

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Савон Васиано Юсмира



ПРИМЕНЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ
ДЛЯ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ПРИ ВСКРЫТИИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ
ГОРНОГО МАССИВА САГУА–БАРАКОА, КУБА

Специальность 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук
Поспехов Г.Б.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА И ИЗУЧЕНИИ ОПОЛЗНЕЙ	12
1.1 Применение моделей в прогнозировании региональной оползневой опасности .	19
1.2 История изучения оползневого процесса на Кубе.....	22
1.3 Современные проблемы прогнозирования возникновения и развития оползней в процессе геологоразведки для открытых горных работ	28
1.4 Перспективный анализ прогноза оползней в массиве Сагуа-Баракоа.....	30
1.5 Выводы по Главе 1	32
ГЛАВА 2 ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕЙ В МАССИВЕ САГУА-БАРАКОА.....	34
2.1 Климатические условия.....	34
2.2 Геоморфологические условия.....	36
2.3 Геологическое строение	37
2.4 Физико-механические свойства горных пород.....	43
2.5 Гидрография	45
2.6 Гидрогеология	46
2.7 Современные геологические процессы и явления.....	47
2.7.1 Выветривание	47
2.7.2 Эрозионные процессы	48
2.7.3 Сейсмичность	49
2.7.4 Оползневые процессы.....	51
2.8 Выводы по Главе 2	55
ГЛАВА 3 РЕГИОНАЛЬНОЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ В МАССИВЕ САГУА-БАРАКОА	57
3.1 Подходы и методы региональной оценки оползневых процессов	57

3.1.1 Качественный подход	58
3.1.2 Полуколичественный подход	59
3.1.3 Количественный подход.....	62
3.2 Методология оценки оползневой опасности для массива Сагуа-Баракоа	67
3.3 Географические информационные системы (ГИС) как платформа для оценки оползневых процессов	71
3.4 Анализ факторов инженерно-геологического районирования по оползневой опасности на массиве Сагуа-Баракоа	72
3.5 Анализ многочленной логистической регрессии	87
3.6 Выводы по Главе 3	93
ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ В МАССИВЕ САГУА-БАРАКОА	96
4.1 Методика прогноза оползневых процессов на открытых месторождениях полезных ископаемых в массиве Сагуа-Баракоа	96
4.1.1 Определение критических значений количества атмосферных осадков для прогнозирования оползней в районах добычи полезных ископаемых массива Сагуа-Баракоа	96
4.1.2 Машинное обучение для прогнозирования оползневых процессов	99
4.1.3 Валидация модели прогнозирования	107
4.2 Определение критических значений количества атмосферных осадков	108
4.3 Прогнозирование оползневых процессов на месторождениях полезных ископаемых открытым способом	113
4.4 Валидация прогноза на месторождении никеля и кобальта Камариока–Восток	119
4.5 Выводы по Главе 4	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	134

ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации базы данных	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов диссертации	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Оползни являются одной из основных опасностей, угрожающих безопасности эксплуатации открытых месторождений полезных ископаемых, особенно когда добыча ведется в горных районах, где они могут возникать по естественным причинам, таким как сильные штормы, землетрясения или эрозия почвы, а также по вине человека, например, при строительстве или работе на откосах. В Латинской Америке и Карибском бассейне – регионах, характеризующихся богатством полезных ископаемых и географическим разнообразием, - эта проблема особенно актуальна из-за сочетания горного рельефа, высокой сейсмической активности и экстремальных погодных условий.

Северо-восточная часть Кубы характеризуется сложным геологическим строением, крутым рельефом и самым высоким суммарным количеством осадков на Кубе, что создает благоприятные условия для возникновения и развития оползней. При этом, согласно докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2023), в ближайшем будущем ожидается увеличение интенсивности осадков с последующей активизацией и возникновением новых оползней. Эти факторы в сочетании с интенсификацией добычи полезных ископаемых на Кубе свидетельствуют о необходимости разработки надежных методик с использованием вероятностных и других методов, таких как машинное обучение, для анализа больших объемов данных, выявления сложных закономерностей и сокращения времени анализа при оценке и прогнозировании оползневой опасности, особенно в районах месторождений, разрабатываемых открытым способом.

В этом контексте региональное инженерно-геологическое районирование на основе оползневой опасности и ее прогноза для обеспечения устойчивости при вскрытии и разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом на территории Кубы **является актуальной научной задачей.**

Степень разработанности темы исследования

С начала XX века и по настоящее время многие исследователи посвятили себя изучению оползневых процессов. Погребов Н.Ф., Попов И.В., Емельянова Е.П., Бранэден Д., Ломтадзе В.Д., Белый Л.Д., Варнес Д., Сергеев Е.М., Кюнтцель В.В., Золотарев Г.С., Петров Н.Ф., Иванов И.П. и другие занимались изучением механизмов, вызывающих потерю устойчивости и развитием оползневых процессов. На месторождениях, разрабатываемых открытым способом, разработкой основ мониторинга, изучением механизмов развития оползней с использованием количественных методов занимались Демин А.М., Фисенко Г.Л., Христов С.Г., Коротаев Г.В., Гальперин А.М., Дашко Р.Э., Киянец А.В., Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Протасов С.И., Цирель С.В., Шабаров А.Н., Шпаков П.С., Сергина Е.В. и другие. Среди исследователей на Кубе, которые занимались этой темой, наибольший вклад в ее развитие внесли Кастельяно Э., Гуардадо Р. и Альмагуэр Ю.

Ограничения применения существующих методов оценки оползневой опасности на Кубе, основанных на качественных и полуколичественных эвристических подходах, подчеркивают необходимость перехода к интеграции методологий, способных обрабатывать большие объемы данных для достижения большей точности прогнозирования оползней в горнодобывающих районах при открытой разработке месторождений полезных ископаемых.

Объект исследования – оползневые процессы и явления на территории массива Сагуа-Баракоа на острове Куба.

Предмет исследования – закономерности возникновения, развития и распространения оползневых процессов и явлений на территории массива Сагуа-Баракоа на острове Куба.

Цель работы – повышение безопасности при открытой разработке месторождений полезных ископаемых и эффективности управления оползневыми рисками.

Идея работы заключается в том, что изучение закономерностей возникновения и развития оползней на территории массива Сагуа-Баракоа позволяет надежно прогнозировать оползневые процессы и явления на территориях действующих и будущих открытых разработок месторождений.

Задачи исследования:

1. Оценка современного состояния вопроса изучения оползней на территории массива Сагуа-Баракоа на Кубе и анализ инженерно-геологических условий рассматриваемой территории.
2. Инженерно-геологическое районирование на основе оползневой опасности на территории Сагуа-Баракоа.
3. Определение критических значений количества атмосферных осадков, способствующих возникновению оползневых процессов.
4. Выполнение регионального прогноза возникновения оползней при вскрытии месторождений на территории массива Сагуа-Баракоа.
5. Проверка достоверности оценки региональной оползневой опасности на рудных месторождениях, разрабатываемых открытым способом на Кубе.

Научная новизна:

1. Выполнен анализ факторов оползнеобразования на территории массива Сагуа-Баракоа на острове Куба.
2. Установлены закономерности возникновения и распространения оползней на исследуемой территории.
3. Разработаны прогностические модели для определения будущих сценариев развития оползней и эффективного управления оползневыми рисками в пределах массива Сагуа-Баракоа на острове Куба.

Соответствие паспорту научной специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр по пунктам:

7. Анализ и типизация горно-геологических условий месторождений твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых для их эффективного промышленного освоения.

9. Методы и системы обработки геологической, маркшейдерской и геофизической информации, а также методы моделирования месторождений, прогнозирования горно-геологических явлений и процессов.

10. Геологическое, маркшейдерское и геофизическое обеспечение проектирования и планирования горных работ, управления запасами и качеством добываемых полезных ископаемых с учетом их комплексного использования и охраны окружающей среды.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлены параметры, характеризующие закономерности возникновения и развития оползней на территории массива Сагуа-Баракоа на острове Куба (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623538, Приложение А).

2. Определены критические значения количества атмосферных осадков, способствующие возникновению оползневых процессов, которые можно использовать для островов Карибского бассейна, а также в континентальных районах и других климатических регионах.

3. Получен акт внедрения результатов кандидатской диссертации от 12.09.2024 г., подтверждающий, что результаты диссертации использованы компанией Базовое структурное подразделение (UEB) «ЭКСПЛОМАТ» (Сантьяго-де-Куба) для прогноза оползневых процессов на действующих и планируемых к разработке карьеров AN (Приложение Б).

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в ВУЗах на Кубе в процессе исследований для аспирантов, магистрантов и студентов, в частности, в Университете Моа по направлению «Управление геологическими

рисками» и в Университете Гуантанамо по направлению «Управление рисками» для разработки проектов мониторинга оползней и мероприятий по инженерной защите.

Методология и методы исследования. Обобщение и анализ теории и практики в области изучения оползневых процессов на Кубе и оценки физико-географических и инженерно-геологических условий горнопромышленных районов с открытой разработкой месторождений полезных ископаемых. Инженерно-геологическое районирование территории по оползневой опасности проведено с использованием вероятностного метода мультиномиальной логистической регрессии. Использовались методы расчета критических значений количества осадков по методу Стедингера и прогноза оползневой опасности при вскрытии месторождений открытыми горными работами методом искусственных нейронных сетей.

Положения, выносимые на защиту

1. При обосновании технологии вскрытия месторождения открытыми горными работами на территории горного массива Сагуа–Баракоа (Куба) необходимо использовать инженерно-геологическое районирование территории по степени оползневой опасности.

2. При вскрытии месторождений открытыми горными работами на территории горного массива Сагуа–Баракоа (Куба) необходимо учитывать, что основным фактором, определяющим возникновение и развитие оползневых процессов, является количество атмосферных осадков и характер дождей.

3. Региональный прогноз оползневой опасности для обеспечения устойчивости территорий при вскрытии месторождений открытыми горными работами должен основываться на моделировании с использованием искусственных нейронных сетей, базирующемся на алгоритме, устанавливающем закономерности зависимости между факторами, связанными с климатическими, рельефными, геологическими, гидрологическими и гидрогеологическими условиями.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена высоким качеством исходной информации по объекту исследования, использованием

стандартных методов вероятностного моделирования для проведения инженерно-геологического районирования по оползневой опасности, а также применением современных методов машинного обучения для прогнозирования оползневой опасности.

Апробация результатов. За последние 3 года принято участие в 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 6 международных:

XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022 г., Санкт-Петербург).

X Конвенция наук о Земле «IX Симпозиум по геологическим рискам, прибрежным процессам и сейсмичности» (апрель 2023 г., Гавана, Куба).

III Международная научно-практическая конференция «Обеспечение устойчивого развития в контексте сельского хозяйства, энергетики, экологии и науки о земле» (ESDCA-III-2023) (март 2023 г., Смоленск).

III Международная научно-практическая конференция «Обеспечение устойчивого развития: сельское хозяйство, экология, энергетика и науки о Земле» (AEES-III-2023) (декабрь 2023 г., Худжанд, Таджикистан).

XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (май-июнь 2024 г., Санкт-Петербург).

XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (декабрь 2024, Санкт-Петербург).

IV Форум студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков «Проблемы горного дела» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (ноябрь 2024, Донецк).

Личный вклад автора: анализ российского и зарубежного научного опыта по теме исследования; постановка цели и задач исследования; инженерно-геологическое

районирование по оползневой опасности; определение критических значений количества атмосферных осадков для возникновения оползневых процессов на территории массива Сагуа-Баракоа; разработка прогностических моделей для определения будущих сценариев развития оползней; анализ и интерпретация результатов исследований; представление результатов исследований в качестве статей и докладов на научных конференциях российского и международного уровней.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункты списка литературы № 1, 23-26, 113-115), в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных проявлений оползневых процессов в Гуантанамо, Куба (Приложение А).

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 161 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 12 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю - к.г.-м.н. Г.Б. Поспехову за всестороннюю помощь и неоценимый вклад в научно-исследовательскую деятельность, а также всему коллективу кафедры маркшейдерского дела Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за поддержку и полезные рекомендации при работе над диссертацией.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА И ИЗУЧЕНИИ ОПОЛЗНЕЙ

Оползни происходят, когда большие массы горных пород отрываются и скатываются по склону или откосу, нанося значительный ущерб инфраструктуре и человеческим жизням [160]. Изучение факторов, способствующих их развитию в различных регионах мира, в настоящее время является приоритетной задачей для научного сообщества, поэтому крайне важно обобщать знания, полученные в этой области, чтобы лучше понимать динамику развития этих процессов и повысить эффективность их прогнозирования.

Хотя термины «склон» и «откос» относятся к наклонным поверхностям, они различаются по своей природе или происхождению. Склон – это более широкий общий термин, описывающий наклон местности, независимо от того, является ли он естественным или искусственным. Емельянова Е.П. определяет склон как наклонный участок поверхности литосферы, образовавшийся под действием рельефообразующих процессов [7]. Откос – термин, чаще всего используемый в технике и строительстве для обозначения намеренно созданной человеком наклонной поверхности. Он определяется как искусственно созданная наклонная поверхность, ограничивающая массив естественного или насыпного грунта, расположенный между горизонтальными участками, различающимися по высоте [19, 28]. Следует отметить, что при инженерно-геологических изысканиях оценка устойчивости может проводиться как для естественных, так и для искусственных склонов и откосов. На рисунке 1.1 показаны профили склона и откоса с их основными морфометрическими элементами.

Н.Ф. Петров в книге «Оползневые системы. Простые оползни» [20], приводит несколько определений оползневых процессов. В таблице 1.1 в хронологическом порядке перечислены наиболее известные определения оползней, которые были даны различными исследователями этой темы, начиная с первой половины XX века.

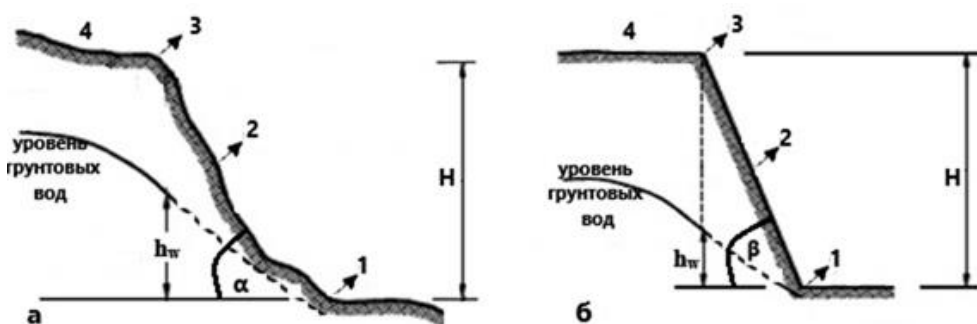


Рисунок 1.1 – Профиль склона (а) и откоса (б) и их основные морфометрические элементы. 1 – подножье; 2 – поверхность; 3 – бровка; 4 – гребень; H – высота; h_w – высота уровня грунтовых вод; α – угол уклона; β – угол откоса [139]

Таблица 1.1 – Определения оползневой процесса (составлено автором)

Год	Автор, источник	Определение оползня
1935 г.	Погребов Н.Ф. [21]	Движение массивных пород по склону под действием силы тяжести, часто это движение происходит с участием поверхностных и подземных вод.
1959 г.	Попов И.В. [22]	Смещение горных пород, составляющих склон, под действием собственного веса.
1972 г.	Емельянова Е.П. [7]	Это движение вниз части пород, составляющих склон, в виде скольжения, в основном без потери контакта между подвижными и неподвижными породами. Породы, которые скользят в данный момент или периодически, также называются оползнем.
1973 г.	Геологический словарь, [18]	Отрыв земляных масс и перемещение их по склону под влиянием силы тяжести.
1975 г.	Белый Л.Д., Попов В.В. [2]	Оползень — это смещение массивов земли по склону, имеющее различную морфологию, структуру и динамику.
1977 г.	Ломтадзе В.Д. [14]	Оползень представляет собой массу горных пород, подвергшуюся или подверженную смещению вниз по склону (естественному или искусственному) под воздействием гравитации, гидродинамического давления, сейсмических сил и иных факторов. Данное явление есть следствие геологического процесса, выражающегося в вертикальном и горизонтальном перемещении породных масс вследствие утраты их устойчивости — нарушения равновесного состояния.

Продолжение таблицы 1.1

Год	Автор, источник	Определение оползня
1978 г.	Сергеев Е.М. [27]	Под действием силы тяжести при вмешательстве подземных либо поверхностных вод происходит скользящее смещение горных пород вдоль склона — данное явление идентифицируется как оползень.
1978 г.	Варнес Д. [146]	Оползень, по существу, является совокупностью склоновых смещений породных масс, сопровождающихся разрушением и перемещением вдоль одной либо нескольких характерных поверхностей. Термин сохраняет широкое применение и используется как обобщающее понятие для большинства типов склоновых процессов, включая движения с минимальным скольжением или без такового.
1980 г.	Кюнтцель В.В. [13]	Под оползнем целесообразно понимать фрагмент геологической среды, ограниченный земной поверхностью и поверхностью смещения, в пределах которого происходит её перемещение (без разрыва контакта с основанием) на новый гипсометрический уровень, обычно более низкий. Оползневой процесс при этом трактуют как последовательную трансформацию состава, состояния и характеристик оползня от момента возникновения и перемещения до полного затухания, проявляющуюся в деформациях слагающих его пород.
1983 г.	Золотарев Г.С. [8]	Оползни определяются как смещения горных пород по склонам, характеризующиеся разнородным составом, структурой и объёмами, где доминирует механизм скольжения вдоль существующей или формирующейся в ходе движения поверхности (зоны) при превышении сдвигающих усилий над прочностными характеристиками пород.
1988 г.	Петров Н.Ф. [20]	Оползень трактуется как процесс отделения и последующего смещения фрагмента породных масс, слагающих склон (откос), сопровождающийся образованием стенки отрыва при сохранении материальной связи смещаемого объёма с окружающим массивом.

Продолжение таблицы 1.1

Год	Автор, источник	Определение оползня
1992 г.	Григоренко А.Г. [5]	Оползневой процесс представляет собой смещение части породных толщ (грунтов), инициируемое преимущественно гравитационными силами с перемещением на пониженный гипсометрический уровень без разрыва контакта с неподвижным основанием. Термин также распространяется на оползневое тело — геологическое образование, сформированное в результате смещения и ограниченное снизу поверхностью (зоной) скольжения, а сверху — рельефом местности.
1999 г.	Осипов В.И. и др. [17]	Гравитационные склоновые процессы (ГСП) интерпретируются как экзогенные геологические явления денудационно-аккумулятивного характера на естественных склонах и искусственных откосах, выражающиеся в перемещении грунтовых масс на сниженные гипсометрические отметки под воздействием силы тяжести при минимальном участии транспортирующих агентов.
2001 г.	Иванов И. П., Тржцинский Ю. Б. [9]	Оползневые явления - перемещение значительных объёмов горных пород вниз по склону/откосу вдоль поверхности(ей) скольжения, обусловленное комплексом гравитационных факторов (массой пород, гидростатическим давлением, сейсмическими воздействиями, техногенными нагрузками).

Чтобы определить и охарактеризовать активные оползни, используются системы классификации. В основном они основаны на механизме процесса сползания, например, предложенные В.В. Кюнтцелем [13] который выделяет шесть типов оползней.

Оползни скольжения обозначают смещение блоков горных пород или рыхлых масс, обусловленное мгновенной потерей прочности (хрупким разрушением) или развитием ползучести, переходящей в срез. Разрушение склонов при таких оползнях может происходить по одной или двум поверхностям отрыва, что является

характерным элементом их структуры [13]; данные поверхности разрушения могут иметь плоскую или круглоцилиндрическую форму (рисунок 1.2) [77].

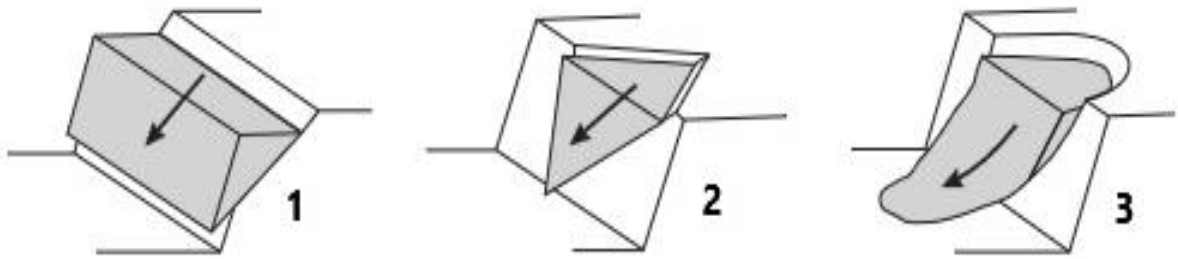


Рисунок 1.2 – Типы нарушения устойчивости скальных склонов. Обрушение скального блока пород: 1 – по одной поверхности скольжения; 2 – по двум поверхностям скольжения; 3 – по круглоцилиндрической поверхности скольжения [79]

Оползни сдвига – смещение блоков коренных пород по субгоризонтальной поверхности в глинистом слое вследствие развития ползучести, переходящей в сдвиг [13].

Оползни выдавливания формируются в склонах, сложенных осадочными, интрузивными и эффузивными породами, когда масса вышележащих толщ превышает прочность подстилающих пород. Ключевым условием их возникновения является наличие в основании склона выдержанных низкопрочных горизонтов, перекрытых относительно прочными породами значительной мощности [13].

Механизм **оползней выплывания** связан с экструзией водонасыщенных плавунных пластов, дестабилизирующих перекрывающие отложения. Современные данные свидетельствуют: зонами генерации деформаций часто служат пылевато-песчаные грунты с органоминеральными коллоидами. Разрушение коллоидных связей (в частности, вследствие роста порового давления) инициирует лавинообразное разупрочнение с переходом в плавун [13].

Оползни-потоки связаны с водонасыщением глинисто-обломочных масс инфильтрационными водами (атмосферными/техногенными), приводящим к потере прочности. Последующее гравитационное перемещение масс как вязкопластической

субстанции происходит по унаследованным или формируемым в процессе смещения поверхностям сдвига [13].

Оползни проседания детерминированы спецификой деформирования лессов, при увлажнении подверженных коллапсу структурных связей с развитием просадок. Деформации верхней (субвертикально-пористой) зоны массива обусловлены атмосферной инфильтрацией, нижней — подтоком грунтовых вод в зоне выклинивания. Дифференциальные просадки вызывают трещинообразование, активизирующее миграцию вод в глубину, и последующий отрыв оползневого блока [13].

Оползни разжижения приурочены к кайнозойским глинистым толщам морского генезиса с аномально высокой чувствительностью. Такие грунты подвержены тиксотропному разупрочнению при разрушении структурного каркаса. Механизм объясняют вековым выщелачиванием солей (с потерей прочности до 30 %), приводящим к снижению активности глинистых минералов в поровой жидкости и последующему росту чувствительности [13].

Сложные оползни — это массивные движения, сочетающие в себе два или более типов механизмов смещения (таких как обрушения, опрокидывания, потоки или ротационные/трансляционные оползни) в одном событии. Эти оползни обычно вызываются такими факторами, как экстремальные дожди, эрозия или антропогенная деятельность [20].

Классификация Варнеса (1978) [146] является одной из наиболее полных и широко используемых. В дальнейшей работе она используется как основная классификация. Она в основном построена на геоморфологических характеристиках оползней. В этой классификации различают типы оползней (рисунок 1.3), среди которых можно выделить следующие:

- обвал — это движение части грунта или горной породы в виде отдельных или массивных блоков, которые на значительной части своей траектории спускаются по воздуху в свободном падении, где происходят прыжки, отскоки и перекаты [146].

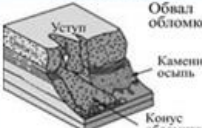
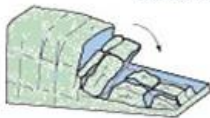
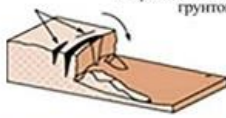
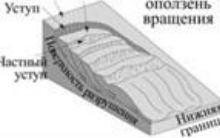
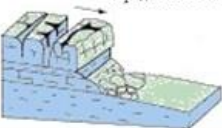
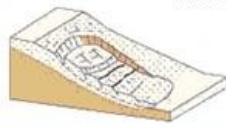
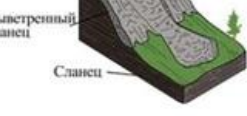
Тип движения	Тип материала		
	Скальные породы	Обломочные	Грунтовые
Обвалы			
Опрокидывание			
Оползни скольжения	Вращательные 	Вращательные 	Вращательные 
	Трансляционные 	Трансляционные 	Трансляционные 
Оползни разжижения			
Оползни-потоки			
Сложные оползни	Сочетание двух и более основных типов движения 		

Рисунок 1.3 – Классификация оползневых процессов по Варнесу, 1978 [146]

- опрокидывание – это внешнее вращательное движение блока или набора блоков вокруг оси вращения, расположенной ниже центра тяжести перемещаемой массы [146].

- оползни скольжения – это относительно быстрые движения вниз массы грунта или породы, происходящие вдоль одной или нескольких определенных поверхностей, которые видны или о которых можно сделать обоснованное предположение. Считается, что мобилизованная масса движется как единый блок, и в зависимости от

описываемой траектории оползни могут быть вращательными или поступательными [1456].

