centred risk assessment. Hanoi, Vietnam. <https://www.unicef.org/vietnam/reports/viet-nam-child-centred-risk-assessment>
205. United States Army Corps of Engineers, 1970. Engineering and Design Stability of Earth and Rock-fill Dams. EM 1110-2-1902. 153p. Department of the Army, Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, D. C.
206. United States Army Corps of Engineers, 1997. Engineering and Design: Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering. Engineer Technical Letter 1110-2-547. Department of the Army, Washington, DC, USA.
207. van Westen C. J., 1993. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation [ITC Dissertation]. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede. [https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers\\_1993/phd/vanwesten.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_1993/phd/vanwesten.pdf)
208. Van Westen C. J., 1997. Statistical landslide susceptibility analysis. ILWIS 21 for Windows application guide. ITC Publication, Enschede. pp. 73-84.
209. van Westen C. J., Terlien M. J. T., 1996. An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 21, Issue 9, pp. 853-868. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199609\)21:9<853::AID-ESP676>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199609)21:9<853::AID-ESP676>3.0.CO;2-C)
210. Varnes D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes. In Robert L Schuster, Raymond J Krizek, (eds), *Landslides: Analysis and Control Special Report 176*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington. pp. 11-33. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>

211. Varnes D. J., International Association of Engineering Geology, Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes, 1984. Landslide hazard zonation a review of principles and practice. 63p. Unesco, Paris.
212. Wang W., Constantino C. Reliability analysis of slope stability at nuclear power plant site. 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), Espoo, Finland, 2009.
213. Wei X., Zhang L., Yang H.-Q., et al., 2021. Machine learning for pore-water pressure time-series prediction: Application of recurrent neural networks. *Geoscience Frontiers*, Vol. 12, Issue 1, pp. 453-467. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.04.011>
214. Wu W., Sidle R. C., 1995. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins. *Water Resources Research*, Vol. 31, Issue 8, pp. 2097-2110. <https://doi.org/10.1029/95WR01136>
215. Wubalem A., 2021. Landslide Inventory, Susceptibility, Hazard and Risk Mapping. In Zhang Y, Cheng Q, (eds), *Landslides*. IntechOpen, London. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100504>
216. Yamagishi H., Bhandary N. (ed), 2017. *GIS Landslide*. 230. Springer, Tokyo, Japan.
217. Yanagisawa E., 1991. Dynamic Behaviour of Rockfill Dam. In das Neves EM, Editor, *Advances in Rockfill Structures*. Springer Netherlands, Dordrecht. pp. 449-470. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3206-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3206-0_15)
218. Yang X. S., Suash D. Cuckoo Search via Lévy flights. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), Coimbatore, India, 2009, pp. 210-214. IEEE. <https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393690>
219. Zhang S., Wang F., 2019. Three-dimensional seismic slope stability assessment with the application of Scoops3D and GIS: a case study in Atsuma, Hokkaido. *Geoenvironmental Disasters*, Vol. 6, Issue 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0125-9>