- оползни выдавливания — это тип, в котором доминирующим движением является боковое пластическое выдавливание, сопровождаемое сдвиговыми или растягивающими трещинами, которые иногда бывает трудно обнаружить [146].

- потоки — это движение неорганизованной или смешанной массы, в которой не все частицы движутся с одинаковой скоростью, а их траектории не должны быть параллельными. В результате перемещаемая масса не сохраняет свою форму при движении вниз, часто приобретая лопастную или коническую морфологию [146].

- сложные оползни — это движения, возникающие в результате комбинации двух или более типов элементарных движений, описанных выше. Эти движения обычно достигают больших размеров, иногда затрагивая целые склоны [146].

1.1 Применение моделей в прогнозировании региональной оползневой опасности

В настоящее время прогнозирование оползневой опасности стало основополагающим направлением для понимания динамики оползневых процессов с целью управления ими в случае аварии. Согласно определению, принятому Управлением координатора ООН по оказанию помощи в случае стихийных бедствий, природная опасность определяется как вероятность возникновения потенциально разрушительного явления в течение определенного периода времени и на определенной территории [143]. Прогноз оползней можно рассматривать как вероятность разрушения склона под влиянием ряда геологических, гидрогеологических, геометрических, геоморфологических, метеорологических и других природных факторов [29]. В случае прогнозирования оползневой опасности речь идет о выявлении районов с потенциально неустойчивым сценарием путем анализа факторов, связанных с неустойчивостью [97, 104].

Факторы восприимчивости – это те, которые являются неотъемлемой частью свойств и поведения окружающей среды, то есть они представляют собой пассивные элементы. Восприимчивость указывает на предрасположенность местности к возникновению оползней при наличии внутренних факторов, таких как геоморфологические, инженерно-геологические и др. Однако следует отметить, что восприимчивость местности к возникновению оползней не включает в себя временной аспект и не зависит от возникновения или отсутствия данного явления.

Триггерные факторы – это те внешние факторы, которые вызывают активное динамическое поведение и которые, исходя из начальных условий восприимчивости, будут вызывать большую или меньшую интенсивность оползневого процесса. Обычно к ним относят осадки или землетрясения.

Для регионального прогнозирования оползней необходимо учитывать, что опасность (H) выражается как функция восприимчивости местности к оползням (S) к фактору, вызывающему оползень (T), (1.1) [76]:

$$H = f(S, T) \quad (1.1)$$

Существует множество методов прогнозирования региональных оползней в зависимости от методов, используемых для их построения, и ни один из них не устанавливает строго исключительных категорий по отношению к какой-либо другой модели. Различные типы моделей прогнозирования оползней возникали одновременно с течением времени.

Методы прогнозирования также широко используются исследователями, занимающимися изучением оползней. Выбор методов зависит от цели анализа, масштаба изучаемой территории, качества и объема данных, а также технических ресурсов, имеющихся в распоряжении исследователя. В настоящее время для достижения максимальной точности исследования и прогнозов используются комбинированные методы. Эти модели учитывали как факторы восприимчивости к оползням, так и факторы, вызывающие оползни, и использовались независимо или в

дополнение друг к другу, уделяя особое внимание работе с наблюдаемыми данными, подгонке распределений и моделированию неопределенности.

Ряд исследователей посвятили себя созданию прогностических моделей, учитывающих несколько факторов, влияющих на возникновение оползней, таких как интенсивные осадки [63], сейсмическая активность [98], характеристики грунтов и горных пород [58], геоморфологические [44, 84, 159] и гидрогеологические факторы [122], тектонические разломы [23], растительность и землепользование [116, 128]. Некоторые из этих явлений также возникают в результате антропогенной деятельности, например, строительства дорог [130], изменения уровня грунтовых вод [113], наличия предыдущих оползней [129] и промышленной деятельности [59]. Однако большинство этих исследований посвящено оценке воздействия на территории, где сосредоточено большое количество населения, и в меньшей степени - в районах разработки месторождений или перспективных для горнодобывающей деятельности.

Методы, связанные с лазерным сканированием, для построения цифровых моделей местности с целью получения зависимости между деформациями грунта и неустойчивостью склонов и откосов [4, 10], или использование беспилотных летательных аппаратов для создания подробных карт восприимчивости, включая сложные или труднодоступные местности [67], повысили точность обнаружения и прогнозирования этих явлений, хотя эти методы обычно использовались для определения восприимчивости местности к оползням.

В других исследованиях методы дистанционного зондирования, основанные на наблюдении геоморфологических и экологических закономерностей, сочетаются с моделированием и составлением карт восприимчивости к оползням, которые опираются на информацию из кадастровой базы данных [26, 57, 103], что помогает оценить прогностическую способность моделей. Несмотря на эффективность этих методов, в большинстве случаев результаты зависят от качества инвентаризации оползней.

Оценка оползневой опасности с помощью прогностических моделей также подвержена влиянию высокой неопределенности, поскольку прогноз обусловлен факторами, которые не всегда полностью понятны, а иногда и неизвестны [99]. Многие исследователи на протяжении многих лет изучали аспекты возникновения оползней в открытых карьерах, разрабатывая методы геомеханического мониторинга [12], занимались разработкой методик измерения деформаций в карьерах, которые могут вызвать оползни [11, 16] или изучением механизмов развития оползней с помощью количественных методов [6, 73].

1.2 История изучения оползневого процесса на Кубе

Для анализа были использованы несколько работ, выполненных в разных частях Республики Куба. Первые исследования по этой теме на востоке Кубы были проведены Карменате Х.А. (1996) [45]; автор провел оценку и классификацию почв и горных пород на основе их физико-механических свойств, в результате чего была составлена инженерно-геологическая карта масштаба 1:10 000 и проведено зонирование территорий, подверженных возникновению экзогенных геологических явлений, таких как оползни, представляющих опасность для населения и экономических целей. Исследование ограничивается только предоставлением зонирования с учетом физико-механических свойств почвы и не оценивает другие возможные факторы.

Кастельяно А.Е. (2000, 2008) [47, 49] изучает риск оползней в муниципалитете Сан-Антонио-дель-Сур, провинция Гуантанамо в качестве тематического исследования, где геология, геоморфология и тектоника были фундаментально рассмотрены с использованием географической информационной системы как инструмент для управления риском оползней. Согласно Варнесу (1978) [146], он классифицирует некоторые оползневые процессы в этом районе как падение блоков, потоки, опрокидывание и оползни.

Кастельяно А.Е. (2005) [48] показаны результаты анализа риска для Кубинского архипелага, анализ для создания карт, полученных на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), и геоморфометрическая оценка оползневой опасности. Анализ и обработка выполнены с использованием методов географической информационной системы и программного обеспечения для дистанционного зондирования. Картирование восприимчивости Кубинского архипелага проводится с использованием полученных с помощью ЦМР карт, таких как угол наклона и внутренний рельеф (вертикальное расчленение), показывающих наиболее подверженные оползням участки, которые совпадают с наибольшими значениями морфометрических факторов. Однако процедура присвоения весов каждому анализируемому фактору проводится без учета пространственного распределения оползней, а только с учетом совпадения с горными системами страны и определяется по хребтам, которые могут вызвать большую или меньшую степень оползневых разрывов на склонах в соответствии с критериями автора, что порождает субъективность исследования.

С тех пор исследования продолжались, углубляя анализ природы и типологии оползней в латеритных корах, что привело к появлению работы Гуардадо Р. и Альмагера Ю. (2001) [73], в которой представлена первая приближенная карта риска для месторождения Пунта-Горда, полученная на основе наложения нескольких карт таких факторов, как литология, тектоника и откосы, с акцентом на положение горных дорог и расположение экскаваторов на фронтах разработки. Анализ влияния факторов на нестабильность проводился с применением эвристических методов, представляя карту рисков по горным блокам с очень низкой детализацией.

Впоследствии в работах Альмагуэр Ю. (2005) [36, 37] применены детерминированные методы расчета устойчивости откосов с использованием критериев разрушения, основанные на интегральном исследовании трещиноватости горно-почвенного массива и геомеханической оценке серпентинизированного горного массива. В исследовании особое внимание уделяется геотехническим

характеристикам, литологии, гидрогеологическим условиям, землепользованию и геоморфологии.

В частности, для картирования оползней Чанг Ж.Л. и другие (2005) [51] показали применение региональных геофизических данных, таких как данные воздушной спектрометрии с учетом пространственного распределения природных радиоэлементов в окружающей среде, выявление потенциально благоприятных участков для возникновения оползней в качестве дополнительной информации при анализе восприимчивости земель к разрыву в результате развития оползней.

Гонсалъес Д.Е. и другие (2005) [71] охарактеризовали городскую среду поселка Мариэль и определили геологические явления, представляющие опасность для территории, оценили периоды их повторяемости и зоны воздействия [71]. Они провели сейсмическое микрозонирование на основе геологии, обработки и анализа микроземлетрясений антропогенного происхождения, оценили уязвимость, компоненты которой включают фискальные и экологические факторы, влияющие на способность населения реагировать на потенциальную катастрофу, вызванную опасными геологическими явлениями, и уязвимость застроенной среды к экстремальным сейсмическим событиям и оползням на плато Мариэль.

Педросо И.И. и другие (2005) [108] провели оценку опасностей, уязвимости, геолого-геофизических и технологических рисков муниципалитета Плайя, Сьюдад-Габана на основе характеристики физической среды, застроенной среды и социально-экономической среды, используя в качестве отправной точки точные Сценарии опасностей. Анализ различных данных позволил получить информацию о характеристиках провоцирующих элементов, таких как землетрясения, проливные дожди и сильные ветры, потенциальные генераторы землетрясений, оползни, проседание грунта, наводнения и проникновение моря.

Кабрера Х. (2005) [43] показывал в общих чертах инженерно-геологический кадастр провинции Пинар-дель-Рио, основанный на теоретической оценке факторов, которые должны быть приняты во внимание при оценке инженерно-геологических

условий территорий. В ней устанавливаются критерии, определения и соображения о том, как их учитывать в зависимости от степени важности, начиная с выведения и интеграции соответствующих факторов, определяя, в свою очередь, картографические результаты, которые должны быть получены при каждом действии. Анализ начинается с того, что оценка инженерно-геологических условий основывается на влиянии на окружающую среду природных условий, таких как климат, рельеф и геоморфологические условия, тектонические и стратификационные условия, литолого-петрографические особенности пород, гидрогеологические условия, физико-геологические явления и хозяйственная инфраструктура. Принятый метод основан на получении серии карт в результате реклассификации и наложения двух основных тематических карт - топографической и геологической.

Эскобар Э.М. (2005) [62] показывает применение комплекса геофизических методов, таких как трехканальная рефракционная малоглубинная сейсмика, электрические методы (вертикальное электрическое зондирование), сейсмометры и аэрогеофизические данные при решении задач оценки сейсмической уязвимости. В результате получены физико-механические свойства грунтов на площадке промышленных работ, оценены геологические явления, в том числе оползни, возникающие в результате индуцированных микросейсмических событий, определяя коэффициенты усиления грунтов, их связь с конструктивными воздействиями и сложившимися геологическими условиями, а также картированы возможные аномальные тектонические зоны, отраженные геологическими разрывами через физические поля.

Чуй Т.Дж. и другие (2005) [54] провели анализ природных явлений в муниципалитете Гуантанамо, их хронологию и оценку негативных последствий, вызванных этими явлениями, включая землетрясения, оползни, разрушение плотин, динамическую реакцию грунта, тропические ураганы, торнадо, интенсивные и кислотные осадки, наводнения, засухи, засоление, опустынивание, деградацию грунта, городские пожары, лесные пожары и технологические аварии. В разделе,

посвященном оползневым явлениям, приводится анализ восприимчивости нескольких населенных пунктов в зависимости от величины вертикального расчленения и уклона местности, однако выбор районов не соответствует районам с наибольшей частотой оползней. В данном исследовании также использовались качественные и полуколичественные методы.

Каренно Б. (2005) [46] составил карту оползней с использованием компьютерных систем, применяя классические геоморфологические критерии для определения выравниваний, обработанных с помощью цифровой модели рельефа, и, наконец, получил кинематический анализ выравниваний, которые потенциально склонны вести себя как структурные разломы. Однако, несмотря на то, что карта составлена на основе цифровой модели рельефа с указанием вероятных тектонических структур и схемы районирования вероятных движений масс, авторы не представили кадастр оползней на исследуемой территории для подтверждения полученной карты.

Рейес К.Р. (2005) [123] провели анализ поведения пассивных факторов (рельеф, геологические и геотехнические характеристики формаций) и активных факторов (критерий магнитуды-расстояния землетрясений), которые действуют на устойчивость грунтов и горных пород в восточных провинциях Кубы. Кроме того, они предлагают схему зонирования в соответствии с восприимчивостью к оползням или обвалам на откосах дорог, вызванным землетрясениями сильной или средней интенсивности, с учетом факторов рельефа и геологического строения. К факторам, вызывающим оползни, относятся землетрясения и влияние атмосферных осадков, причем последние считаются наиболее важным катализатором этого явления.

Савон-Васиано и другие (2016) [134] провели оценку опасности гравитационных движений в провинции Гуантанамо. Использованы метод взвешенной суммы факторов и изоиетическая карта максимальных осадков за 60 лет для получения цифровой модели максимальных многолетних осадков. Используемая методология не учитывает инженерно-геологические аспекты

существующих формаций, не включает морфометрические элементы, активную тектонику и исключает влияние антропогенного воздействия.

Гальбан и Гуардадо (2016) [66, 72] разработали методику, основанную на уровнях важности переменных, влияющих на развитие оползневых процессов, и предложили математическую формулировку для их определения с помощью геоинформационной системы (ГИС). В данном случае литологическая восприимчивость рассматривается как интеграция инженерно-геологических аспектов, таких как чередование твердых и слабых пород, стратификация и породы, подвергающиеся процессам выветривания. Кроме того, исследователи не предусматривали прямых полевых испытаний для подтверждения своих результатов, хотя и использовали другие косвенные методы.

Росабаль (2009, 2018) [124, 125] оценила восприимчивость к оползневой опасности и разжижению грунтов, вызванных сейсмической активностью, в районах на юго-востоке Кубы и в местечке Бельтран на севере Гуантанамо на основе интеграции морфометрических методов, активной тектоники и сейсмологического анализа. В этом исследовании было получено зонирование подверженности оползням на этих территориях с учетом только эвристических методов, основанных на использовании морфометрических показателей и анализе активного характера основных разломов.

Поспехов Г.Б. и другие [26, 114] провели кадастр оползней после прохождения урагана Мэтью в 2016 году на востоке Кубы и установили связь некоторых геоморфологических, геологических и климатических факторов с возникновением оползневых процессов. Сделан первый подход к расчету критических значений количества атмосферных осадков для возникновения оползней. Поспехов Г.Б. и другие (2023, 2024) [25, 115] используют комбинацию методов экспертных критериев, вероятностных методов и географических информационных систем для изучения оползневых процессов как нарушителя некоторых экосистем Национального парка Алехандро де Гумбольдт и зонирования оползневой опасности в муниципалитете

Ятерас и провинции Гуантанамо. Изучив факторы восприимчивости и триггеры оползневых процессов, они пришли к выводу, что осадки являются наиболее важным триггерным фактором для северо-восточной Кубы [24].

В этом же районе Афанасьев П.И. и другие (2024) [1] провели анализ детерминистическими методами на основе инженерно-геологических исследований для определения коэффициента безопасности карьерной дороги на никелевом месторождении Камариока-север. Исследование подтвердило важность инженерно-геологических характеристик и осадков как одного из основных параметров, влияющих на устойчивость откосов.

1.3 Современные проблемы прогнозирования возникновения и развития оползней в процессе геологоразведки для открытых горных работ

В северо-восточном регионе Кубы находится множество месторождений полезных ископаемых и перспективных районов для развития горнодобывающей промышленности. Наибольшего расцвета горнодобывающая промышленность восточной Кубы достигла в период с 1975 по 1989 годы благодаря сотрудничеству с бывшим Советским Союзом и странами Восточной Европы, которое способствовало развитию никелевой промышленности. Эта отрасль составляла 6 % от общего объема экспорта горнодобывающей промышленности страны, который в этот период превысил 317,4 млн песо, достигнув в 2021 году объема экспорта в 5145,1 Мт [107].

В регионе сосредоточены большие запасы и добыча так называемых критических минералов [85], включая никель, кобальт, хром и другие, такие как медь, которые играют фундаментальную роль в энергетическом переходе как ключевые факторы для электрификации, электромобильности и цифровизации [64].

В Республике Куба предвидение рискованных ситуаций, связанных с возникновением геологических явлений, предусмотрено следующими правовыми нормами: Закон № 76 «О горном деле», устанавливающий общие принципы поиска, разведки, эксплуатации, переработки и коммерциализации минеральных ресурсов на

Кубе, и Декрет-закон № 226 «Горный кодекс», регулирующий технические и правовые аспекты горной деятельности, включая такие вопросы, как безопасность и оценка рисков любого характера при разведке и эксплуатации минеральных ресурсов [155]. Создание данной нормативно-правовой базы делает анализ оползневой опасности массива Сагуа-Баракоа весьма актуальным, учитывая, что в силу сложности топографических, инженерно-геологических и климатических условий в этом районе ускоряются опасные геологические процессы, которые в будущем могут осложнить условия предварительной разведки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

Несмотря на достижения в области прогнозирования оползней во всем мире, в исследуемой области сохраняются серьезные проблемы, такие как нехватка данных в труднодоступных горных районах, ограничения в существующих методах оценки, состоящих из эвристических методов с качественными и полуколичественными подходами, которые отличаются высокой субъективностью и ограниченной способностью прогнозировать сложные события, вызванные множеством одновременных факторов и в определенных климатических или географических условиях, что влияет на точность прогнозов и возможность эффективной оценки экономических последствий [53].

Другая проблема связана с ограничениями мониторинга в реальном времени в уязвимых районах и увеличением числа экстремальных погодных явлений, вызывающих интенсивные осадки, обусловленные изменчивостью и изменением климата, что затрудняет прогнозирование оползней. Для оценки опасности используются так называемые периоды оползней, основанные на сходстве условий, исходя из предположения, что существующие и будущие условия аналогичны тем, которые привели к возникновению события в прошлом; однако условия могут быть не совсем одинаковыми. Изменения в тренде таких переменных, как осадки, вызванные влиянием изменения климата, особенно в горной местности, могут изменить установленные схемы накопления осадков и, следовательно, возникновения

оползней. Поэтому важно интегрировать методы, позволяющие прогнозировать и анализировать будущие сценарии с учетом не только внутренних факторов, обуславливающих восприимчивость склонов и холмов, но и осадков как основополагающего элемента, вызывающего оползни.

Эти проблемы подчеркивают необходимость перехода к интеграции методов, способных анализировать большие объемы данных с большей точностью, разрабатывать схемы развития оползневых процессов для прогнозирования зон повышенной опасности в горнодобывающих районах массива Сагуа-Баракоа и тем самым добиваться эффективности и результативности в выборе технологий, связанных с разработкой месторождений полезных ископаемых.

1.4 Перспективный анализ прогноза оползней в массиве Сагуа-Баракоа

Прогнозирование оползней в горнодобывающих районах массива Сагуа-Баракоа представляет собой сложную задачу, поскольку эти районы обычно подвержены топографическим и инженерно-геологическим изменениям в результате геологоразведочных и добычных работ. Основной целью прогноза должно быть прогнозирование будущих сценариев с учетом сочетания природных и антропогенных факторов, влияющих на неустойчивость откосов. Помимо факторов, определяющих восприимчивость откосов к оползням (рельеф, геология, гидрология, антропогенные факторы и другие), следует учитывать изменения в режиме выпадения осадков, которые прямо пропорционально влияют на насыщенность грунта и колебания уровня грунтовых вод - фундаментальные элементы, способные повлиять на устойчивость откосов.

Для регионального прогнозирования оползней в районах открытых горных работ крайне важно использовать междисциплинарный подход, сочетающий множество факторов, таких как водонасыщенность грунта, тип породы и геотехнические характеристики рельефа. Этот подход особенно актуален для изучения устойчивости склонов на открытых горных разработках, где знание

критических оползневых зон имеет решающее значение для поддержания безопасности и эффективности горных работ.

Необходимо разработать новые методики мониторинга, при этом ключевую роль в улучшении прогностических возможностей играет использование дистанционного зондирования, мониторинга в режиме реального времени и систем раннего оповещения. В настоящее время прогнозирование оползневых процессов представляет собой тенденцию, обусловленную развитием технологий и использованием данных высокого разрешения. Две основные группы, составляющие эти новые тенденции, - это захват и автоматическое получение данных и использование передовых методов моделирования. В рамках первой группы расширяется применение дистанционного зондирования с использованием спутниковых снимков (Sentinel, Landsat и другие) и датчиков, таких как Лидар, которые являются источником информации для получения топографических и геоморфологических данных высокого разрешения и мониторинга проседания и деформации местности, что позволяет оценить нестабильность поверхности земли и восприимчивость к оползням.

В последние десятилетия наметилась тенденция к использованию снимков дистанционного зондирования для идентификации оползневых процессов на основе условий местности, изменений рельефа местности, различий в растительности и других аспектов для создания общих схем обнаружения [90, 104, 151]. В районах с высокой оползневой уязвимостью очень эффективно использование локальных методов, таких как наземное лазерное сканирование и беспилотные летательные аппараты для детального мониторинга изменений поверхности земли и картирования конкретных территорий с высоким пространственным и временным разрешением [158].

Возникновение и развитие оползней зависит от широкого спектра факторов, которые часто неполно известны или совсем неизвестны. Связь между факторами, контролирующими процесс, и наблюдением за ним обычно нелинейна. Методы,

используемые для анализа оползней, будь то качественные или количественные подходы, устанавливают линейную зависимость между опасностью и анализируемыми факторами. Альтернативой являются методы, разработанные в контексте искусственного интеллекта, особенно машинного обучения, которые отличаются высокой степенью адаптивности и гибкости, поскольку их можно обучать на основе различных доступных данных: от спутниковых снимков до локальных измерений на месте; они обладают большими временными возможностями, поскольку, помимо пространственного прогнозирования, позволяют проводить краткосрочный прогнозный анализ путем включения временных рядов провоцирующих факторов, таких как осадки, и способны прогнозировать оползни в краткосрочной перспективе.

Среди наиболее широко используемых методов машинного обучения можно отметить такие алгоритмы, как случайный лес (Random Forest), метод опорных векторов (Support Vector Machines) [94] и градиентный бустинг (Gradient Boosting) [136, 161] для классификации и прогнозирования районов, подверженных оползням, а также искусственные нейронные сети и глубокое обучение [80, 81] для повышения точности прогнозов.

1.5 Выводы по Главе 1

1. Наиболее полной классификацией оползней, объединяющей различные виды и типы деформаций на склонах и откосах, в том числе для условий территории массива Сагуа-Баракоа на острове Куба, является классификация, предложенная Д.Дж. Варнесом. Помимо этой классификации, в работе применяются понятия факторов восприимчивости и провоцирующих факторов по Мору и Варсон (1994) [104].

2. История изучения оползневых процессов на Кубе отличается использованием методов, в которых преобладали качественные и полуколичественные подходы. Проведенные ранее исследования были направлены на анализ и оценку риска

оползней и составление карт для определения районов с высокой восприимчивостью, принимая во внимание различные факторы, такие как геоморфология и геология, или провоцирующие факторы, такие как осадки, с помощью эвристических методов с качественными и полуколичественными подходами, такими как методы иерархического анализа и геоморфологические методы.

3. Большинство оползней на Кубе вызвано осадками как в западной части Кубы, так и в северо-восточной. Поэтому выявление взаимосвязи между факторами восприимчивости к устойчивости склонов и осадками как триггерным фактором имеет важное значение для оценки оползневой опасности, и поэтому в диссертационной работе им уделяется особое внимание. В юго-восточной зоне исследования направлены на рассмотрение землетрясений как основного триггерного фактора оползней.

4. В районе исследования на территории массива Сагуа-Баракоа на острове Куба существующие проблемы, связанные с прогнозированием оползней, обусловлены нехваткой данных в труднодоступных горных районах, ограничением применения современных методов мониторинга и субъективностью исследований из-за используемых методов оценки. Перспективным направлением для улучшения региональных исследований оползней на Кубе являются интеграция методов оценки опасности и применение методов машинного обучения.

ГЛАВА 2 ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕЙ В МАССИВЕ САГУА-БАРАКОА

Массив Сагуа-Баракоа входит в горную группу Нипе-Сагуа-Баракоа и является одним из самых сложных горно-географических районов Кубы. Он занимает северо-восточную часть Кубинского архипелага, включающую 75 % территории провинции Гуантанамо и муниципалитет Моа в провинции Ольгин. Площадь этой территории составляет 5363,5 км², что составляет 57,4 % от общей площади горной группы Нипе-Сагуа-Баракоа (рисунок 2.1).

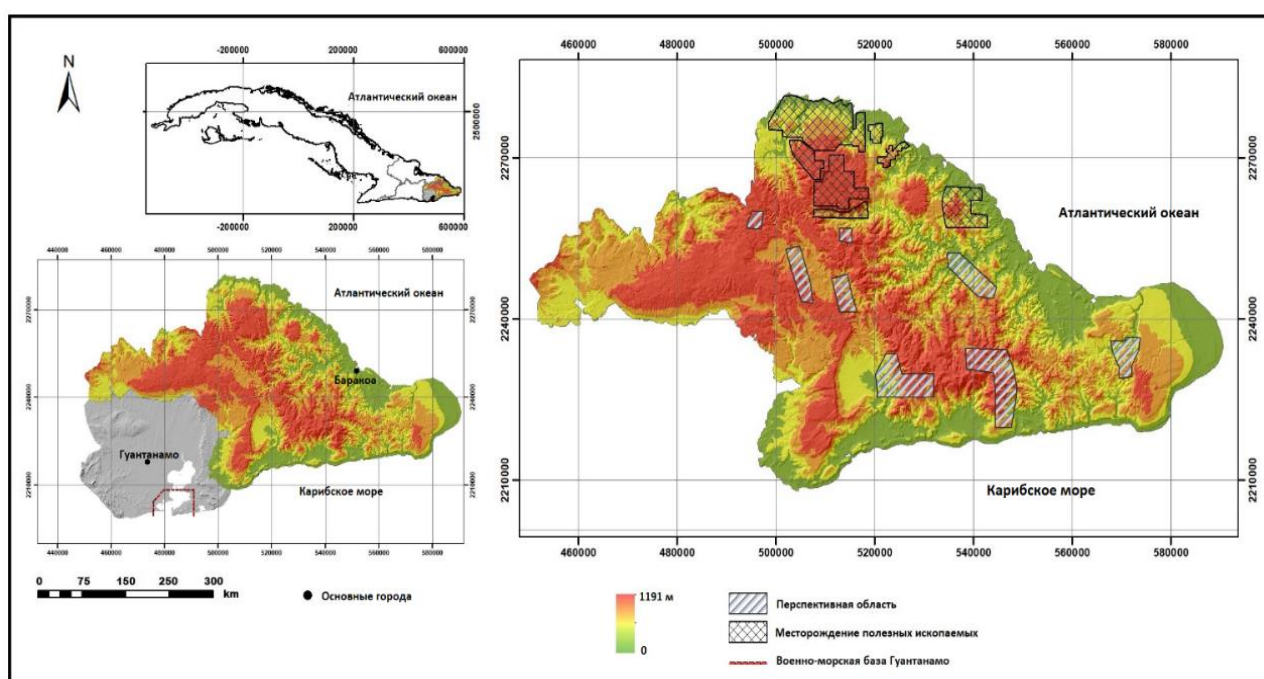


Рисунок 2.1 – Расположение области исследования (составлено автором)

Наиболее важной особенностью этой территории является ее физико-географическая и климатическая сложность, которая обусловила большое разнообразие природных ландшафтов с большим биологическим разнообразием и высоким флористическим и фаунистическим эндемизмом.

2.1 Климатические условия

В массиве Сагуа-Баракоа топография является основным фактором трансформации климата, создавая несколько топоклиматов, характерных для

местного климата, связанного с наличием гор [112]. В этом районе наблюдается наибольшая климатическая изменчивость на Кубе: здесь выделяются три типа климата по классификации Кёппена [109]. На северных склонах преобладает влажный климат тропических дождевых лесов (Af), во внутренних долинах – климат тропической саванны (Aw), а к югу от массива – полусухой климат (Bs). Средняя температура колеблется между 21 – 27 °С.

Относительная влажность воздуха высока в течение всего года, часто превышая 80 %. Этот регион является одним из самых дождливых на Кубе; на севере и северо-востоке выпадает наибольшее количество осадков в стране - более 3600 мм в год, в то время как на юге среднегодовое количество осадков составляет менее 600 мм, что благоприятствует засушливым условиям. На рисунке 2.2 видно, что в мае и сентябре-декабре выпадает наибольшее количество осадков, а также отмечается наибольшее количество дождливых дней.

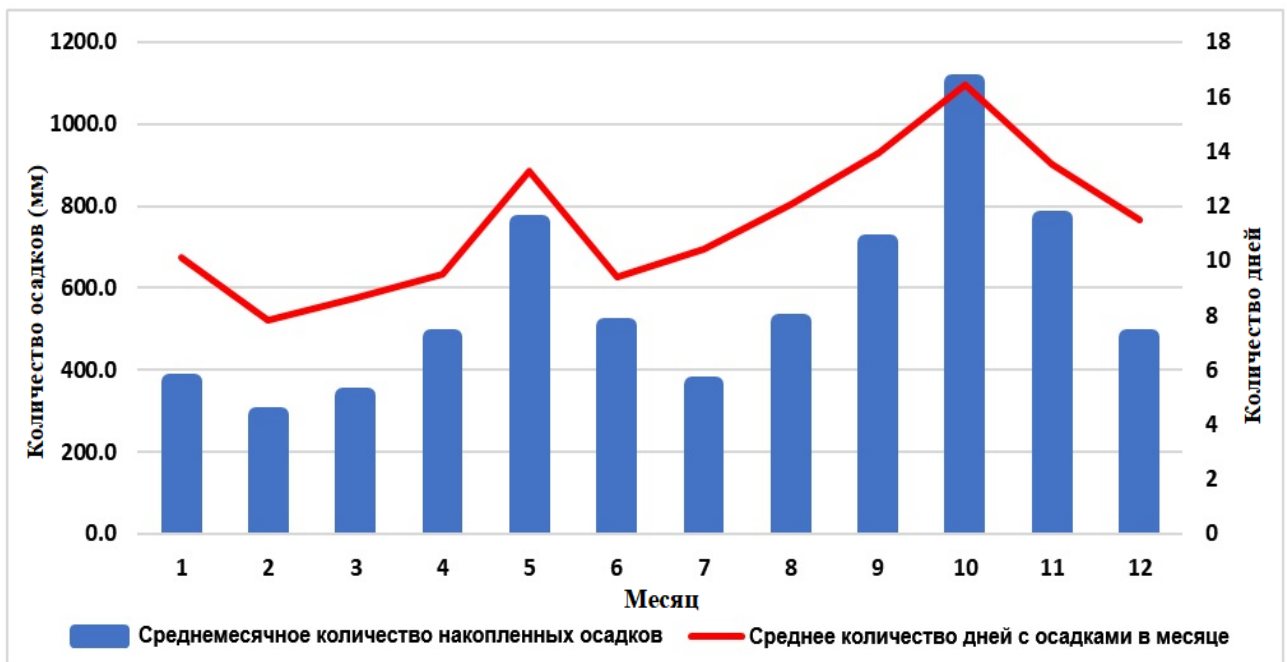


Рисунок 2.2 – Месячные данные о среднем накоплении осадков и днях с осадками в районе исследования (составлено автором)

2.2 Геоморфологические условия

Рельеф очень пересеченный (рисунок 2.3), с крутыми горами и глубокими долинами. Наиболее заметной возвышенностью являются Пуриальские горы, вершины которых превышают 1 200 м над уровнем моря.

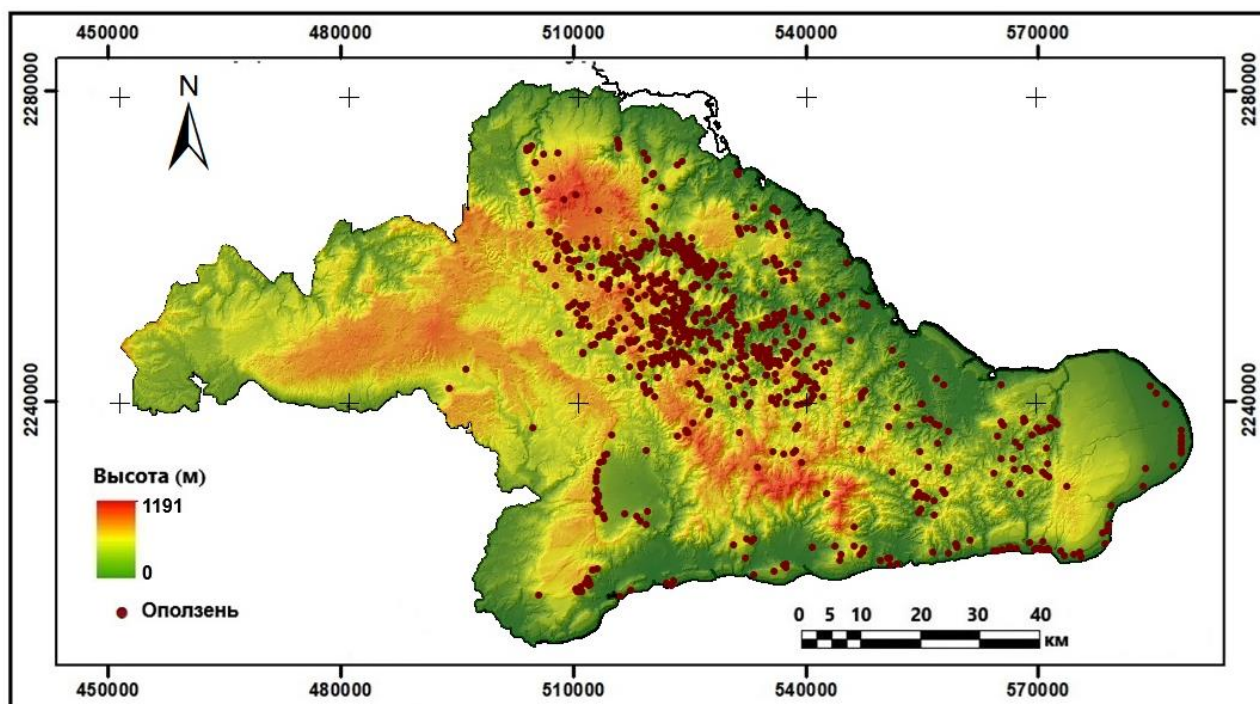


Рисунок 2.3 – Цифровая модель местности, показывающая высоту над уровнем моря
(составлено автором)

Рельеф характеризуется крутыми склонами, небольшими внутренними аллювиальными долинами, окруженными крутыми склонами, прибрежными равнинами и карстовыми зонами, что объясняет уникальные геологические особенности и высокое биоразнообразие территории. Здесь существует множество геоморфологических комплексов или единиц, среди которых особенно выделяются следующие [145].

Низкие денудационные горы состоят из невысоких гор с максимальной высотой 676 м над уровнем моря. В сочетании с большим количеством годовых осадков и высокой степенью трещиноватости они создают благоприятные геоморфологические условия для возникновения оползней.

Эрозионные горы литологически состоят из серпентинизированных ультрамафитов. Брекчированный или меланжевый аспект и наличие удлиненных и острых гребней влияют на оползневые процессы.

Денудационно-эрозионные холмы состоят из вулканических пород; морфологически их высота колеблется от 120 м до 3 000 м над уровнем моря.

Эрозионно-тектонический склон состоит из пород офиолитового и метавулканогенного комплекса, которые демонстрируют усиленный региональный метаморфизм; они подвержены эрозионным процессам и крутым склонам, что оправдывает более активное развитие дренажной сети в этом районе.

2.3 Геологическое строение

Исследуемая территория очень сложна с геологической точки зрения, что обусловлено наличием целого ряда геологических эпизодов, которые оказали значительное влияние на распределение и свойства присутствующих пород. Чтобы облегчить понимание этих эпизодов, геологические формации были сгруппированы в четыре фундаментальных комплекса пород: метаморфический комплекс, офиолитовый комплекс, комплекс вулканических пород и комплекс покровных пород, образованный осадочными породами (рисунок 2.4).

В центре и на севере района исследований развит офиолитовый комплекс с преобладанием пород древней океанической коры, с породами ультраосновного характера, с преобладанием хазбургитов, лерцолитов и серпентинизированных дунитов и мафическими породами, состоящими в основном из интрузивных тел, таких как габбро и дайки. Возраст – верхняя юра – нижний мел.

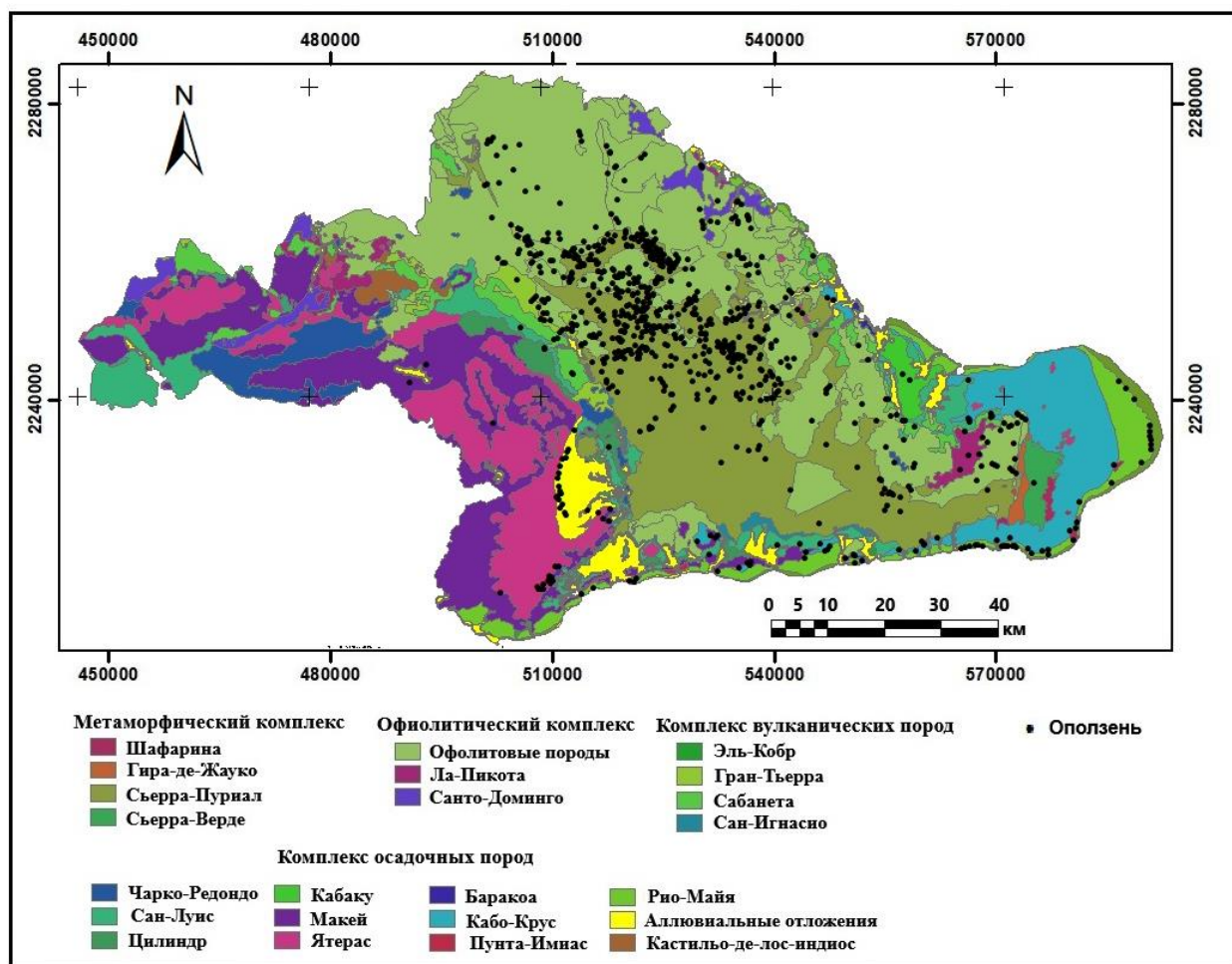


Рисунок 2.4 – Геологическая карта с изображением четырех комплексов с геологическими свитами на исследуемой территории (составлено автором)

К этому комплексу также приурочен макромеланж с остатками пород древней океанической коры и геологическими свитами:

- свита Ла–Пикота верхнемелового возраста (кампанский – маэстрихтский), сложенная полимиктовыми конгломератами с прослоями полимиктовых песчаников.

Комплекс вулканических пород представлен на данной территории вулканическими породами, развитыми в двух вулканических островных дугах: меловой и палеогеновой [86].

- свита Санто–Доминго – геологическая свита, обнажающаяся в районе исследования, развитая в меловой вулканической островной дуге. Она имеет нижнемеловой (аптский) - верхнемеловой (туронский) возраст, характеризуется

преобладанием пирокластического компонента в сдвигах, с прослоями мелкозернистой терригенной литофации, туффитов, эффузивов преимущественно андезито-базальтового и андезитового состава, с присутствием тел диоритов, кварцевых диоритов, габбродиоритов, габбродиабазов и диабазов, с ограниченным развитием известково-шистозитовых пород и известняков

Палеогеновая островная дуга [86] характеризуется низкой сложностью со структурной точки зрения и однородностью с литологической точки зрения. Основными свитами являются:

- свита Гран–Тьерра нижнепалеоценового (датского) возраста, состоящая из вулканомиктовых конгломератов, брекчий, мергелей, туфов, сцементированных кальцием вулканомиктовых песчаников, алевролитов и туффитов;

- свита Сабанета, нижний палеоцен (даниан, верхняя часть) – средний эоцен, состоящая в основном из кислых и средних туфов, с прослоями известковых туффитов, туфопесчаников, известняков, туфогенных конгломератов, алевролитов, мергелей, гравелитов и изредка небольших тел базальтов и андезитов;

- свита Эль–Кобре, возраст палеоцен-средний эоцен (нижняя часть), состоит из различных типов вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород. Среди наиболее распространенных пород – туфы, лавы, перемежающиеся с туффитами и известняками;

Породы осадочного чехла представлены осадочными породами с широким распространением, как правило, с плавными складками большого радиуса и достаточно горизонтальной стратификацией. Основными свитами являются:

- свита Чарко–Редондо, среднеэоценового возраста, состоит из компактных органодетритовых известняков, окаменевших, переменного цвета, преимущественно от белого до зеленовато-серого. В нижней части разреза часто встречаются брекчии, где преобладает толстая стратификация, а в верхней части - тонкая стратификация;

- свита Сан–Луис, средний эоцен (верхняя часть) – верхнеэоценовый возраст, состоит из полимиктовых песчаников, алевролитов, мергелей, глин, глинистых

известняков, биодетритовых известняков, песчаных известняков и полимиктовых конгломератов. Эта формация хорошо стратифицирована;

- свита Кастильо–де–лос–Индиос, возраст средний эоцен (верхняя часть) – верхний эоцен, представлена терригенными толщами, состоящими в основном из хорошо расслоенных мергелей, глинистых мергелей и известковых мергелей, с частыми прослоями мергелей, глинистых и биодетритовых известняков;

- свита Кабаку, возраст верхнего олигоцена - нижнего миоцена, нижняя часть. Сложена песчаниками и алевролитами (в основном из ультрамафитов и вулканитов) и отдельными линзами глинистых суглинков в нижней части разреза. Слоистость линзовидная;

- свита Макей, верхнеолигоценового - нижнемиоценового возраста (нижняя часть), состоящая в основном из алевролитов, песчаников, изредка глинистых пород и калькаренитов, в качестве прослоев, а также полимиктовых конгломератов с песчаным матриксом;

- свита Ятерас, возраст нижний олигоцен – нижний миоцен (нижняя часть), состоит из чередующихся детритовых, биодетритовых и биогенных известняков от мелко – до крупнозернистых, от мелко – до крупнозернистых до массивных, твердых, с переменной пористостью;

- свита Баракоа, возраст верхнего миоцена (верхняя часть) – нижнего плиоцена, состоит из крупнозернистых, твердых, несколько пористых, песчаных биодетритовых известняков. Иногда они содержат полимиктовые тонкозернистые гальки вулканитов, метавулканитов и ультрамафитов, которые образуют прослои с глинами, содержащими тонкозернистые гальки, калькаренитами, мергелями, песчаниками, а также полимиктовые тонкозернистые гальки в пластах, преимущественно средних и крупных, окаменевших, желтовато-коричневых до желтовато-коричневых, частично пестрых;

- свита Кабо–Круз, верхнемиоценового возраста, состоящая в основном из глинистых, окаменевших, красноватых или пестрых биодетритовых известняков, которые могут уступать место вторичным мергелям и конгломератам;

- свита Пунта–Имиас, возраст верхний миоцен - нижний плиоцен, образована терригенно-карбонатными толщами, полимиктовыми обломочными породами (в основном метаморфитами, ультрамафитами и известняками) и глинисто-суглинистыми известняками, калькаренитами, полимиктовыми и известковыми алевролитами, а также глинистыми суглинками. Она толсто- или тонкослоистая, линзовидная или параллельная;

- свита Рио–Майя, верхнеплиоценового - нижнеплейстоценового возраста, состоящая из очень твердых биогермных водорослевых, коралловых и микритовых известняков. Известняки часто доломитизированы. Содержание глины очень разнообразно. Они содержат интеркаляции мелкозернистых полимиктовых конгломератов и известковый цемент.

Области структурной слабости (разломы) связаны с перекрывающимися тектоническими эпизодами, способствовавшими деформации массива (рисунок 2.5).

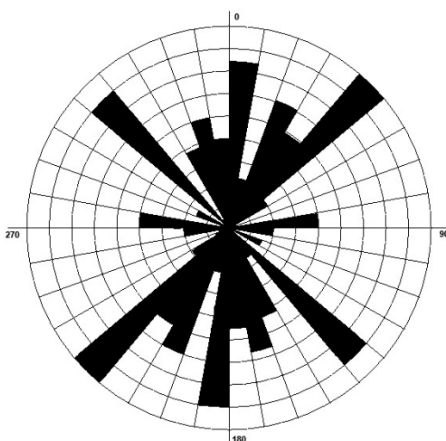


Рисунок 2.5 – Розеточная диаграмма, на которой показаны преобладающие направления систем разломов в массиве Сагуа-Баракоа (составлено автором)

Эти эпизоды, относящиеся к фазам структурных деформаций [84, 86], повлияли и на формирование комплексов пород на изучаемой территории. Фазы структурных деформаций следующие:

- фаза обдукции (верхний мел-кампан-маэстрихт – ранний палеоцен): привела к образованию гравитационных мантий и флишоидных комплексов с тектонической складчатостью, а также интенсивной трещиноватостью при сжатии. Она связана с метаморфическим комплексом и формированием офиолитового комплекса.

- фаза субдукции: связана с возникновением и развитием палеогеновой вулканической островной дуги. Зона наибольшей деформации в этот период времени (палеоцен – начало среднего эоцена) располагалась на юге, связанная с осевой дугой, присутствующей в Сьерра-Маэстра. На этом этапе сформировались породы комплекса вулканических пород.

- фаза трансформации и растяжения (средний эоцен - олигоцен): связана с процессами, опрокинувшими процесс субдукции, в результате которого образовались палеогеновые вулканические дуги и острова. Развитие океанической коры начинается от рифтовой зоны во впадине Бартлетт, к югу от восточных провинций. Это проявляется в рифтинге, направленном на северо-восток, связанном со сжимающими напряжениями и другими сдвиговыми системами, которые связаны с развитием Каймановой впадины.

- фаза трансформации и расширения неоплатформы: связана со структурами, возникшими в миоцене или с конца олигоцена, которые привели к образованию асимметричной антиклинали с разломами по простиранию, а также к реактивации в целом нормальных или субвертикальных разломов, некоторые из которых связаны с возникновением землетрясений. Появилась система разломов с востока на запад, которая может быть связана с недавним развитием Каймановой впадины.

В целом, системы разломов массива Сагуа-Баракоа проявляются в четырех основных направлениях: N45°E, N50°W, NS и EW (см. рисунок 2.5). Эти направления связаны с тектоническими событиями, описанными выше. Этот массив характеризуется высокой плотностью разломов (рисунок 2.6), которые могут влиять на стабильность массива из-за воздействия на механическую прочность породы, делая ее более восприимчивой к деформации и обрушению.

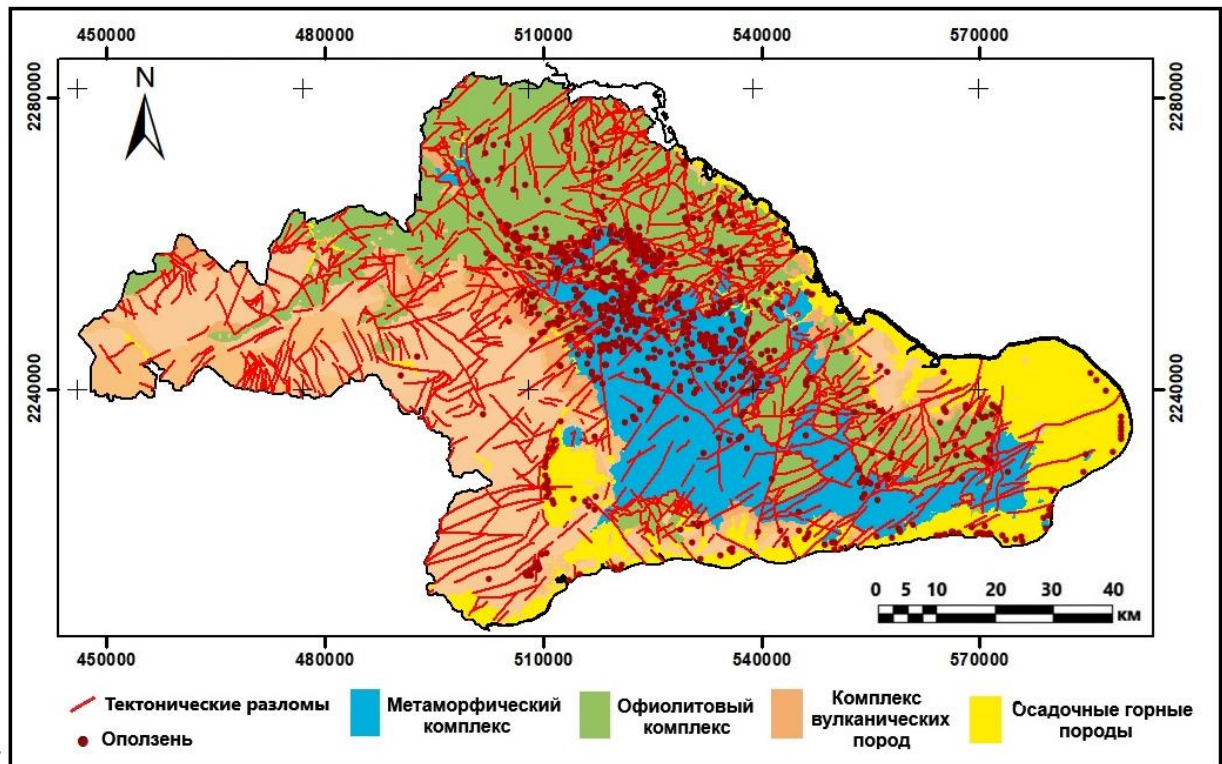


Рисунок 2.6 – Карта с изображением структурных слабостей в области исследования
(составлено автором)

2.4 Физико-механические свойства горных пород

Анализ физико-механических свойств горных пород играет важную роль в вопросе неустойчивости грунта, поскольку эти свойства определяют поведение горного материала при различных нагрузках и напряжениях. В таблице 2.1 приведены данные лабораторных исследований физико-механических свойств образцов пород различных литологических типов из области исследования.

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства свит в районе исследований [144]

Свита		Удельный вес (сухой), кН/м ³	Удельный вес (влажный), кН/м ³	Прочность на сжатие (в сухом состоянии), МПа	Прочность на сжатие (во влажном состоянии), МПа	Коэффициент размягчаемости грунта	Сцепление, с' кПа
Сьерра – Пуриал		27,4	26,4	20,5	9,7	0,47	н.д.
Сьерра-Верде		27,4	26,1	9,4	3,6	0,48	26,5
Шафарина		27,3	27,1	7,1	3,0	0,4	н.д.
офиолитового комплекса	Невыветренная порода	24,5	25,8	6,9	3,7	0,53	39,22
	Сапролит	21,0	22,3	7,8-11,8	5,8-8,8	0,65-0,75	12,5
	Переходная зона	22,5	23,7	2,0-4,0	1,1-2,3	0,40-0,55	13,1
	Ламонит	18,5	20,0	5,0-15,0	2,0-8,0	0,30-0,45	7,8
	Феррикрит	22,0	23,2	3,9	2,5	0,50-0,65	16,4
Эль-Кобре		27,07	25,8	45,8	33,4	0,6	н.д.
Сабанета		22,1	25,8	34,0-63,7	24,0-38,0	0,6	н.д.
Рио-Майя		26,8	22,07	25,5	12,5	0,48	н.д.
Кабо – Круз		25,3	25,8	33,9	15,0	0,47	н.д.
Ятерас		26,7	24,3-25,1	22,0-45,7	21,1-36,0	0,7	н.д.
Макей		26,8	21,6	10,8	7,9-13,1	0,4	0,4
Чилиндро		26,3	23,6	10,6	10,2	0,56	н.д.
Сан-Луис		26,6	19,4	10,3	6,4	0,42	0,6
Кастильо-де-лос-Индиос		22,3	19,1	26,0	15,1	0,6	н.д.
Чарко Редондо		26,4	25,4	24,6	21,3	0,95	н.д.

Эти свойства влияют на устойчивость склонов и, следовательно, на вероятность возникновения оползней. Например, при сравнительном анализе прочности на сжатие в сухом и влажном состоянии и коэффициента размягчения (рисунок 2.7), видно, что породы свиты Сьера – Пуриал, относящиеся к метаморфическому комплексу, свита Макей из группы осадочных покровных пород, свита Сабанета из вулканического комплекса и породы офиолитовой ассоциации имеют более высокий коэффициент размягчения, что может означать значительное снижение прочности на сжатие, особенно когда породы подвергаются воздействию влаги.

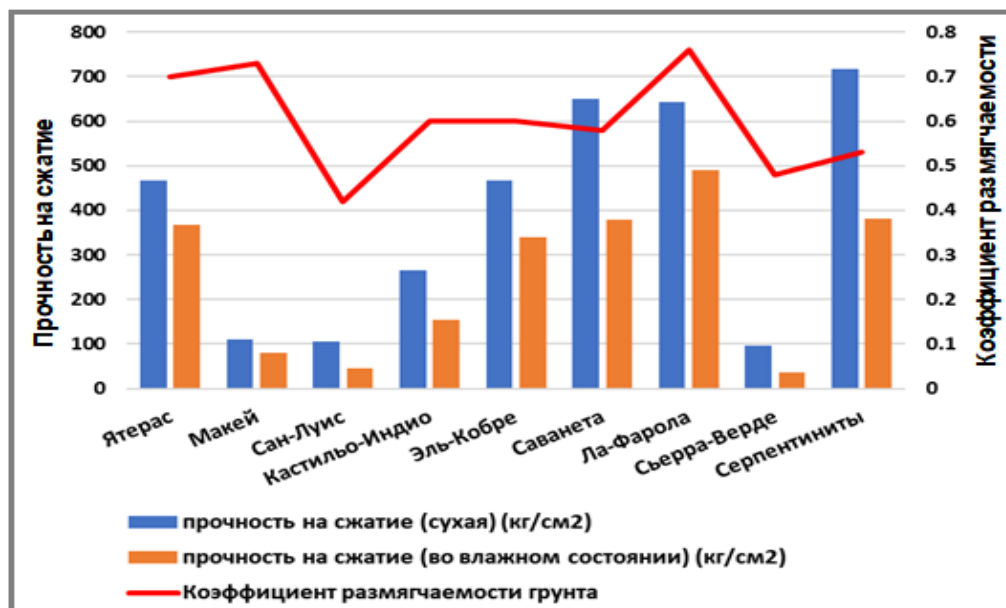


Рисунок 2.7 – Взаимосвязь между прочностью на сжатие в сухом и влажном состоянии и коэффициентом размягчения в геологических свитах области исследования (составлено автором)

2.5 Гидрография

Гидрография – это фактор, который может существенно влиять на возникновение оползней. Реки и ручьи могут размывать основания склонов, подрывая их подножие и вызывая неустойчивость. Район имеет густую гидрографическую сеть, распределенную в более чем 20 бассейнах первого порядка (рисунок 2.8), включая бассейн реки Тоа, которая выделяется как самая большая река на Кубе с

протяженностью 116,2 км, расходом 53,2 м³/с, плотностью дренажа 0,85 км/км² и средним стоком 56,60 м³/с. В этом бассейне происходит наибольшее количество оползневых процессов.

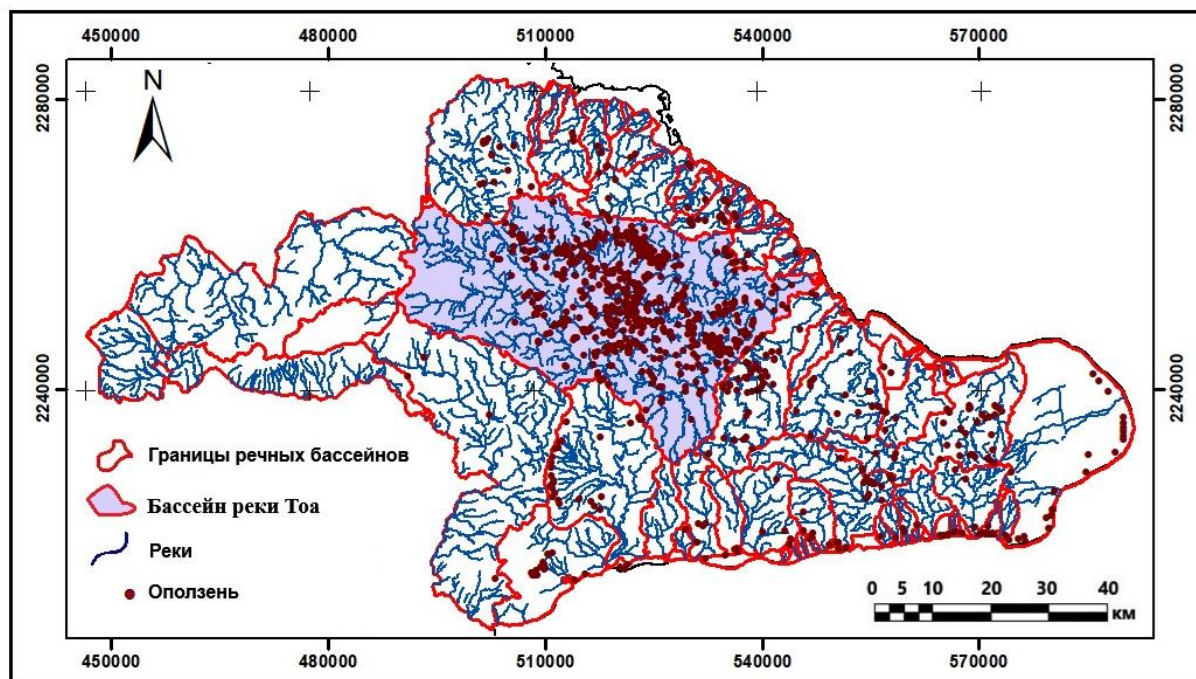


Рисунок 2.8 – Представление дренажной сети массива Сагуа-Баракоа
(составлено автором)

2.6 Гидрогеология

Гидрогеологические условия являются очень важным элементом для оценки оползневой опасности. Они в значительной степени зависят от распределения осадков и накопленных осадков, а также от других условий и физико-механических свойств грунтов и горных пород, таких как трещиноватость, пористость, коэффициент просачивания и др. Глубоких исследований по данной тематике в области нет. Район расположен в гидрогеологической зоне Маяри-Баракоа, и подземные воды совпадают с наиболее трещиноватой зоной серпентинитов. Затем было проведено региональное гидрогеологическое районирование территории, основанное на геогидродинамических условиях и геоструктурных характеристиках различных геологических формаций [56]. Массив Сагуа-Баракоа расположен в пределах

гидрогеологического массива Нипе-Баракоа, который характеризуется высокой деформацией, где преобладают серпентиниты, гарцбургиты и серпентинизированные дуниты с развитием трещинных вод и филлонеев, а в коре выветривания и в зонах разломов и их близости преобладают фреатические воды с локальными давлениями в зонах разломов, обусловленными в основном высокими капиллярно-восходящими свойствами латеритов [86].

2.7 Современные геологические процессы и явления

Геологическое строение, тектоника и климатические условия массива Сагуа-Баракоа благоприятны для развития различных геологических процессов, таких как выветривание, эрозия, сейсмологические процессы и оползни. Эти процессы наносят значительный ущерб экономике региона, поскольку напрямую влияют на разрушение инфраструктуры, такой как дороги, жилье и объекты обслуживания.

2.7.1 Выветривание

Бондарик Г.К. (2007) [7] указывает, что активизация и развитие вторичных геологических процессов, в частности оползневых, в значительной мере обусловлены таким первичным процессом, как выветривание. Выветривание, являясь ключевым процессом в массиве Сагуа-Баракоа, возникает при взаимодействии горных пород, слагающих приповерхностную часть земной коры, с космосом, атмосферой, биосферой и техногенными компонентами природной среды. В области исследований признается существование латеритной коры, образовавшейся в результате процессов выветривания ультраосновных пород. (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 - Латеритная кора, образовавшаяся в результате процессов выветривания в области исследования (фото автора)

2.7.2 Эрозионные процессы

Эрозионные процессы происходят естественным образом в мощной латеритной коре. Эти процессы усилились в результате антропогенной деятельности, связанной с добычей полезных ископаемых открытым способом и вырубкой лесов. В районе распространена ламинарная водная эрозия, которая представляет собой не что иное, как снятие тонких однородных слоев грунта под действием воды [92]. Широко развиты овраги, которые быстро увеличиваются в размерах со временем (рисунок 2.10 а, б) и направления которых в основном обусловлены структурными условиями остаточных грунтов и плювиометрическим режимом территории.



Рисунок 2.10 – Эрозионные процессы: а) эрозия в районе исследования (фото автора); б) эрозия на откосах никелевого месторождения (фото из архива горного управления компании «Эрнесто Гевара», Куба)

2.7.3 Сейсмичность

Сейсмичность - одно из природных явлений, которое в наибольшей степени влияет на возникновение оползней. Куба расположена в регионе с различными системами разломов со значительной сейсмической активностью. В работе, посвященной характеристикам сейсмичности на Кубе, указывается, что землетрясения происходят на всей территории страны, но наибольшая опасность находится в юго-восточной части страны, связанной с системой разломов Бартлетт-Каиман, где происходят землетрясения наибольшей силы и интенсивности [55]. В силу геолого-структурного положения массива Сагуа – Баракоа он характеризуется расположением в трех сейсмогенных зонах, совпадающих с глубинными разломами, которые представляют собой границы плит или межплитные границы (рисунок 2.11). К этим трем зонам относятся:

- Восточная сейсмогенная зона: она связана с транскуррентным разломом Бартлетт-Кайман, проходящим с востока на запад. Она представляет собой границу между Североамериканской плитой и Карибской плитой. Эта зона характеризуется самой высокой сейсмичностью на всей Кубе и связана с наиболее интенсивными землетрясениями с эпицентрами на Кубинском архипелаге. Средняя максимальная

интенсивность, прогнозируемая для этой зоны, составляет VIII баллов по шкале МСК, достигая IX баллов в секторе Сантьяго-Гуантанамо. Максимальная магнитуда – 8 баллов по шкале Рихтера.

- Сейсмогенерирующая зона Кауто-Нипе: она связана с одноименной зоной разлома, имеющей юго-западно-северо-восточное направление от окрестностей Никеро до залива Нипе. Она представляет собой межплитную границу, которая отделяет Кубинский восточный блок от остальной части острова. Сейсмический потенциал этой зоны достигает 7 градусов по шкале Рихтера, а сейсмическая интенсивность, согласно комплексной карте восточного региона Кубы, указывает на значения между VI и VII градусами МСК.

- Сейсмогенная зона Сабана: связана с разломом Сабана (Северо-Кубинский разлом) или шовной зоной между Восточно-Кубинским блоком и Северо-Американской плитой. Сейсмический потенциал изменяется в диапазоне от VI до VII градусов МСК, достигая максимальных значений в восточной части. Основные сейсмические очаги зоны расположены в точках пересечения с северо-восточным и северо-западным разломами, которые ее пересекают.

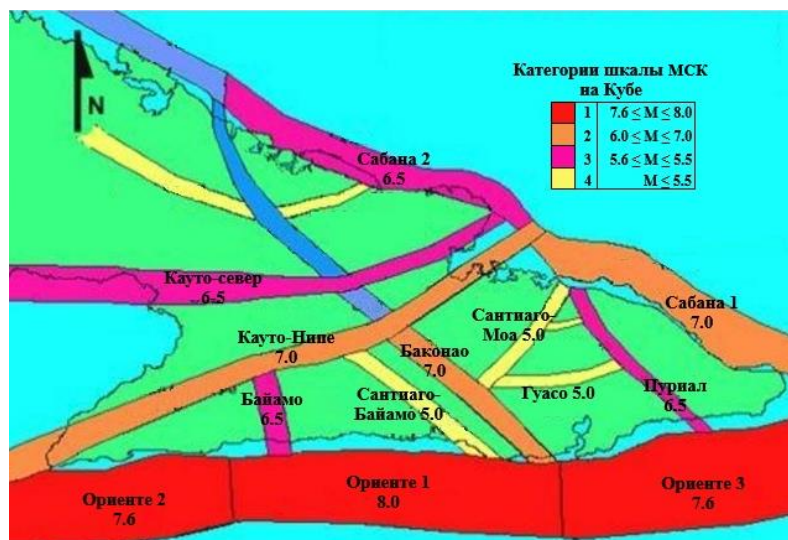


Рисунок 2.11 - Сейсмогенерирующие зоны в восточном регионе Кубы с указанием их сейсмической интенсивности по шкале МСК [55]

2.7.4 Оползневые процессы

Понимание закономерностей развития оползней является необходимым условием для оценки оползневой опасности. Данные об оползневых процессах в массиве Сагуа-Баракоа представляют собой очень ценную информацию для пополнения кадастра оползней в этом районе, а также для познания причин и условий, активизирующих механизмы возникновения этих явлений. Описание движений и определения различных механизмов основаны на работах, предложенных Варнесом (1978) [146], Ломтадзе (1977) [14] и Кюнтцелем (1980) [13].

Оползни скольжения, чьё движение характеризуется сдвиговыми напряжениями и смещением по одной или нескольким поверхностям, преимущественно распространены в центральной части района. Они часто формируются в породах метаморфического и офиолитового комплексов (рисунок 2.12), коре выветривания, а также осадочных толщах. Как правило, такие оползни активизируются по криволинейным поверхностям срыва (рисунок 2.13 и 2.14), реже — по плоскостным тектоническим нарушениям (рисунок 2.15).



Рисунок 2.12 - Вращающийся оползень на дороге Маиси-Баракоа: а) схема оползня [146]; б) фотография оползня (фото автора)

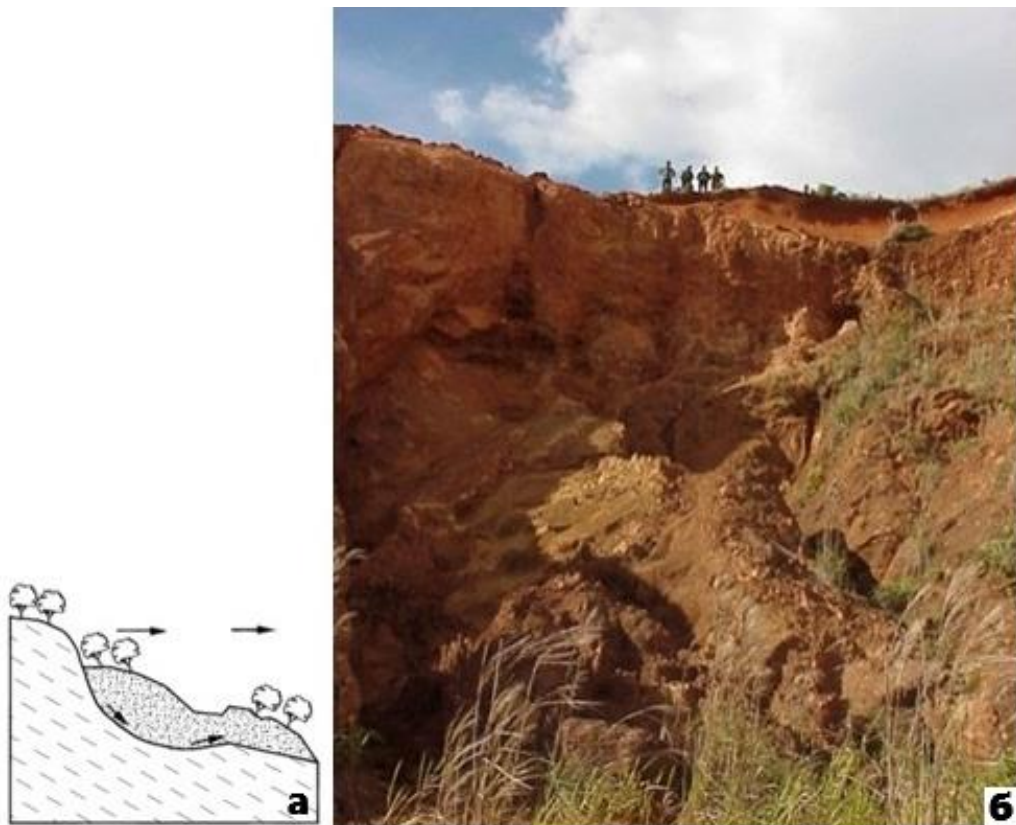


Рисунок 2.13 – Оползни скольжения вращательные в местности Сабана-дель-Сольдадо: а) схема оползня [146]; б) фотография оползня, развившегося на коре выветривания (фото из архивов горного центра Нипе-Сагуа-Баракоа, Куба)



Рисунок 2.14 – Оползни скольжения вращательные в местности Белтран: а) схема оползня [146]. б) фотография оползня, развившегося на формации Макей (фото из архивов горного центра Нипе-Сагуа-Баракоа, Куба)

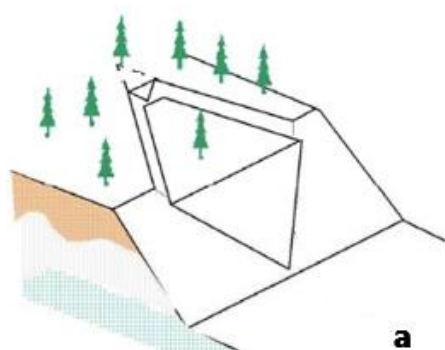


Рисунок 2.15 – Клинообразное скольжение в латеритной коре, Никелевое месторождение Пунта-Горда, Моа: а) схема оползня [146]; б) фотография оползня (фото архив горного управления компании «Эрнесто Гевара», Куба)

Обвал характеризуется отрывом породы или группы пород от подстилающей породы, которая движется по поверхности или падает вниз в свободном падении, при этом энергия и скорость увеличиваются со временем [146]. Они представляют собой основную опасность при срезании дорожных пород в горной местности и в районах открытой добычи строительных материалов. Они распространены в основном в центре и на севере исследуемой территории и очень часто встречаются в структурно сильно измененных породах, главным образом в породах офиолитового и метаморфического комплекса (рисунок 2.16).

В южной части исследуемой территории наиболее распространенным типом оползней являются обвалы. Это так называемая полупустынная окраина региона, где годовое количество осадков невелико, однако сейсмическая активность, волновое воздействие и дорожные разрезы могут стать причиной оползней (рисунок 2.17).



Рисунок 2.16 – Обвал: а) схема оползня [146]; б) фотография оползня (фото автора)



Рисунок 2.17 – Обвал: а) схематизация его развития [146]; б) фотография оползня, образовавшегося на южном побережье Гуантанамо (фото автора)

Потоки - это широко распространенные в районе процессы, которые обычно носят поверхностный характер. Они развиваются в основном в корах выветривания, в меньшей степени этот тип оползней встречается в породах, состоящих из вулканических зеленых сланцев, и в вулканокластических породах (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Гравитационные процессы в виде потока: а) схематизация их развития [146]; б) фотография потока, развитого в коре выветривания; в) фотография потока, развитого в осадочных породах формации Сан-Луис (фото из архивов горного центра Нипе-Сагуа-Баракоа, Куба)

2.8 Выводы по Главе 2

1. В рамках анализа инженерно-геологических условий массива Сагуа-Баракоа были определены ключевые факторы, влияющие на восприимчивость к процессам, вызывающим неустойчивость склонов и откосов, в том числе:

- влияние климата, учитывая, что в регионе присутствуют три типа климата. Этот фактор является определяющим в развитии геодинамических процессов, поскольку в массиве расположены районы с наибольшим количеством накопленных осадков на Кубе (более 3600 мм в год). Интенсивные осадки могут вызвать длительное насыщение массива, что способствует возникновению оползней на склонах и откосах.
- влияние геоморфологических условий, особенно рельефа, поскольку регион имеет горный рельеф, характеризующийся крутыми склонами и глубокими долинами, высота которых превышает 1000 м, что способствует возникновению оползневых процессов и развитию эрозии.

2. Массив Сагуа-Баракоа - один из самых сложных на Кубе с геологической и структурной точки зрения, в нем сосуществуют четыре геологических комплекса (метаморфический, офиолитовый, вулканических пород и осадочный), которые

подвергались воздействию интенсивных тектонических процессов. Распространение тектонических трещин в породах снижает прочность массива и способствует развитию процессов выветривания.

3. Анализ физико-механических свойств пород показал заметную неоднородность по прочности. Присутствие материалов с высоким коэффициентом размягчения, таких как свита Сьерра-Пуриал, относящаяся к метаморфическому комплексу, свита Маки из осадочных пород покровной группы, свита Сабанета из вулканического комплекса и породы офиолитовой ассоциации, в регионе с высоким уровнем осадков и структурной слабостью, может повлиять на потерю прочности при насыщении, делая их более восприимчивыми к оползням.

4. Основные геодинамические процессы в регионе происходят под влиянием взаимодействия климатических условий, рельефа, геологии и тектоники региона. К ним относятся: преобладание ламинарной эрозии, усиливающейся при открытой разработке месторождений; выветривание, характеризующееся развитием мощных слоев латеритной коры, образованной из пород офиолитового комплекса; сейсмичность, когда различные глубинные разломы сходятся, образуя границы плит или межплитные пространства, создавая сейсмогенные зоны, очень активные к югу от массива; оползневые процессы, представляющие одну из главных угроз в регионе.

5. В целом, массив Сагуа-Баракоа представляет собой массив с очень сложными инженерно-геологическими условиями, которые требуют детальной оценки для выявления оползневой опасности, связанной с этими условиями. Сочетание климатических, геоморфологических, структурных и динамических факторов усиливает важность внедрения стратегий мониторинга, моделирования и прогнозирования оползней.

ГЛАВА 3 РЕГИОНАЛЬНОЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ В МАССИВЕ САГУА- БАРАКОА

Инженерно-геологическое районирование территории по степени оползневой опасности является фундаментальным инструментом управления рисками и планирования проектов открытых горных работ, поскольку позволяет предвидеть проблемные участки, снизить негативное воздействие и обеспечить безопасность работ [12]. Этот аспект важно учитывать при обосновании и оптимизации выбора технологий добычи на горных работах, поскольку такая оценка позволяет выявить оползнеопасные участки до начала горных работ [16], что помогает минимизировать риски для работников, инфраструктуры и окружающей среды, предоставляя специалистам технические аргументы для обоснования операционных и проектных решений. Более того, это может лечь в основу превентивных мероприятий – дренажа, безопасного проектирования уступов и их мониторинга [10]. Подобные меры повышают устойчивость горного массива и сокращают долгосрочные экономические убытки.

3.1 Подходы и методы региональной оценки оползневых процессов

При изучении оползневых процессов на территории ключевое внимание уделяется трём аспектам [121, 135]: оценке предрасположенности, оценке опасности и оценке риска. Эти понятия различаются по подходу и глубине оценки. Исследования восприимчивости основаны на физико–механических и геоморфологических условиях местности без учета триггеров [31]. Анализ опасности учитывает вероятность возникновения оползневых процессов, включая фактор времени; он также учитывает провоцирующие факторы, такие как осадки, землетрясения или техногенные факторы [68]. Риск – это более широкое понятие, которое выражает воздействие или степень потерь, ожидаемых в результате наступления события, и

является функцией степени опасности или угрозы и уязвимости территории к оползневой опасности [102].

Разница в этих концепциях заключается в том, что восприимчивость фокусируется на «где», опасность – на «когда», а риск – на общем воздействии, включая человеческие и материальные последствия. В последние годы различные исследователи из разных стран разработали методы оценки оползней. Ф. Гузетти, Т. Глейд, В. Ломтадзе [76, 69, 96] предложили иерархическую классификацию методов прогнозирования оползней. На рисунке 3.1 представлены основные региональные подходы и методы оценки и прогнозирования оползней.

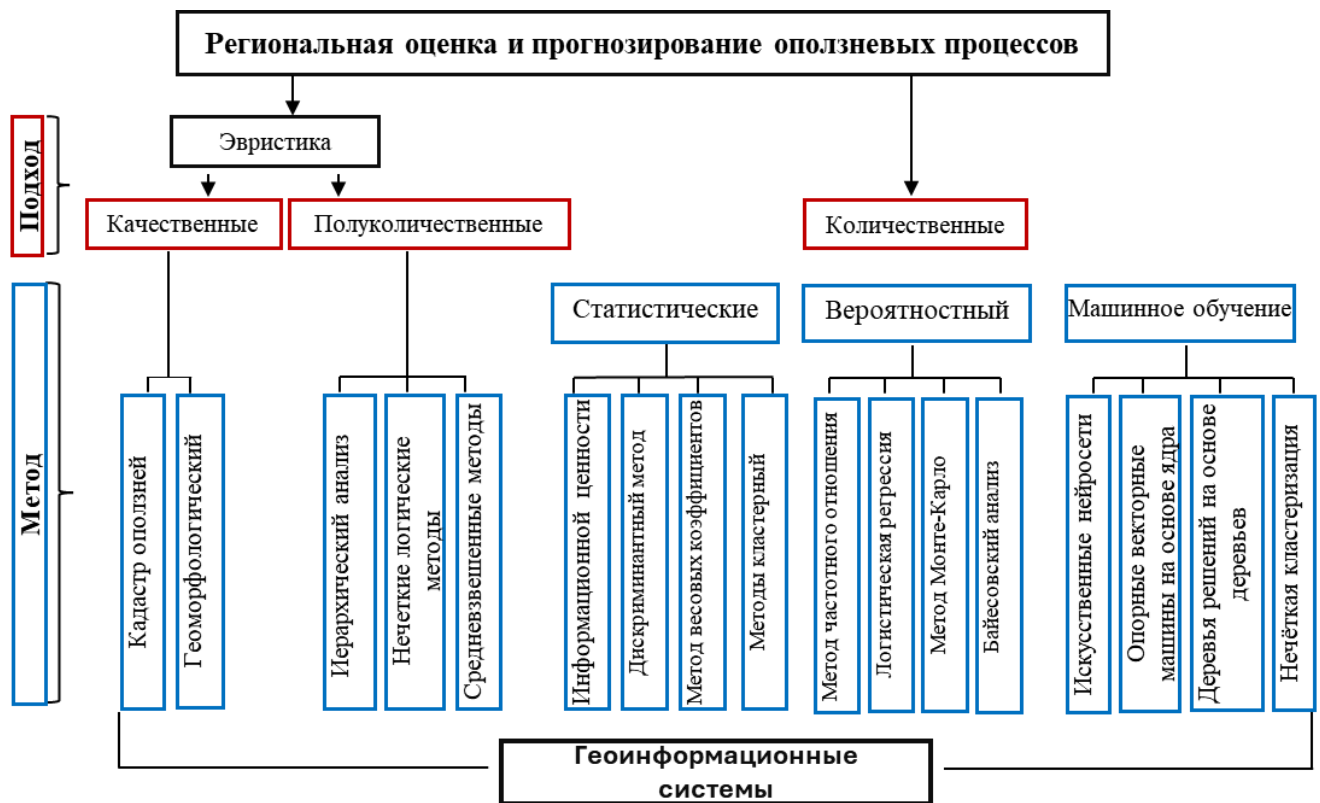


Рисунок 3.1 – Региональные методы оценки и прогнозирования оползней
(составлено автором)

3.1.1 Качественный подход

Этот подход объединяет методы, основанные на опыте оценщика и исторических наблюдениях за оползнями. Они основаны на предварительном знании

факторов, вызывающих нестабильность на исследуемой территории. Эти факторы упорядочиваются и взвешиваются в соответствии с их предполагаемой или ожидаемой значимостью для возникновения оползней. Однако одним из основных ограничений такого подхода является субъективность, которой подвержены анализы, поскольку они зависят от опыта экспертов.

Примером этого типа методов являются геоморфологические методы, которые основаны на визуальном и описательном выявлении геоморфологических особенностей, создающих неустойчивые условия, с помощью геоморфологических методов, таких как: полевой осмотр, при котором на местности выявляются движения материала и следы оползней; геоморфологическое картирование, при котором формы рельефа и структуры, связанные с оползнями, изображаются на картах на основе наблюдений [31]. Это прямые методы, с помощью которых оползневые процессы идентифицируются и локализуются на основе геоморфологического картирования; однако их недостаток заключается в том, что обоснованность и детальность анализа и конечные результаты зависят от опыта эксперта в области знания морфологии и типологии оползней.

Метод кадастра основан на картировании оползней на исследуемой территории путем сбора и анализа данных, включая опросы о местоположении оползней, их типе, размере, возрасте, факторах и причинах, вызвавших это явление, и др. При кадастровых работах наряду с традиционными методами активно применяются новые технологии: дистанционное зондирование (аэро-, наземные и спутниковые съёмки) и лазерное сканирование, включая метод LIDAR (Light Detection and Ranging). Их внедрение упрощает формирование и актуализацию оползневых кадастров [76, 154], а также повышает достоверность данных за счёт выявления новых объектов.

3.1.2 Полуколичественный подход

Иерархический анализ: основой метода является возможность включения количественных и качественных аспектов в факторный анализ. Г.К. Бондарик и

В.Д. Ломтадзе, начиная с конца XX века, получили признание за вклад в развитие концепции природно-технических систем (ПТС) [3, 15]. Эта концепция относится к интегрированным системам, сочетающим природные элементы (такие как почва, вода и геологические формации) и технические, или антропогенные элементы (такие как инфраструктура, техника или технологии). Некоторые ключевые идеи из его работы включают:

- взаимодействие между природными и техническими элементами путем анализа того, как человеческая деятельность (добыча полезных ископаемых, строительство, сельское хозяйство) взаимодействует с природной средой, изменяя ее динамику и баланс;

- геотехническая перспектива, подчеркивающая важность понимания свойств природных материалов для проектирования эффективных и устойчивых технических систем;

- рациональное управление окружающей средой, подчеркивающее необходимость содействия использованию научных и технических знаний для минимизации воздействия на окружающую среду и оптимизации использования природных ресурсов в инженерных проектах.

При использовании методов иерархического анализа проводится определение целей, критериев оценки и альтернатив выбора; создается иерархическая структура оцениваемых критериев; устанавливается процесс вычисления предпочтений между критериями, основанный на построении матриц парных сравнений, к которым применяется оператор собственных векторов для получения весов критериев и соответствующих им собственных значений и, таким образом, определения согласованности этих предпочтений. Саати (2008) считает, что процесс принятия решения можно разбить на следующие 4 основных, или базовых этапа [127]:

- определение проблемы и типа знаний, которые необходимо получить;
- структурирование проблемы путем иерархической декомпозиции на подпроблемы (критерии и подкритерии), которые должны быть решены, чтобы

прийти к удовлетворительному решению. Альтернативы находятся на самом нижнем уровне иерархии;

- построение матриц сравнения, в которые заносятся экспертные оценки методом сравнения «один к одному» с использованием предложенной шкалы метода;
- синтез каждой из матриц и, наконец, полной модели для получения общего приоритета каждой альтернативы.

Нечеткие логические методы – это методы, основанные на теории нечетких множеств, разработанной Лотфи Заде в 1965 году. Эти методы используются для работы с неопределенной, неоднозначной или неточной информацией, позволяя моделировать сложные системы, в которых границы между категориями четко не определены [156]. Они применяются в ситуациях, когда данные неполны или когда присутствуют категориальные переменные, как, например, при оценке опасности оползней с категориями «Высокая опасность», «Средняя опасность» или «Низкая опасность». Хотя метод нечеткой логики является мощным инструментом для сложных систем с неопределенностью, вызванной неполнотой данных или наличием переменных условий, его недостатки при оценке оползневой опасности обусловлены главным образом зависимостью от опыта аналитика или эксперта, что придает методу высокую субъективность.

Средневзвешенные методы – это методы, которые присваивают определенный вес каждому соответствующему фактору или критерию (склону, литологии, землепользованию и т.д.) в зависимости от его относительной важности для возникновения оползней. Затем для каждой пространственной единицы (например, пикселей на карте) рассчитывается суммарное значение путем суммирования значений факторов, умноженных на их соответствующие веса. Это полезный метод для предварительного анализа или в районах с ограниченными данными, простой в реализации и понимании, особенно с использованием инструментов географических информационных систем (ГИС). Он позволяет включать любое количество факторов и корректировать их весовые коэффициенты на основе знаний экспертов или

предыдущих исследований, что может внести погрешность в результаты. Еще один недостаток - невозможность установить нелинейные или сложные взаимосвязи между факторами, что может привести к чрезмерным упрощениям.

3.1.3 Количественный подход

Статистические методы в оценке оползней используются для того, чтобы сделать выводы о совокупности на основе информации, содержащейся в выборке. Существует множество статистических анализов, но, как правило, большинство из них основано на взаимосвязи между плотностью оползней по классам влияющего параметра и их сравнении с плотностью оползней на всей территории исследования. Наиболее часто используемые статистические подходы при оценке оползневой опасности делятся на две группы: бивариативные, в которых рассматривается один зависимый и один независимый фактор, и многомерные методы, основанные на количественной оценке наиболее влиятельных факторов, влияющих на оползневую восприимчивость, путем расчета плотности оползней для каждой переменной или удельного веса каждого фактора. В качестве примера широко применяемых методик можно привести:

Метод информационной ценности — двумерный статистический подход, разработанный Йином и Янгом (1988) [156]. Он используется для оценки предрасположенности к оползнеобразованию путём анализа корреляции между проявлением оползней и факторами-предпосылками [52]. Этот метод присваивает вес каждому классу фактора на основе его прогностической способности, учитывая долю оползней по сравнению с общей площадью каждого класса, и основан на следующей формуле (3.1) для расчета информационного значения I_i para la variable X_i [156]:

$$I_i = \frac{\log S_i / N_i}{\log S / N}, \quad (3.1)$$

где S_i - количество пикселей с проскальзыванием в переменной X_i , N_i - количество единиц местности или пикселей с переменной X_i , S - общее количество единиц

местности или пикселей с оползнями, N - общее количество единиц местности или пикселей.

Затем информативные значения объединяются для расчета индекса восприимчивости I_i с помощью уравнения (3.2) [156]:

$$I_i = \sum_{j=0}^m X_{ij} I_j, \quad (3.2)$$

где m – количество переменных, X_{ij} – зависимая переменная, принимающая значение 0, если переменная X_i не присутствует на участке или пикселе j , и значение 1, если переменная присутствует.

К достоинствам метода можно отнести простоту интерпретации результатов, гибкость в применении к различным факторам и возможность корректировки в зависимости от характеристик исследуемой территории. Однако его эффективность зависит от качества и доступности предыдущих данных об оползнях, и, кроме того, он имеет условия линейности, поскольку не учитывает сложные взаимодействия между факторами, что может ограничить его точность.

Метод весовых коэффициентов доказательств – это бивариационный метод, который использует байесовский подход, объединяя различные наборы данных, чтобы придать определенный вес тому или иному явлению [40]. Предполагается, что оползневое событие L произошло на определенной территории p раз. Если общее количество ячеек в области или слое равно q , то можно сказать, что вероятность возникновения оползня ($P(L)$) рассчитывается по следующему уравнению (3.3) [40]:

$$P(L) = \frac{\#L}{q} = \frac{p}{q}, \quad (3.3)$$

где $\#L = p$ – количество оползней L , произошедших на определенной области p , q - общее количество клеток в области.

Хотя этот метод позволяет избежать субъективности при выборе весов факторов, как в полуколичественных методах, его применение наиболее эффективно в регионах, где переменная ответа очень хорошо известна [38]. Поэтому доказательные веса не всегда применимы в малоизученных регионах.

Метод частотного отношения: не учитывает динамические процессы, поскольку предназначен для анализа статистических связей на основе статических исторических данных. Он фокусируется на соотнесении прошлых оползней с факторами, влияющими на их возникновение, такими как уклон или литология, в конкретный момент времени. Однако эти факторы могут меняться со временем из-за естественных процессов, таких как изменение режима осадков, эрозия, изменения в землепользовании или антропогенные процессы, такие как строительство или вырубка лесов. Будучи статической моделью, она не учитывает временные колебания, что ограничивает ее способность отражать динамические изменения в стабильности рельефа [75].

Дискриминантный метод – это многомерный статистический метод, позволяющий распределять или классифицировать новых людей в рамках ранее определенных групп. Цель дискриминантного анализа - найти наилучшую дискриминацию между группами, в случае исследования оползневой опасности речь идет о ячейках или пикселях, где оползни происходят и не происходят. Анализ в дискриминантной функции для классификации на две группы имеет вид по формуле (3.4) [117]:

$$D = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (3.4)$$

где x_i – значения переменных, а b_i – вычисленные коэффициенты.

Кроме того, для подтверждения результатов используется индекс относительной плотности оползней (R) по формуле (3.5) [117]:

$$R = \frac{n_i/N_i}{\sum(n_i/N_i)} \times 100, \quad (3.5)$$

где n_i – количество оползней на уровне восприимчивости i , N_i – площадь, занимаемая ячейками уровня восприимчивости i .

Другие используемые методы - взвешивание, при котором различным факторам или переменным присваиваются веса в соответствии с их относительной важностью для того или иного явления, и методы кластеризации, которые являются

инструментами для анализа многомерных данных и выявления закономерностей, поскольку позволяют разделить данные на группы (кластеры) в соответствии с их сходством, что может быть полезно для выявления районов со сходными характеристиками опасности или восприимчивостью к оползням [100, 105]. Хотя эти методы позволяют выявлять закономерности, обнаруживая в данных структуры и взаимосвязи, которые не видны невооруженным глазом, они сталкиваются с трудностями при определении оптимального количества кластеров в наборе данных, а наличие выбросов может привести к субъективности анализа. Это может повлиять на получение значимых и точных результатов.

Статистические методы, хотя и обладают определенной объективностью результатов и способностью работать с множеством факторов, их эффективность может быть предвзятой из-за высокой зависимости от исторических данных и не всегда учета сложных взаимодействий между факторами в анализе, они не учитывают динамические процессы, поскольку предназначены для анализа статистических связей на основе статических исторических данных.

Вероятностные методы включают неопределенность в оценку опасности с помощью вероятностного анализа [27], среди которых наиболее часто используются следующие:

- метод частотного отношения: рассчитывает вероятность события путем сравнения его появления с общим количеством событий в наборе данных. Используется при анализе восприимчивости к оползням и изучении природных опасностей;
- логистическая регрессия: устанавливает математические взаимосвязи между зависимыми и независимыми переменными для составления прогнозов, включая линейные модели;
- метод Монте-Карло: использует случайное моделирование для оценки вероятностных исходов в сложных системах. Он применяется для оценки

неопределенности, моделирования рисков и прогнозирования устойчивости склонов [95, 106].

- байесовский анализ: использует теорему Байеса для обновления вероятностей на основе новых данных. Он используется в моделировании неопределенности, прогнозировании событий и машинном обучении.

Методы машинного обучения - одна из самых популярных технологий четвертой промышленной революции [142], которая представляет вычислительные техники, позволяющие системам распознавать закономерности и взаимосвязи из данных, не будучи явно запрограммированными [133]. Многие исследователи, занимающиеся изучением проскальзывания, используют эти методы:

- искусственные нейронные сети (ИНС): модели, вдохновленные работой человеческого мозга, состоящие из слоев взаимосвязанных узлов, обрабатывающих информацию. Они обучаются путем изменения весов, чтобы минимизировать ошибки, и особенно эффективны для решения сложных задач, таких как улавливание сложных взаимосвязей между переменными и распознавание образов [150];

- опорные векторные машины на основе ядер (SVM), которые стремятся найти оптимальную гиперплоскость, разделяющую данные на разные классы, используя функции ядра для преобразования данных в более высокоразмерные пространства, где разделение более эффективно. Они идеально подходят для выявления сложных взаимосвязей в многофакторных данных [70];

- деревья решений — это модели, которые разделяют данные на подмножества с помощью правил, основанных на признаках, создавая иерархическую структуру, которая позволяет классифицировать или регрессировать в интерпретируемом виде [81];

Нечеткая кластеризация, которая позволяет отнести данные не к жестким группам, а к нескольким группам со степенями принадлежности. Они ценны для работы с неопределенностью [59].

3.2 Методология оценки оползневой опасности для массива Сагуа-Баракоа

Первым шагом в оценке региональной оползневой опасности в массиве Сагуа-Баракоа является сбор, подготовка, обработка и анализ существующей информации. Схема методологии показана на рисунке 3.2.

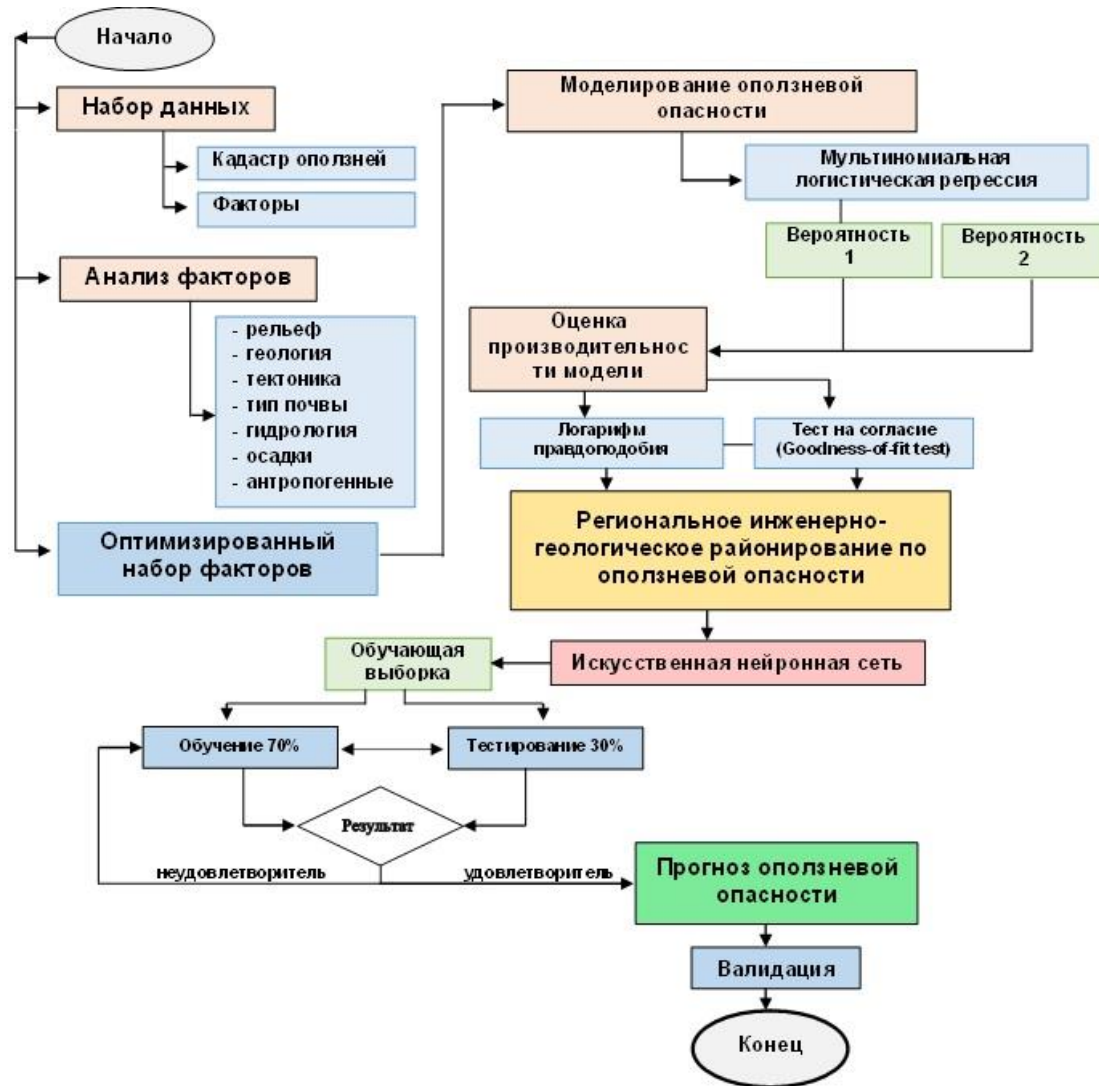


Рисунок 3.2 – Схема методологии исследования (составлено автором)

Кадастр оползней считается важным для изучения взаимосвязи между оползнями и факторами, вызывающими их. Методы, используемые для создания инвентаризационной карты оползней, можно разделить на три группы [138]:

- методы, основанные на визуальной интерпретации;
- полуавтоматические методы;
- автоматические методы, основанные на машинном обучении.

Был составлен кадастр в формате точек. Источниками информации для составления кадастра на исследуемой территории послужили сбор и анализ полевых данных и спутниковых снимков Sentinel 2A.

Этот кадастр призван охарактеризовать большее количество точек на местности, отражая данные тематических слоев (растровый формат), относящихся к каждому фактору, который оценивается и/или выбирается в ходе исследования [115]. Таким образом, можно получить больше информации для зонирования опасности и обучения искусственной нейронной сети.

Логистическая регрессия - это одна из вероятностных моделей, известных как обобщенные линейные модели, которая использует независимые переменные для создания математической модели, предсказывающей вероятность наступления события на определенной территории. Ключевым моментом логистической регрессии является то, что зависимая переменная обычно является дихотомической и принимает значение 1 или 0, представляя собой наличие/отсутствие оползней. Независимые переменные в этой модели являются предикторами зависимой переменной, и они могут быть обработаны с помощью различных типов данных (номинальных, порядковых, интервальных или процентных).

Этот метод является многомерным расширением классической бинарной логистической регрессии и используется для прогнозирования на основе набора нескольких независимых переменных категориальных зависимых переменных, содержащих более двух категорий (политомических) [50, 120]. Независимые переменные могут быть как непрерывными, так и дискретными или категориальными. Вероятность того, что пиксель может принадлежать к определенному классу (k) в пространстве, задается следующим математическим уравнением (3.6) [50]:

$$P(Y = j|X) = \frac{\exp(\beta_{j0} + \beta_{j1}X_1 + \beta_{j2}X_2 + \dots + \beta_{jp}X_p)}{1 + \sum_{l=1}^{k-1} \exp(\beta_{l0} + \beta_{l1}X_1 + \dots + \beta_{lp}X_p)}, \quad (3.6)$$

где β_{j0} – перехват для категории j ; $\beta_{j1}, \beta_{j2}, \dots, \beta_{jp}$ – коэффициенты независимых переменных для категории j , p – количество независимых переменных.

Уравнение в знаменателе $\sum_{l=1}^{k-1} \exp(\beta_{l0} + \beta_{l1}X_1 + \dots + \beta_{lp}X_p)$ представляет собой сумму экспоненциальных уравнений, полученных для каждой из категорий. Эта формула гарантирует, что вероятности равны 1 для всех возможных категорий.

Чтобы избежать избыточности в анализе, категория принимается за эталонную ($j=k$), а ее вероятности рассчитываются с помощью следующего уравнения (3.7) [50]:

$$P(Y = j|X) = \frac{1}{1 + \sum_{l=1}^{k-1} \exp(\beta_{l0} + \beta_{l1}X_1 + \dots + \beta_{lp}X_p)}, \quad (3.7)$$

Отношение, где числитель - вероятность (p) наступления события, а знаменатель - вероятность того, что событие не наступит ($1 - p$), выражается логарифмом шансов ($\log(\text{Odds})$), также известным как *logit*. В отличие от логистической регрессии, которая имеет только одно уравнение *logit*, МЛР может иметь несколько уравнений *logit*, где *logit* - это логарифмическая функция, которая показывает связь между вероятностью ($P(Y = j|X)$) того, что данный пиксель принадлежит к определенной категории или классу, имеющему контрольную категорию, и выражается по формуле (3.8) [50]:

$$Y = \text{Logit}(p) = \log \left[\frac{P(Y=j|X)}{P(Y=k|X)} \right] = \beta_{j0} + \beta_{j1}X_1 + \dots + \beta_{jp}X_p, \quad (3.8)$$

где β_{j0} - константа и перехват, β_{jp} - коэффициенты регрессии, связанные с предикторными переменными при $n = 1, 2, \dots, p-1$, X_p - число независимых переменных.

Модель должна работать в предположениях, что наблюдения независимы друг от друга, между независимыми переменными нет экстремальной мультиколлинеарности, а связи между независимыми переменными и вероятностью каждой категории линейны в пространстве *logit* [31].

Параметры модели (β) оцениваются с помощью метода максимального правдоподобия, который направлен на максимизацию вероятности того, что модель правильно предсказывает наблюдаемые категории зависимой переменной. Функция правдоподобия ($L(\beta)$) для модели мультиномиальной логистической регрессии выглядит следующим образом (3.9) [50]:

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^k [P(Y_i = j | X_i)^{I(Y_i=j)}], \quad (3.9)$$

где $L(\beta)$ – функция правдоподобия, β – параметры модели, $P(Y_i = j | X_i)$ – вероятность того, что наблюдение i принадлежит к категории j , $I(Y_i = j)$ – индикаторная функция, принимающая значение 1, если наблюдение i принадлежит к категории j , и 0 в противном случае.

Для нахождения коэффициентов $\beta_{j0}, \beta_{j1}, \dots, \beta_{jp} X_p$ логарифмическое правдоподобие $\ln(L(\beta))$ максимизируется численно, с помощью уравнения (3.10) [50]:

$$\text{Log} - \text{Likelihood} = \ln(L(\beta)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J I(y_i = j) * \ln(P(y_i = j | x_i)), \quad (3.10)$$

Для оценки того, насколько адекватно модель подходит, мы используем тесты на правильность подгонки. Для метода МЛР наиболее часто используются тест Пирсона и тест девиантности. Тест Пирсона сравнивает наблюдаемые частоты с ожидаемыми частотами по модели и основан на сумме квадратов остатков, стандартизированных по ожидаемым частотам с помощью уравнения (3.11) [50]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}, \quad (3.11)$$

где O_{ij} – наблюдаемая частота для категории j в наблюдении i , E_{ij} – ожидаемая частота для категории j в наблюдении i .

Тест на отклонение (D): основан на разнице между логарифмическим правдоподобием предложенной модели (ЛВПМ) и насыщенной модели (ЛВНМ) по формуле (3.12) [50]:

$$D = -2(\text{ЛВПМ} - \text{ЛВНМ}), \quad (3.12)$$

Опасность оползней – это категориальная переменная, поэтому мультиномиальная логистическая регрессия может быть пригодна для оценки увеличения или уменьшения опасности оползней на основе оценки климатических, топографических и инженерно-геологических данных.

3.3 Географические информационные системы (ГИС) как платформа для оценки оползневых процессов

ГИС можно рассматривать как модель, объединяющую знания из таких дисциплин, как география, топография, пространственный анализ и моделирование, и других, что позволяет разрабатывать и анализировать модели в различных областях интересов. Они также рассматриваются как технологический инструмент, состоящий из различных элементов, включая человеческие ресурсы, программное и аппаратное обеспечение, телекоммуникационные технологии, базы данных, теоретические основы, контекстуальные процедуры и подходы к анализу, для поддержки решения проблем различного рода, связанных с занятием, использованием и управлением территорией [41]. Этот инструмент абстрактно представляет реальность, связанную с земной системой отсчета, созданной для удовлетворения конкретных информационных потребностей [88], включая создание и анализ карт, интеграцию инвентаризаций и пространственный анализ, среди прочего [73].

ГИС стали полезным инструментом моделирования для выявления, картирования и оценки оползневой опасности, поскольку они позволяют быстро извлекать, хранить и обрабатывать информацию. Они также помогают интегрировать и пространственно моделировать данные из различных источников и исследовать причинно-следственные связи [33].

Технология ГИС и быстрое развитие вычислительных возможностей возлагают большие надежды на ГИС как на потенциальное средство работы с большими объемами данных, связанных с оползнями [35, 39]. При оценке оползневой опасности она позволяет проводить детальный и локализованный анализ и имеет возможность интеграции с другими технологиями, такими как дистанционное зондирование для получения актуальных данных или методы машинного обучения для улучшения прогнозирования. Однако для того чтобы этот инструмент был максимально эффективным, необходимо уделять внимание качеству данных, поскольку от него зависят полученные результаты, и также важна их валидация.

Для геопространственной выборки инженерно-геологического районирования по степени оползневой опасности использовался индекс оползневой восприимчивости (LSI) по уравнению (3.13) [87]:

$$LSI = \sum_{i=1}^n R_i * W_i, \quad (3.13)$$

где R_i – соответствующий рейтинг для каждого класса факторов, W_i – вес рассматриваемого фактора.

3.4 Анализ факторов инженерно-геологического районирования по оползневой опасности на массиве Сагуа-Баракоа

При инженерно-геологическом районировании по степени оползневой опасности местности проводится анализ восприимчивости и провоцирующих факторов, влияющих на оползневые процессы. По мнению Е.П. Емельяновой [7], под фактором понимается любое явление климатического, геолого-геоморфологического, гидрологического, гидрогеологического или иного характера, влияющее на устойчивость склонов и способное спровоцировать оползневое смещение. Автор, как и другие исследователи, например, И.П. Иванов [9], установил, что факторы оползнеобразования разделяются на две группы по характеру воздействия на коэффициент устойчивости:

1. Группа факторов, определяющих условия оползнеобразования (формирующих исходный коэффициент устойчивости):

- рельеф местности;
- геологическое строение склонов;
- физико-механические свойства пород;
- гидрогеологические условия;
- современные тектонические движения и сейсмичность;
- климатические особенности;
- гидрологический режим рек/водоёмов (для береговых склонов);
- развитие сопутствующих экзогенных процессов;

- инженерно-хозяйственная деятельность.

2. Группа факторов, изменяющих величину коэффициента устойчивости во времени, подразделяемая на подгруппы:

1) Факторы, изменяющие состав, состояние и свойства пород, влияющие на их прочность и деформируемость:

- выветривание;
- увлажнение грунтов атмосферными, талыми, подземными и хозяйственно-бытовыми водами;
- промерзание-оттаивание;
- реологическая ползучесть грунтов;
- выщелачивание и суффозия.

2) Подгруппа факторов, изменяющих напряжённое состояние массива горных пород склона или откоса, которая включает:

- эрозия и абразия;
- изменение базиса эрозии;
- колебания уровня грунтовых вод (гидростатическое взвешивание, гидродинамическое давление);
- аккумуляция отложений, пригрузка склонов обвальными массами;
- техногенное воздействие (подрезка, пригрузка, изменение профиля);
- сейсмические воздействия.

Факторы были выбраны с учетом опыта региональных исследований по оценке оползневой опасности и наличия данных:

Геоморфологические факторы

- Крутизна склонов (откосов) (К.О)
- Высота над уровнем моря (В.Н.У.М.)
- Экспозиция (ориентация склона) (А)
- Кривизна (К)

Геологические и тектонические факторы

- Тип породы (Т.П.)
- Расстояние до разломов (Р.Р.)
- Тип грунта (Т.Г.)

Гидрологические и антропогенные факторы

- Накопленные среднегодовые осадки (Н.С.О.)
- Расстояние до рек (Р.Рк.)
- Расстояние до дорог (выемок) (Р.Д.)

Топографические особенности являются важным аспектом, влияющим на неустойчивость склонов. При оценке оползневой опасности учитывались следующие основные топографические факторы: крутизна склона, абсолютная высота над уровнем моря, экспозиция склона и его поперечная кривизна. Данные факторы были получены из цифровой модели рельефа. Полученные значения были переклассифицированы, образовав классы с диапазонами в соответствии с их важностью для возникновения неустойчивости откосов, как показано в таблице 3.1. Таблица 3.1 – Геоморфологические факторы с классами и диапазонами в отношении их влияния на возникновение выявленных оползней (составлено автором)

Фактор	Диапазон	Класс	Описание	Важность для неустойчивости
Крутизна откосов, град	0 – 14	1	Пологие склоны	Низкий
	14 – 22	2	Умеренно крутые склоны	Средний
	22 – 32	3	Крутые склоны	Высокий
	32 – 69	4	Очень крутые склоны	Очень высокий
Высота над уровнем моря (м)	0 – 150	1	Плоские земли	Низкая
	150 – 300	2	Холмы	Средняя
	300 – 500	3	Низкие горы	Высокая
	> 500	4	Горы	Очень высокая
Кривизна откоса	0 – 0.5	1	Плоская поверхность	Низкая
	> 0.5	2	Вогнутая поверхность	Средняя
	< 0	3	Выпуклая поверхность	Высокая
Экспозиция склона, град	180 – 270	1	Склоны, обращенные на юг и юго-запад	Низкая
	90 – 180	2	Склоны, обращенные на восток и юго-восток	Средняя
	270 – 360	3	Склоны, обращенные на запад и северо-запад	Высокая

Продолжение таблицы 3.1

Фактор	Диапазон	Класс	Описание	Важность для неустойчивости
Экспозиция склона, град	0 – 90	4	Склоны, обращенные к северу и северо-востоку	Очень высокая

Фактор крутизны откоса и высота над средним уровнем моря учитываются как критерии, связывающие склоны с неустойчивостью рельефа, исследованиями в данной области устанавливающие частоту возникновения оползней в классах [49]. Для крутизны склонов (рисунок 3.3 а) и высоты над средним уровнем моря (рисунок 3.3 б) наблюдается незначительная разница между этими факторами и встречаемостью оползней, так как наблюдается широкое распространение оползней во всех классах (рисунок 3.3 в-1,2).

Фактор экспозиция откоса означает ориентацию откоса относительно кардинальных точек. Этот фактор является ключевым при оценке оползневой опасности, так как он влияет на подверженность склона воздействию солнечной радиации, тем самым влияя на влажность почвы и процессы выветривания. Некоторые ориентации получают больше осадков в зависимости от характера осадков в регионе и, таким образом, способствуют насыщению грунта влагой [126]. Кроме того, ориентация или экспозиция склона может быть связан с геологическими структурами; если склон примыкает к слабым плоскостям, таким как трещины или наклонные слои, риск возникновения оползней возрастает.

Республика Куба расположена в северном полушарии, поэтому склоны с наименьшей солнечной экспозицией обращены на север, что обусловлено углом падения солнечных лучей. В таблице 3.1 представлены классы, полученные после реклассификации значений. Наибольшее количество оползней (350) (рисунок 3.4 в-1) развилось на склонах, ориентированных на восток-юго-восток (рисунок 3.4 а).

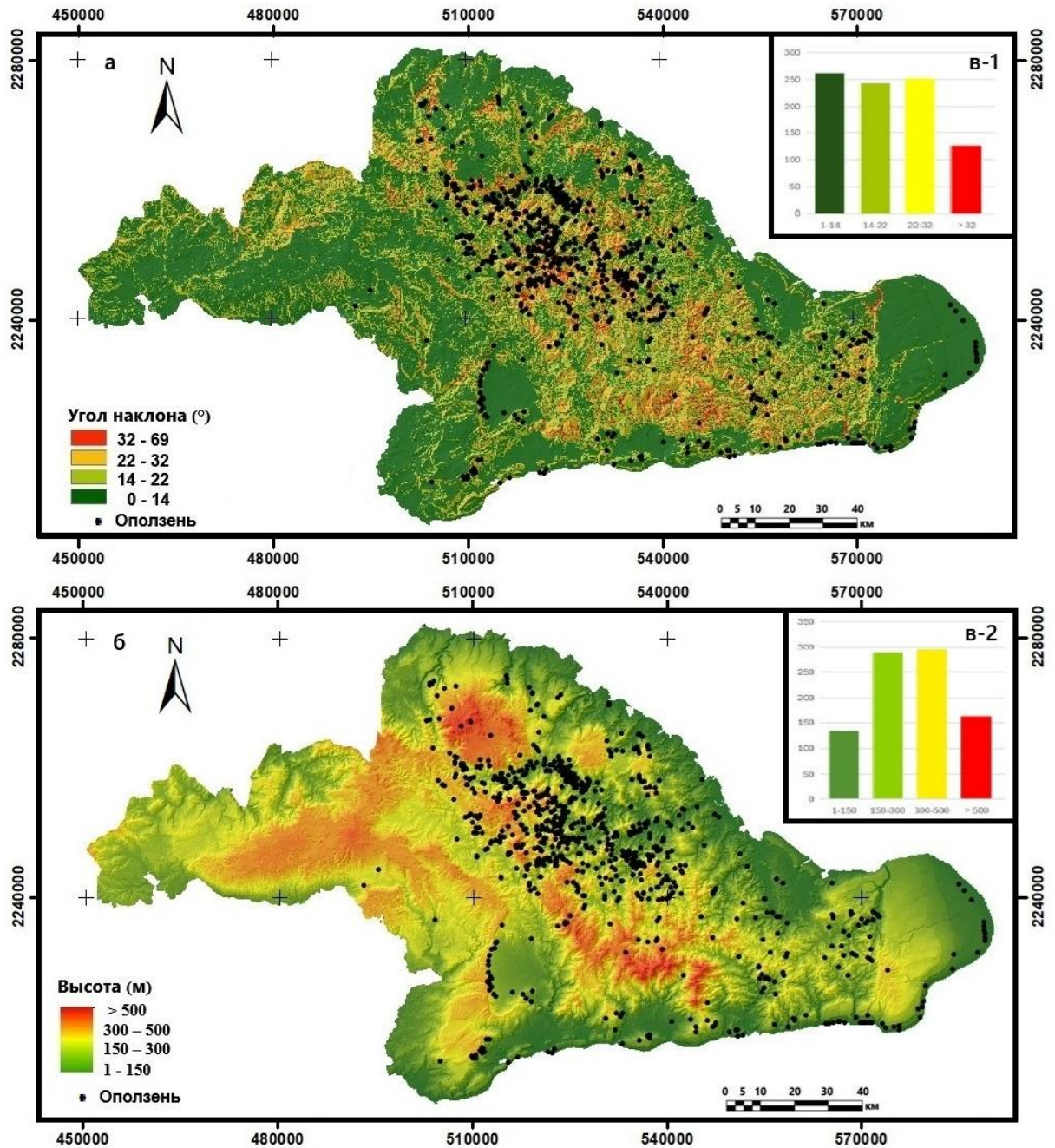


Рисунок 3.3 – Анализ геоморфологических факторов: карта зависимости между углом наклона склона и распространённостью оползней (а); карта зависимости между высотой склона и распространённостью оползней (б); количество оползней по классам в зависимости от угла наклона (в-1); количество оползней по классам в зависимости от высоты (в-2) (составлено автором)

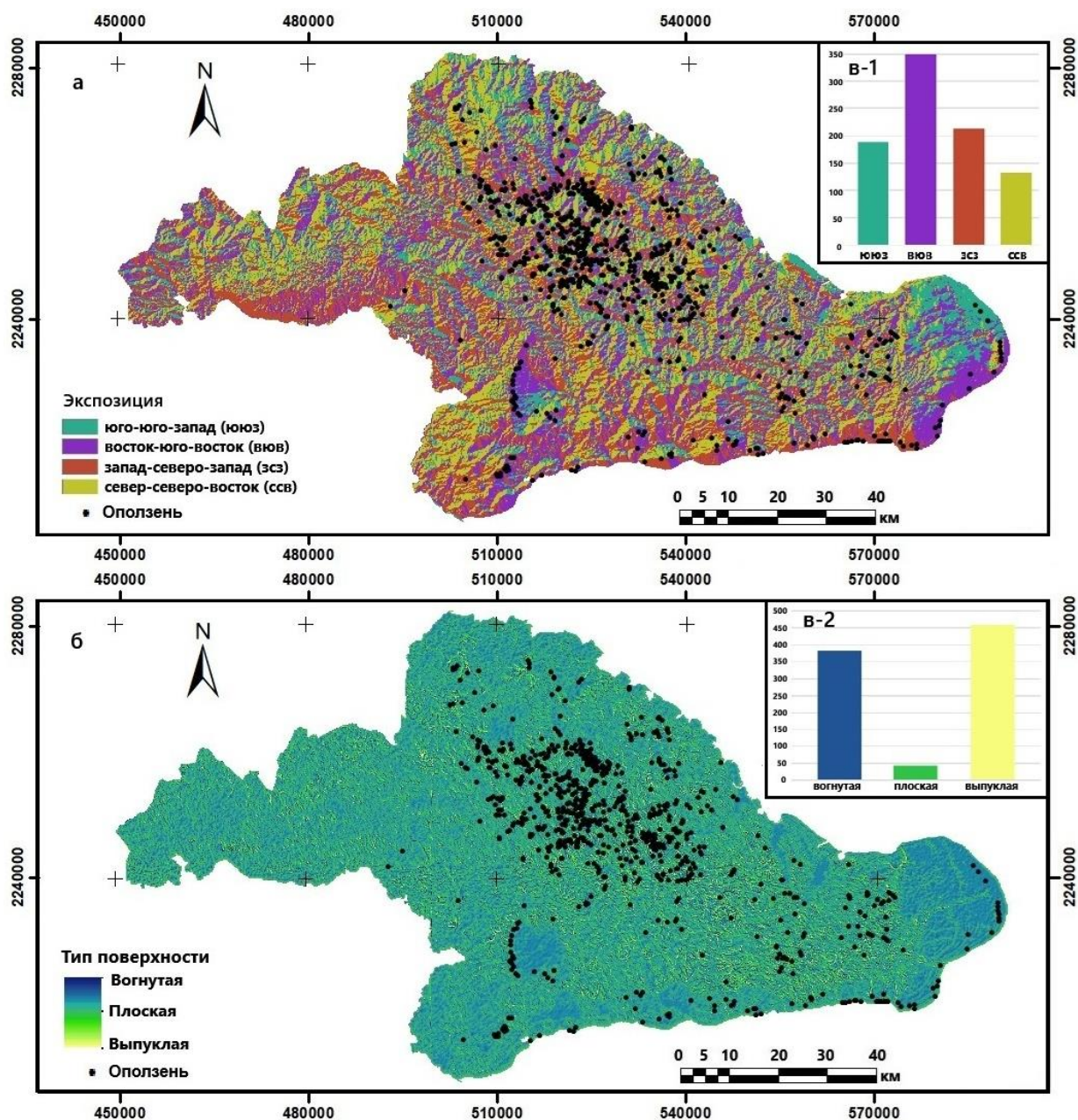


Рисунок 3.4 – Карта зависимости между экспозицией склона и возникновением оползней: распределение оползней при различной ориентации склонов (а); распределение оползней при различных типах кривизны поверхности (б); количество оползней по классам в факторе экспозиции (в-1); количество оползней по классам в зависимости от типа поверхности (в-2) (составлено автором)

Кривизна откоса, также известная как поперечный профиль, означает, как склон изгибается внутрь или наружу по отношению к горизонтальной линии. Этот фактор может влиять на дренаж поверхностных вод, распределение напряжений в почве,

эрозию, а также на устойчивость поверхности рельефа. Были определены три класса и их значение для устойчивости откоса (таблица 3.1).

Анализ кривизны откосов в районе исследования показывает, что 382 оползня развились на поверхностях с вогнутой кривизной, что составляет 42 % от общего количества (рисунок 3.4 б). Наличие вогнутых поверхностей в рельефе может затруднять дренаж и увеличивать накопление воды или способствовать образованию эрозионных борозд, что может отрицательно сказаться на устойчивости откосов (рисунок 3.4 в-2).

Типология горных пород является одним из основных факторов, влияющих на возникновение оползней. Анализ характеристик геологических свит, основанный на поведении физико-механических свойств пород и грунтов, таких как прочность на сжатие, проницаемость и коэффициент размягчения, позволил более объективно оценить геологические свиты с точки зрения восприимчивости к оползням, исходя из предположения, что эти свойства. В таблице 3.2 представлены классы, определенные с учетом группировки пород и типов почв в соответствии с их восприимчивостью к оползням.

Таблица 3.2 – Геологические факторы с классами и диапазонами в отношении их влияния на возникновение оползней (составлено автором)

Фактор	Диапазон	Класс	Описание	Степень влияния на устойчивость
Тип грунта	-	1	Несвязные типы грунтов	Низкая
	-	2	Суглинок	Средняя
	-	3	Переслаивание глин и суглинков	Высокая
	-	4	Глинистый	Очень высокая
Расстояние до разлома (м)	> 500	1	Зона влияния свыше 500 м	Низкая
	< 500	2	Зона влияния до 500 м	Высокая
Тип горных пород	-	1	Стекловидные и цеолитизированные туфы, массивные известняки	Низкая
	-	2	Мергели, брекчированные серпентины, твердые сланцы	Средняя
	-	3	Конгломераты, брекчии, песчаники	Высокая

Продолжение таблицы 3.2

Фактор	Диапазон	Класс	Описание	Степень влияния на устойчивость
Тип горных пород	-	4	Мягкие сланцы, коры выветривания, сильно деформированные и трещиноватые породы	Очень высокая

Наибольшее количество инвентаризированных оползней распределено в классе 4 (706 оползней, что составляет 80 % от общего количества), представленном метаморфическим комплексом, в целом состоящим из сланцев вулканических пород свиты Сьерра-Пуриал (СП), с возникновением 477 оползней и в офиолитовом комплексе (ОК), состоящем из остатков океанической коры с хазбургитами, лерцолитами и серпентинизированными дунитами, где развилось 229 оползней (Рисунок 3.5 а). Только 0,6 % оползней произошло в породах вулканического комплекса, представленного туфами. Остальные оползни были распределены в осадочных породах, состоящих в основном из известняков свит Рио – Майя (35), Ятерас (20), Кабо – Круз (14), Хайманитас (10) и в свите Макей (23), состоящей из чередующихся песчаников, алевролитов и известняков.

При анализе фактора расстояния до разломов он был разделен на два класса, которые установили следующие зоны близости к разломам и восприимчивости к неустойчивости склонов: < 500 м - зоны высокой восприимчивости и > 500 м - зоны низкой восприимчивости; было установлено, что большинство оползней расположено в районах с высоким классом встречаемости оползней менее чем в 500 м от разломов (рисунок 3.5 б).

По фактору типа почвы наибольшее количество оползней (419) было распределено на глинистых суглинках и глинистых почвах (330), которые соответствуют высокому и среднему классам соответственно по частоте возникновения оползней (рисунок 3.5 в).

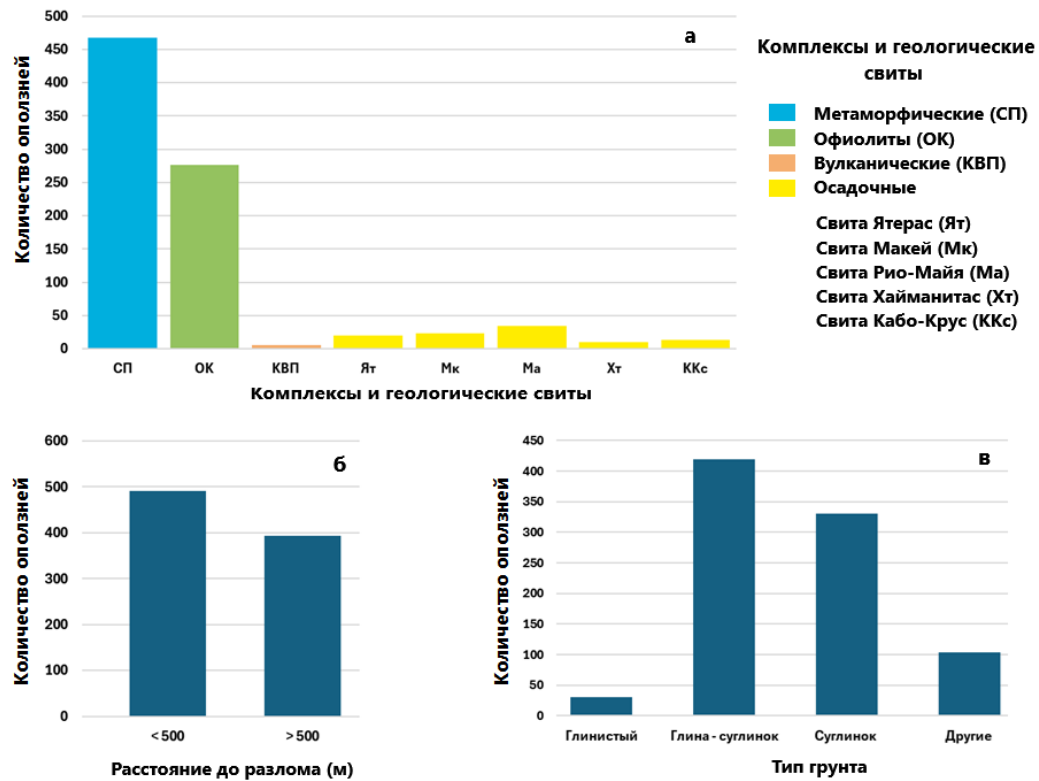


Рисунок 3.5 – Связь между количеством оползней и их распределением по классам факторов: а – типы пород; б – расстояние до разломов; в – тип грунта (составлено автором)

Для облегчения понимания при установлении критериев восприимчивости для различных литологических типов на исследуемой территории проводится комплексный анализ дифференцированного геомеханического поведения различных геологических формаций с учетом плотности зон структурной слабости, типа почвы, характеристик и типологии оползней, что позволяет охарактеризовать типы пород по их восприимчивости к возникновению гравитационных движений. В связи со сложностью геологического строения и разнообразием формаций были установлены 3 класса восприимчивости геологических формаций к возникновению оползней: высокий, средний и низкий (рисунок. 3.6).

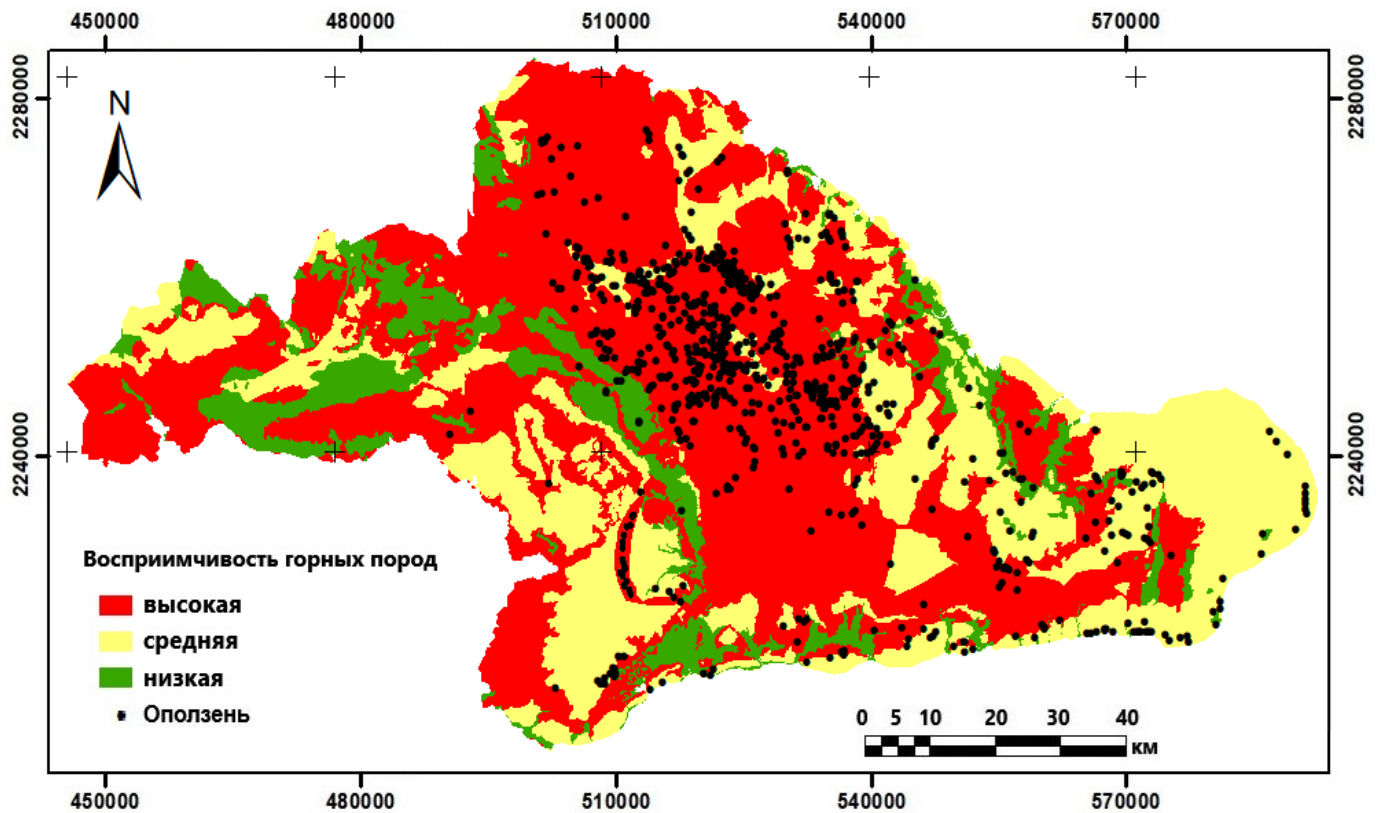


Рисунок 3.6 - Восприимчивость геологических свиты к возникновению оползней
(составлено автором)

Принимая во внимание вышеуказанные элементы, геологические формации были охарактеризованы и представлены вероятные разрывы, одобренные кадастром оползней (таблица 3.3).

Важно учитывать гидрологические и антропогенные элементы, поскольку вода является одним из основных факторов, влияющих на устойчивость склонов. К гидрологическим факторам относятся количество осадков и расстояние до рек.

Таблица 3.3 – Характеристика геологических свита и вероятных типов оползней (составлено автором)

	Свита	Виды горных пород	Вероятный тип оползня	Восприимчивость к оползням
Метаморфический комплекс	Сьерра-Верде	Метатерригенные сланцы	Оползни скольжения в коре выветривания, хотя могут встречаться и в более трещиноватых породах	Высокая
	Шафарина	Карбонатные породы, наличие карста	Обвал может быть произведен.	Низкая
	Гуира-де-Жауко	Амфиболиты и вулканические сланцы	Оползни скольжения в коре выветривания Обвал, на более твердые породы	Низкая
	Сьерра-Пуриал	Мягкие сланцы: хлоритовые, серицитовые	Оползни скольжения, в основном связанные с выветриванием коры Оползни - потоки	Высокая
Офиолитический комплекс	Серпентинит	Породы, состоящие в основном из перидотитов, дунитов и лерцолитов	Оползни скольжения в коре выветривания. Оползни - потоки Обвал, в массивных блоках	Высокая
	Санто-Доминго	Породы, состоящие из брекчий и конгломератов	Оползни скольжения	Высокая
	Ла-Пикота	Породы, состоящие из конгломератов с прослоями песчаника	Оползни скольжения	Высокая
Вулканический комплекс	Гран – Тьерра	Песчаники, мелкие конгломераты, алевролиты и известковые брекчии.	Оползни скольжения Оползни - потоки.	Высокая
	Сабанета	Стекловидные и цеолитизированные туфы. Небольшая латеральная и вертикальная изменчивость	Обвал может быть произведен.	Низкая
	Эль – Кобре	Обычно твердые породы. Туфы и лавы	Обвал, обычно связанные с зонами разломов.	Низкая

Продолжение таблицы 3.3

	Свита	Виды горных пород	Вероятный тип оползня	Восприимчивость к оползням
Комплекс осадочных пород	Чарко–Редондо	Твердые, закарстованные известняки	Обвал может быть произведен	Низкая
	Сан-Луис	Преобладают высококарбонатные и глинистые песчаники. Мягкие породы.	Оползни скольжения Оползни - потоки.	Высокая
	Кастильо-де-лос-индиос	Хорошо стратифицированные терригенные толщи, состоящие в основном из мергелей	Оползни скольжения Оползни - потоки.	Высокая
	Кабаку	Полимиктовые гравелиты, песчаники и алевролиты (в основном из ультрамафитов и вулканитов).	Оползни скольжения	Высокая
	Макей	Средне- и крупнозернистые известково-глинистые песчаники с фрагментами гравюр и хорошо стратифицированными серпентинитами. Конгломераты и мергели.	Оползни скольжения Оползни - потоки	Высокая
	Ятерас	Чередование мелко- и крупнозернистых детритовых, биодетритальных и биогенных известняков	Обвал	Средняя
	Баракоа	Сильно карсифицированные рифовые известняки. Очень твердые	Обвал и опрокидывание	Средняя
	Кабо–Крус	Рифовые известняки и глинистые известняки	Обвал и опрокидывание	Средняя
	Пунта–Имиас	Терригенно – карбонатные толщи, состоящие из алеврито-глинистых известняков, калькаренитов и алевролитов	Оползни скольжения Оползни - потоки	Средняя
	Рио–Майя	Сильно карсифицированные рифовые известняки. Очень твердые	Обвал и опрокидывание	Средняя

Антропогенные факторы определяются как факторы, вызванные деятельностью человека, такие как удаление растительности [153], расстояние до дорог [34] и другие, вызванные горными работами. Выбранные факторы представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Гидрологические и антропогенные факторы с их классами и диапазонами в отношении их влияния на возникновение оползней (составлено автором)

Фактор	Диапазон	Класс	Степень влияния на устойчивость	Описание
Накопленные осадки (мм)	более 2000	4	Очень высокая	Относится к среднегодовому количеству накопленных осадков
	1000-2000	3	Высокая	
	700-1000	2	Средняя	
	1-700	1	Низкая	
Расстояние до реки (м)	1-100	3	Высокая	Относится к зоне влияния неустойчивости в пределах установленных классов
	100-250	2	Средняя	
	более 250	1	Низкая	
Расстояние до дорог (м)	1-50	3	Высокая	Относится к зоне влияния неустойчивости в пределах установленных классов
	50-100	2	Средняя	
	более 100	1	Низкая	

Осадки являются триггерным фактором, который в данном регионе оказывается наиболее важным. Количество осадков было разделено на четыре класса (таблица 3.4). Наибольшее количество осадков, превышающее 3600 мм/год, выпадает на севере и северо-востоке страны (рисунок 3.7 а). Большое количество инвентаризированных оползней (778 оползней, что составляет 88,1 % от общего числа) совпадает с районами наибольшего количества осадков (рисунок 3.7 б). Эти данные подтверждают связь между возникновением оползней и интенсивными осадками, выявленную другими авторами. Длительные периоды сильных дождей могут влиять на изменение состояния и свойств почвы или горных пород, находящихся на склонах, и влиять на устойчивость откосов.

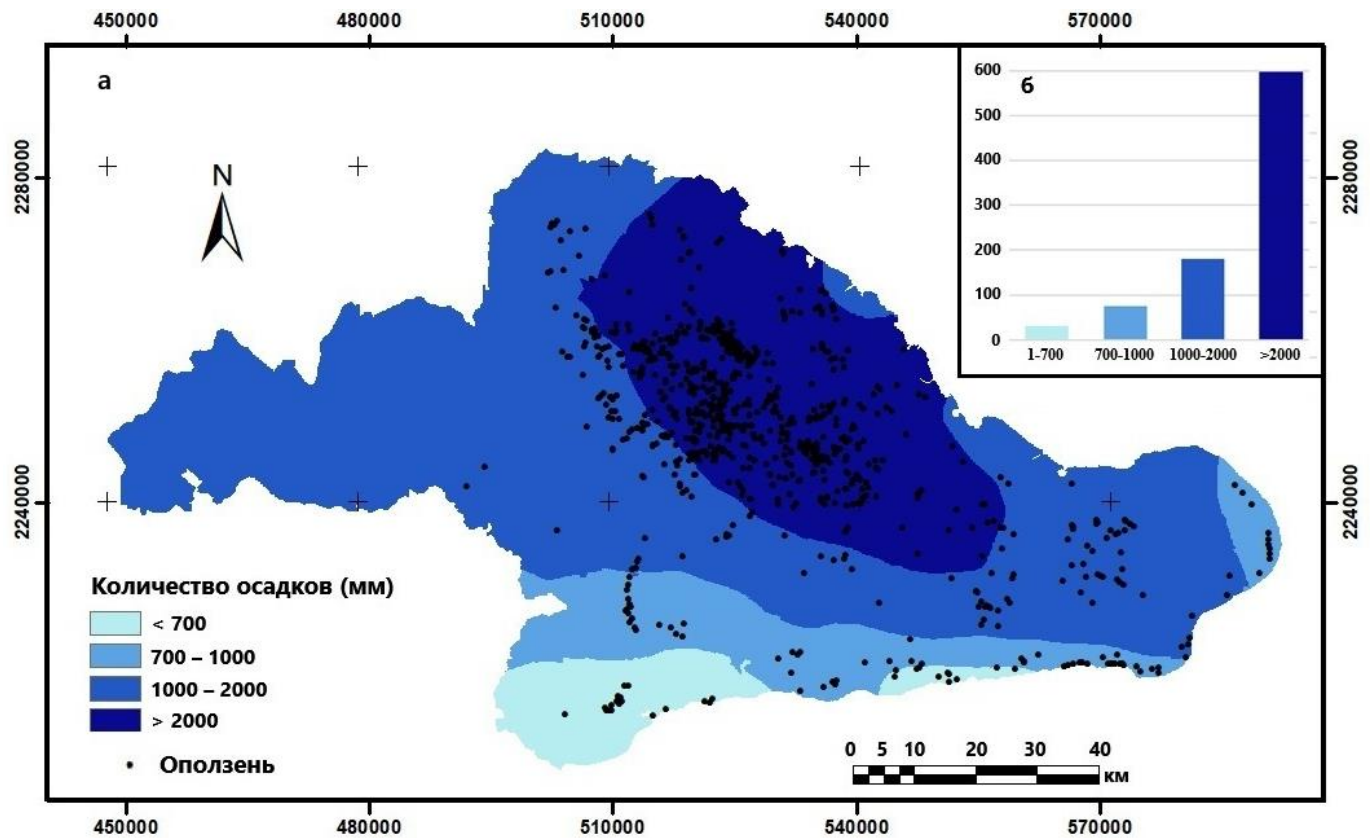


Рисунок 3.7 – Карта среднемесячного количества осадков: пространственное распределение скоплений осадков (а); количество оползней в классах (б)
(составлено автором)

Гидрологическая сеть на исследуемой территории обширна. По расстоянию до рек были созданы три класса, определяющие зоны влияния, что позволяет оценить, как близость к водным объектам может влиять на устойчивость местности к возникновению оползней (рисунок 3.8 а). Диапазоны для классов приведены в таблице 3.4. Наибольшее количество оползней было распределено в классе высокой встречаемости, который имеет зону влияния до 100 м расстояния до рек; всего в этом классе было распределено 452 оползня, что составляет 51,1 % от общего количества (рисунок 3.8 в-1). Появление оползней в зоне высокого влияния может свидетельствовать о том, что водные процессы (эрозия, насыщение) являются важными факторами, которые необходимо принимать во внимание

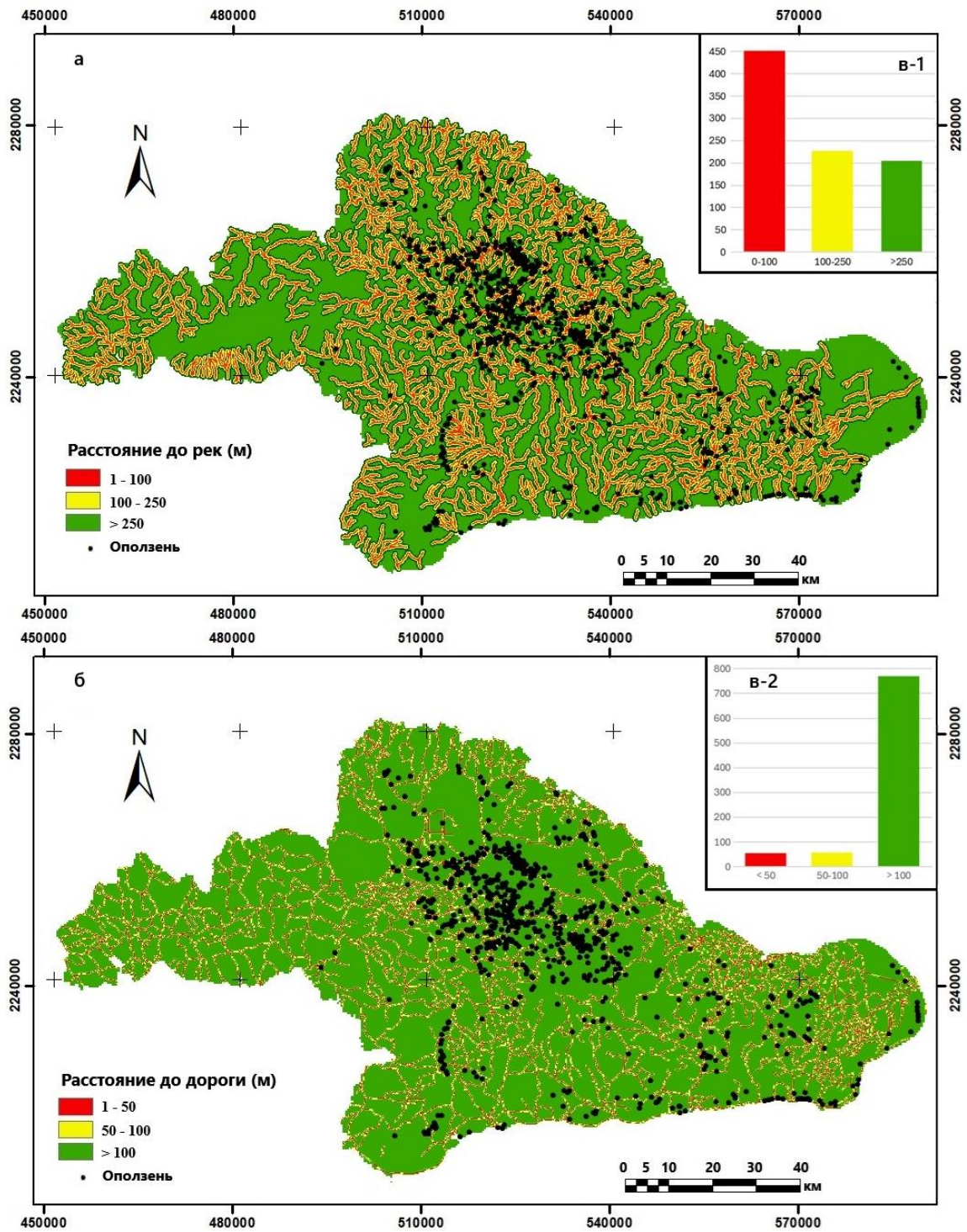


Рисунок 3.8 – Карта распределение оползней при различной ориентации склонов (а); распределение оползней при различных типах кривизны поверхности (б); количество оползней по классам в зависимости от расстояния до рек (в-1); количество оползней по классам в зависимости от расстояния до дороги (в-2) (составлено автором)

Расстояние до дороги, сооружаемой как выемка, является антропогенным фактором, влияющим на возникновение оползней, так как планировка и строительство дорожной сети для открытых горных работ может привести к изменению первоначального рельефа местности, изменению естественных схем дренажа, существенно влияя на дисбаланс рельефа и увеличивая неустойчивость. Близость к дорожной сети была проанализирована и разделена на три класса влияния (рисунок 3.8 б). Несмотря на то, что 87 % оползней находятся в низком радиусе влияния (рисунок 3.8 в-2), мы считаем, что расстояние до любого типа дорожной сети является фактором, который необходимо учитывать, в связи с их высоким влиянием на нестабильность рельефа в районе исследования, в частности на месторождения никелевых и кобальтовых руд, где расположение дорожной сети и ramпы обеспечивают доступ техники, транспорта и персонала к уровням разработки месторождения.

3.5 Анализ многочленной логистической регрессии

Мультиномиальный логистический регрессионный анализ был проведен для моделирования связи между зависимой переменной «оползневая опасность» и независимыми переменными: крутизна склона, высота, кривизна и экспозиция склона, тип породы, расстояние до разломов, тип почвы, среднее количество накопленных осадков, расстояние до рек и расстояние до дорог. Оползневая опасность имеет три категории («Высокая опасность», «Средняя опасность» и «Низкая опасность»), где «Высокая опасность» является базовой категорией (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Общие сведения о мультиномиальном логистическом регрессионном анализе (составлено автором)

Зависимая переменная	Категория	Количество	
Опасность оползней	Высокая опасность	486	(Референтное событие)
	Средняя опасность	65	
	Низкая опасность	329	
	Всего	883	

В целом, из 883 оползней на исследуемой территории [114], 62 % инвентаризированных оползней распределены по классам «высокой» и «очень высокой» опасности.

В таблице 3.6 представлены два логит-анализа, представляющие отношение шансов между оползневой опасностью и выбранными факторами. При сравнении контрольной категории с категориями «Средняя опасность» («*logit 1*») и «Низкая опасность» («*logit 2*») анализировался коэффициент, знак которого (положительный или отрицательный) указывает на направление связи между фактором и анализируемой категорией, показывая увеличение или уменьшение влияния этого фактора на вероятность возникновения оползня; кроме того, анализировалась статистическая значимость ($P < 0,05$) и влияние на отношение шансов.

Таблица 3.6 – Мультиномиальный логистический регрессионный анализ (составлено автором)

Фактор	Коэф.	СО Коэф.	Z- значение	P- значение	Отношение вероятностей	ДИ 95% (Доверительный итервал 95%)	
						Нижний	Верхний
Logit 1: (Средняя опасность / Высокая опасность)							
Константа	13,72	1,96	6,98	0	-	-	-
Крктизна откосов	-0,45	0,18	-2,5	0,012	0,64	0,45	0,91
Высота	-1,16	0,22	-5,19	0	0,31	0,2	0,49
Среднегодовое количество осадков	-1,93	0,26	-7,49	0	0,14	0,09	0,24
Расстояние до рек	-0,35	0,19	-1,81	0,071	0,71	0,49	1,03
Тип грунта	-1,14	0,23	-4,98	0	0,32	0,2	0,5
Расстояние до разлома	-0,11	0,31	-0,36	0,722	0,9	0,49	1,64
Экспозиция	-0,11	0,18	-0,62	0,534	0,89	0,62	1,28
Тип горных пород	-1,15	0,20	-5,71	0	0,31	0,21	0,47
Кривизна	0,21	0,30	0,71	0,48	1,24	0,69	2,22
Расстояние до дорог	0,62	0,26	2,41	0,016	1,86	1,12	3,09
Logit 2: (Низкая опасность / Высокая опасность)							
Константа	14,37	1,80	7,99	0	-	-	-
Крктизна откосов	-0,086	0,13	-0,64	0,519	0,92	0,71	1,19
Высота	-0,32	0,16	-1,99	0,046	0,73	0,53	0,99
Среднегодовое количество осадков	-1,49	0,25	-5,94	0	0,23	0,14	0,37

Продолжение таблицы 3.6

Фактор	Коэф.	СО Коэф.	Z- значение	Р- значение	Отношение вероятностей	ДИ 95% (Доверительный интервал 95%)	
						Нижний	Верхний
Logit 2: (Низкая опасность / Высокая опасность)							
Расстояние до рек	-2.34	0,19	-12,56	0	0,1	0,07	0,14
Тип грунта	-0.56	0,19	-2,91	0,004	0,57	0,39	0,83
Расстояние до	-3.27	0,25	-13,12	0	0,04	0,02	0,06
Экспозиция	0.001	0,13	0,07	0,942	1,01	0,78	1,3
Тип горных пород	-0.42	0,20	-2,13	0,033	0,66	0,45	0,97
Кривизна	0.41	0,23	1,81	0,07	1,5	0,97	2,34
Расстояние до дорог	0.28	0,25	1,07	0,286	1,31	0,8	2,14

Факторы восприимчивости, имеющие наибольшую значимость в обоих сравнениях, по значениям отношения правдоподобия: тип горной породы с отношениями правдоподобия 0,31 («logit 1») и 0,66 («logit 2»), высота с отношениями правдоподобия 0,31 («logit 1») и 0,73 («logit 2») и тип грунта с отношениями правдоподобия 0,32 («logit 1») и 0,57 («logit 2»). Это также свидетельствует о том, что эти три фактора оказывают значительное влияние на снижение вероятности попадания в категории «Средней опасности» и «Низкой опасности».

Расстояние до разломов особенно важно при сравнении категорий «Низкая опасность» и «Высокая опасность»: коэффициент вероятности очень низкий (0,04); это говорит о том, что данный фактор оказывает значительное влияние на снижение вероятности попадания в категорию «Низкая опасность». С другой стороны, такие факторы, как крутизна откосов, экспозиция, кривизна, расстояние до рек и расстояние до дорог, не являются значимыми хотя бы в одном из сравнений, что говорит о том, что их влияние в данной модели незначительно.

Накопление осадков оказывает сильное негативное влияние в обоих сравнениях с очень низкими значениями отношения правдоподобия 0,14 при сравнении категорий «средняя» и «высокая» опасность («logit 1») и 0,23 при сравнении категорий «низкая» и «высокая» опасность («logit 2»). Это говорит о том, что кумулятивная преципитация

является критическим фактором для снижения вероятности попадания в среднюю и низкую категории опасности.

Региональное инженерно-геологическое районирование оползневой опасности (рисунок 3.8) было получено пространственно с помощью геоинформационных систем. Коэффициенты, присвоенные в методе мультиномиальной логистической регрессии, были отнесены к различным факторам (таблица 3.6).

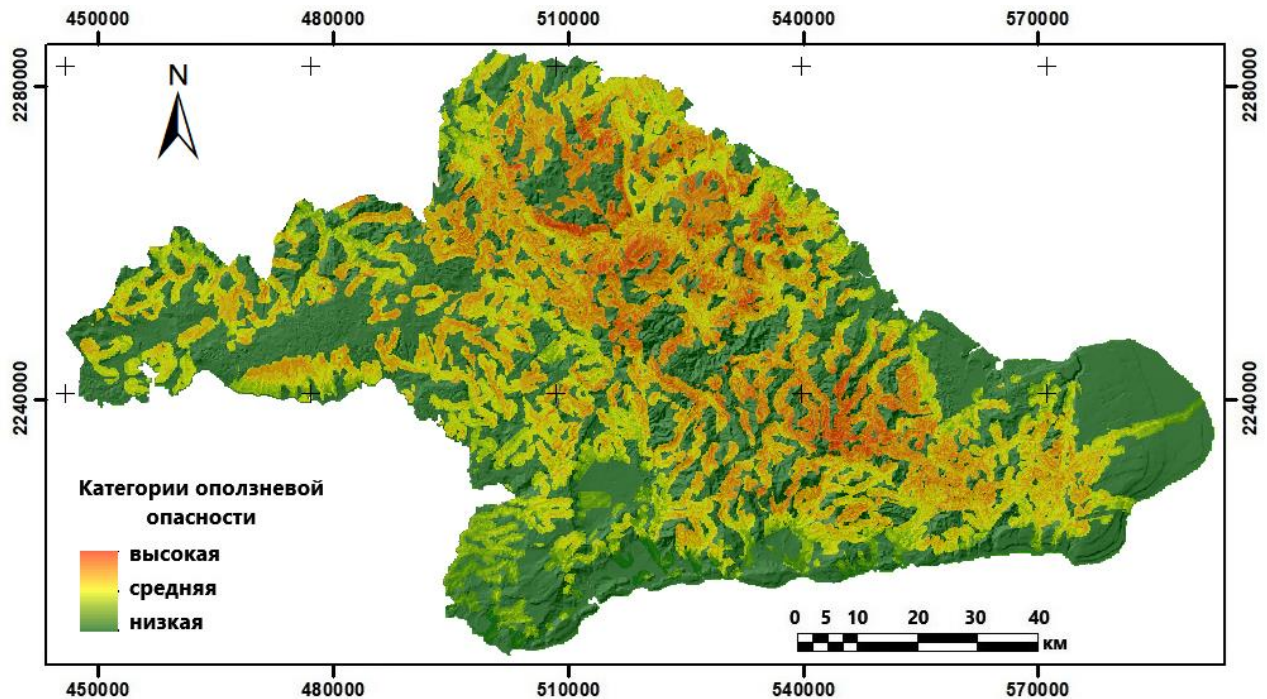


Рисунок 3.9 - Инженерно-геологическое районирование по степени оползней в массиве Сагуа-Баракоеа (составлено автором)

Валидация карты инженерно-геологического районирования на основе оползневой опасности была проведена с помощью тестов log-likelihood, slope test и goodness-of-fit, которые являются ключевыми статистическими инструментами для оценки модели. Модель сходится после 7 итераций с итоговым значением логарифмического правдоподобия -336,589, что указывает на то, что модель хорошо подходит. Для теста, где все наклоны равны 0, где р-значение $< 0,05$ предполагает, что хотя бы одна из независимых переменных оказывает значительное влияние на зависимую переменную "опасность скольжения", полученное р-значение равно нулю.

или близко к нулю, что указывает на полезность предложенной модели в прогнозировании зависимой переменной (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Валидация результатов анализа мультиномиальной логистической регрессии (составлено автором)

История итераций			
Шаг		Лог-правдоподобие	
0		-791.906	
1		-438.063	
2		-361.402	
3		-339.975	
4		-336.697	
5		-336.59	
6		-336.589	
7		-336.589	
Проверка наклона			
Степени свободы		G-статистика	р-значение
20		910.634	0
Критерии согласия			
Метод	Хи-квадрат	Степени свободы	P
Пирсон	1116.77	1552	1
Отклонение	655.5	1552	1

Для проверки правильности подгонки мы использовали тест Пирсона, который сравнивает наблюдаемые частоты с частотами, ожидаемыми по модели. Высокое значение р-value (в данном случае 1) говорит о том, что нет доказательств для отклонения нулевой гипотезы о том, что модель хорошо соответствует данным, поэтому модель хорошо подходит.

Тест на отклонение измеряет расхождение между предложенной моделью и насыщенной моделью, чтобы оценить, насколько хорошо модель соответствует наблюдаемым данным. Для этой модели было получено высокое р-значение ($p = 1$), что также говорит о том, что модель хорошо подходит к данным.

Наконец, она была проверена с использованием данных инвентаризации предыдущих оползней на исследуемой территории (рисунок 3.10 а). Предполагается, что если предыдущие оползни на исследуемой территории происходят в пределах зон

высокой или средней опасности в полученном районировании, то прогнозная модель вполне обоснована [23].

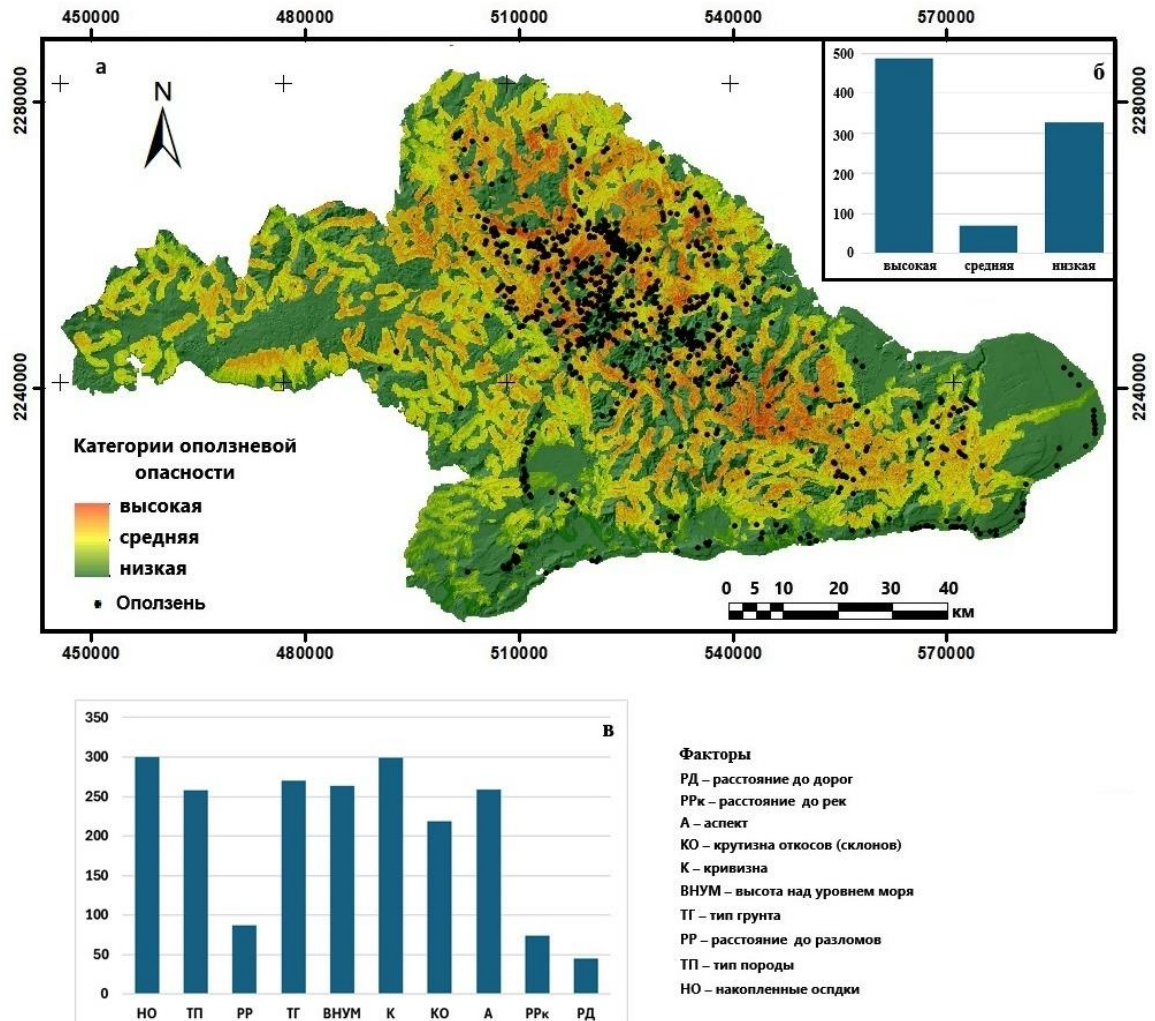


Рисунок 3.10 – Распределение оползней по инженерно-геологическому районированию (а); распределение оползней по факторам (б); связь между факторами и количеством оползней (в) (составлено автором)

Из общего числа оползней, зарегистрированных в массиве Сагуа - Баракоа (883), 486 оползней распределены в зонах высокой опасности и 69 - в зонах средней опасности (рисунок 3.10 б). Следует отметить, что 328 оползней распределены в зонах низкой опасности. Мы считаем, что при инженерно-геологическом районировании метод МЛР может завышать количество оползней в классе низкой опасности, относя к этой категории оползни, распределенные по факторам с диапазонами, характерными для классов средней и высокой опасности, особенно по таким факторам, как

накопленные осадки (300), тип почвы (270), высота (264), тип породы (258) и крутизна склона (219) (рисунок 3.10 в).

3.6 Выводы по Главе 3

1. Региональная оценка и прогнозирование оползневых процессов могут быть определены с помощью подходов, объединяющих качественные, полуколичественные и количественные методы. Использование технологий на основе географических информационных систем (ГИС) является важной платформой для оценки оползней благодаря их способности интегрировать, анализировать и визуализировать пространственные данные, что позволяет эффективно управлять рисками и обеспечивать более безопасное планирование горнодобывающих районов.

2. Региональное инженерно-геологическое районирование по степени оползневой опасности в массиве Сагуа-Баракоа с использованием вероятностного метода мультиномиальной логистической регрессии позволяет свести к минимуму субъективность качественных и полуколичественных методов.

3. Проведённое региональное инженерно-геологическое районирование по степени оползневой опасности массива Сагуа-Баракоа с использованием вероятностного метода мультиномиальной логистической регрессии позволяет избавиться от субъективности качественных методов в оценке региональной оползневой опасности. Основные результаты и выводы заключаются в следующем:

а) выделены участки с тремя категориями опасности: высокой, средней и низкой, что поможет обосновать и оптимизировать выбор менее инвазивных технологий добычи, безопасное проектирование откосов, планирование и мониторинг эксплуатации, а также реализацию мер по стабилизации откосов и управлению водоотливом на карьерах;

б) факторы восприимчивости к оползням, связанные с геоморфологией (крутизна и высота склонов), типом породы, типом грунта, вносят дифференцированный вклад.

4. Анализ геологического строения, структурных характеристик, типа грунта и физико-механических свойств позволил охарактеризовать различные комплексы пород массива и его образований в зависимости от их восприимчивости к оползням. Восемьдесят процентов оползней (706 шт) были сосредоточены в метаморфическом комплексе (формация Сьерра-Пуриал) и офиолитовом комплексе, что свидетельствует об их высокой восприимчивости. На глинистых и глинисто-суглинистых грунтах было зарегистрировано наибольшее количество оползней (419 шт. и 330 шт. соответственно). Кроме того, 87 % оползней произошли в пределах 500 м от разломов, что подтверждает высокую восприимчивость территорий, расположенных вблизи тектонических нарушений.

5. В районах с большим количеством накопленных осадков произошло 88,1 % оползней (778 шт.), а фактор, связанный с близостью к дорожной сети в выемках (несмотря на то, что 87 % оползней были расположены в районах с низким уровнем влияния строительства и эксплуатации дорог), является фактором, который необходимо принимать во внимание, особенно в районе месторождений никеля и кобальта, поскольку они являются критическими факторами, снижающими устойчивость.

6. Анализ методом мультиномиальной логистической регрессии показывает, что факторы: накопленные среднегодовые осадки, тип породы, тип почвы, расстояние до разломов, высота оказывают значительное влияние на снижение вероятности попадания в категории меньшей опасности («Средняя опасность» и «Низкая опасность») по сравнению с контрольной категорией («Высокая опасность»). С другой стороны, такие переменные, как крутизна склона, экспозиция, кривизна и расстояние до дорог, не являются значимыми хотя бы в одном из сравнений, что говорит о том, что их влияние в данной модели незначительно.

7. Метод мультиномиальной логистической регрессии, возможно, переоценивает количество оползней в классе низкой опасности, относя к этой категории оползни, которые имеют характеристики, более характерные для классов

средней и высокой опасности, особенно по таким факторам, как среднегодовое накопление, тип породы и расстояние до разломов и тип грунта.

ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ В МАССИВЕ САГУА-БАРАКОА

Прогнозирование оползневой опасности в районах открытых горных работ является важной задачей для обеспечения стабильности горных работ и безопасности рабочих. На эти геодинамические явления влияет сложное взаимодействие геологических, климатических и эксплуатационных факторов, что делает необходимым разработку надежных методик их прогнозирования.

4.1 Методика прогноза оползневых процессов на открытых месторождениях полезных ископаемых в массиве Сагуа-Баракоа

В данном разделе представлены методы прогнозирования оползневых процессов на открытых месторождениях полезных ископаемых в массиве Сагуа-Баракоа, которые были представлены в методологической схеме в предыдущей главе (см. рисунок 3.2). Эти методы основаны на учете факторов восприимчивости (геоморфологических, геологических и антропогенных), осадков как основного провоцирующего фактора и использовании современных инструментов, таких как искусственные нейронные сети, для выявления и прогнозирования опасных зон. Такой подход не только способствует повышению точности прогнозирования оползней, но и создает прочную основу для выбора эффективных технологий добычи полезных ископаемых и реализации своевременных и эффективных мер по смягчению последствий, обеспечивая тем самым устойчивое развитие горнодобывающей деятельности.

4.1.1 Определение критических значений количества атмосферных осадков для прогнозирования оползней в районах добычи полезных ископаемых массива Сагуа-Баракоа

Определение критических значений количества атмосферных осадков имеет важное значение для прогнозирования оползней, поскольку позволяет определить

критические уровни осадков, которые могут дестабилизировать рельеф и тем самым вызвать оползни. Эти критические значения выступают в качестве минимальных пределов, при превышении которых возможно возникновение оползней, что облегчает управление рисками в уязвимых районах. Точное определение этих критических значений способствует разработке более точных прогностических моделей, повышая эффективность систем раннего предупреждения [69, 82].

Рейхенбах и другие (1998) [122] определили термин «критические значения количества атмосферных осадков» как минимальный или максимальный уровень некоторой величины, при превышении которого происходит какой-либо процесс [74, 149].

Для того чтобы лучше понять поведение осадков как пускового фактора, использовались данные осадков, полученные на станциях, обслуживаемых Институтом метеорологии и Институтом гидроресурсов, за 30 лет, соответствующих периоду 1992-2020 гг.

Метод, предложенный Стедингером (1993) для расчета критических значений, в основном используется при анализе гидрологических и геологических данных, особенно при выявлении выбросов в рядах данных об осадка. Предлагаемое выражение для расчета критических значений выглядит следующим образом (4.1) [137]:

$$\bar{x} \pm k_n S_y \quad (4.1)$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение выборки, S_y – стандартное отклонение выборки, k_n – критическое значение, зависящее от размера n и рассчитываемое по следующему уравнению (4.2) [137]:

$$k_n = -0.9043 + 3.345\sqrt{\log(n)} - 0.4046 \log(n) \quad (4.2)$$

Уравнение (4.1) позволяет определить диапазон вокруг среднего арифметического ($\bar{x}$). Такой подход полезен для исключения экстремальных значений, которые могут исказить результаты последующих анализов. Для нормальных данных самое большое наблюдение превзойдет уравнение (4.1) с

вероятностью всего 10 процентов; поэтому уравнение представляет собой односторонний тест на промахи при 10-процентном уровне значимости для нормального распределения; значения k_n приведены в таблице для выборок $n > 150$ [137].

Для этого выражения небольшие выбросы обычно являются достоверными наблюдениями, но поскольку логарифмы наблюдаемых пиков накопления осадков используются для подгонки двухпараметрического распределения с обобщенным коэффициентом отклонения, одно или несколько необычных значений могут исказить все подогнанное частотное распределение. Поэтому обнаружение таких значений очень важно, и для выявления проблем необходимо графически сравнить подогнанные распределения с данными [137].

Период повторяемости следует рассчитывать при расчете критических значений осадков, поскольку он позволяет соотнести конкретный уровень осадков с ожидаемой частотой их выпадения. Период повторяемости относится к среднему интервалу времени, в течение которого ожидается наступление события, равного или превышающего заданный критическое значение. В контексте оползней эта концепция используется для соотнесения критических значений осадков (интенсивности или накопления) с вероятностью экстремального события, которое может вызвать неустойчивость откоса.

Период повторяемости (T) напрямую связан с вероятностью превышения $P(X > x)$ уравнением (4.3) [137]:

$$T = \frac{1}{P(X > x)} \quad (4.3)$$

где T – период повторяемости в годах, $P(X > x)$ – вероятность того, что событие превысит критическое значение в данном году.

Таким образом, при заданном периоде возврата критическое значение (x) может быть рассчитано на основе функции обобщенного распределения экстремальных значений типа I или распределения Гумбеля (*GEV – Generalized Extreme Value*),

обычно используемой для моделирования экстремальных гидрометеорологических явлений $F(x)$, в соответствии со следующим уравнением (4.4) [137].

$$F(x) = \exp\left(e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}\right) \quad (4.4)$$

где μ – параметр местоположения, σ – параметр масштаба, x – значение переменной накопленных осадков.

Период повторяемости используется для определения того, какое количество осадков (по интенсивности или накоплению) необходимо для насыщения грунта или преодоления сопротивления склона. Критические значения количества осадков, рассчитанные для разных периодов повторяемости, позволяют моделировать сценарии и прогнозировать, когда может произойти разрушение грунта.

Для получения единого репрезентативного критического значения для каждого периода возврата мы используем статистический подход, заключающийся во взвешенном усреднении по среднегодовому количеству осадков для каждой станции, с учетом репрезентативности станций по режимам осадков. Уравнение для среднего критического значения выглядит следующим образом (4.5) [137]:

$$T_n = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{i,n} W_i)}{\sum W_i} \quad (4.5)$$

где T_n – среднее критическое значение для периода возврата n , мм; $T_{i,n}$ – критическое значение станции i в период повторяемости n , мм; N – число метеостанций, W_i – среднегодовое количество осадков на каждой метеостанции, мм.

4.1.2 Машинное обучение для прогнозирования оползневых процессов

Машинное обучение изучает, как компьютеры могут обучаться или улучшать свою работу на основе данных [77, 96], учитывая как фазы обучения, так и тестирования (рисунок 4.1). В этой области знаний было много достижений, когда исследователи создавали модели для изучения больших объемов данных и делали выводы или «учились» на основе полученных результатов. Машинное обучение стало основным направлением инноваций, когда создаются программы, которые после

завершения работы могут продолжать обучение, не требуя вмешательства человека, даже при добавлении новых данных.



Рисунок 4.1 – Общая структура прогностической модели на основе машинного обучения, учитывающая как этап обучения, так и этап тестирования [131]

Алгоритмы машинного обучения делятся в основном на четыре категории: обучение с учителем, обучение без учителя, полуобучение и обучение с подкреплением [131]. Методики обучения связаны с тем, насколько они применимы для решения поставленной исследователем задачи:

- обучение с учителем (контролируемое обучение) — метод, применяемый при наличии явно определённых целевых переменных, которые алгоритм должен предсказать на основе входных данных в соответствии с постановкой задачи [132]. Модели требуется набор ранее помеченных или классифицированных данных и коллекция обучающих примеров для обучения и настройки путем оценки и сравнения и вывода функции с ожидаемым типом результата.

- обучение без учителя (неконтролируемое обучение) — применяется при отсутствии размеченных эталонных данных и не требует экспертного вмешательства. Метод широко используется для извлечения информативных признаков, выявления

скрытых закономерностей и значимых структур, кластеризации объектов, а также в исследовательских целях [131].

- полуобучение – этот метод задуман как гибридизация вышеупомянутых методов с наблюдением и без наблюдения, поскольку он работает как с мечеными, так и с немечеными данными [131].

- обучение с подкреплением — это метод машинного обучения, который позволяет программным агентам и автоматизированным системам самостоятельно находить оптимальную стратегию поведения в заданной среде для максимизации эффективности. По сути, это средовой подход к обучению [132]. Данная методика применяется для создания ИИ-моделей, способных повысить уровень автономности или оптимизировать работу сложных систем: робототехники, автономного вождения, производственных процессов и логистики цепочек поставок.

Искусственные нейронные сети относятся к одному из многочисленных наборов алгоритмов, реализующих различные виды искусственного интеллекта; они являются инструментом направления машинного обучения, которое включает в себя алгоритмы, способные обучаться или самомодифицироваться при получении дополнительной информации, не будучи явно запрограммированными.

Модели, основанные на искусственных нейронных сетях, просто имитируют нейронную систему человека. Эта теория была разработана Маккалохом и Питтсом (1943) для имитации процесса нейронной активности в биологических сетях и с тех пор успешно применяется для решения многих проблем, включая предотвращение и предсказание природных катастроф, таких как смещение или проседание земли [118], эрозия [83], гидрометеорологические опасности [140] и др. Их можно считать эвристическими алгоритмами в том смысле, что они способны учиться на опыте и поэтому могут распознавать новые, еще не воспринятые данные [91].

Прогнозирование оползневой опасности представляет собой предсказание будущих событий на основе опыта прошлых оползней (инвентаризация оползней), что является подходящим приложением для искусственных нейронных сетей,

благодаря их способности изучать сложные и нелинейные связи между переменными, что может привести к лучшей производительности при решении сложных задач.

Искусственная нейронная сеть характеризуется схемой связей между нейронами или узлами, которая называется нейронной архитектурой. Обычно архитектура нейронной сети определяется слоем сбора данных с рядом входных узлов, промежуточным или скрытым слоем с узлами, в которых информация обрабатывается по ориентированным правилам, и выходным слоем с узлами, из которых выводятся результаты обработки данных (рисунок 4.2).

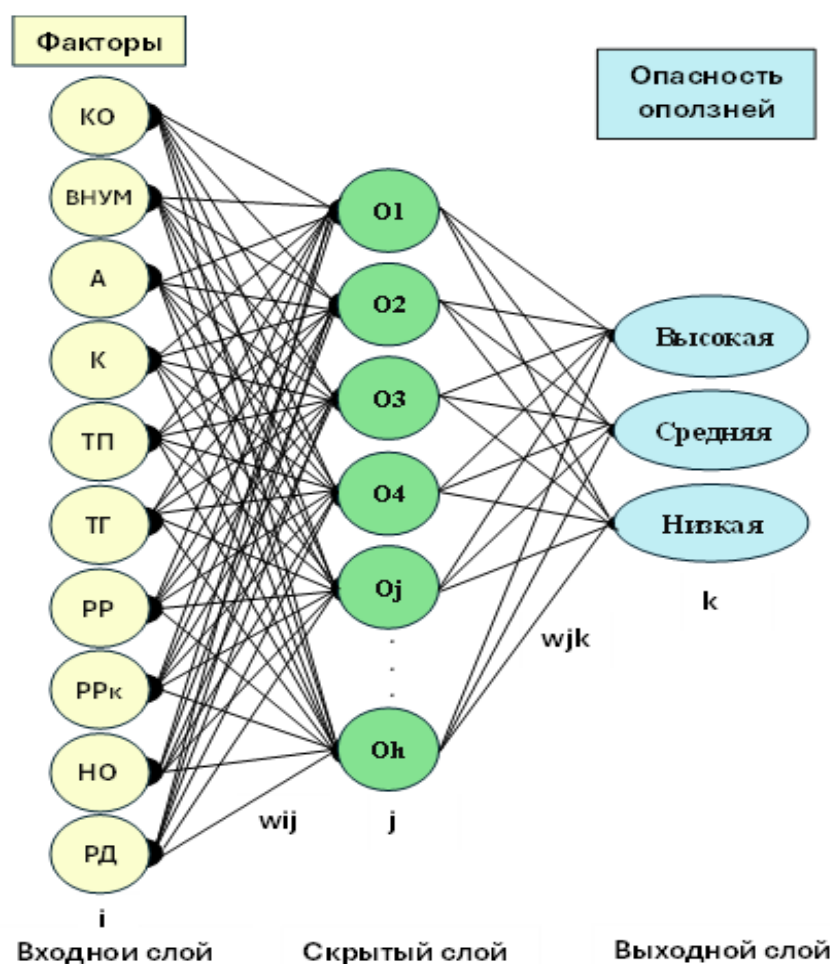


Рисунок 4.2 – Структура нейронной сети (составлено автором)

Другими словами, слои состоят из взаимосвязанных между собой узлов, где каждый узел является базовым элементом, который будет давать определенную реакцию на входные веса, получаемые другими узлами.

Нейронные сети способны обрабатывать неточные и нечеткие данные, поэтому они могут работать с непрерывными и категориальными данными без ущерба для гипотез. Так, во входном слое вводятся факторы, определяющие оползневую опасность, которые могут быть количественными или качественными. Узлы скрытого слоя обрабатывают данные входного слоя, используя правила взвешивания введенных факторов, и на выходе получают данные для разработки прогноза оползневой опасности.

Существуют совершенно разные модели нейронных сетей, в которых используются совершенно разные философии проектирования, правила обучения и функции построения ответа. Если провести классификацию в зависимости от пути, по которому информация проходит в сети, что также называется процессом обучения сети, то можно выделить сети с прямым (forward-propagation) и обратным распространением (back-propagation).

Сети с прямой передачей имеют однонаправленную структуру, что делает их простыми для интерпретации, но в отличие от них они не могут эффективно анализировать сложные или нелинейные модели без использования большого количества слоев и нейронов, что может привести к чрезмерной подгонке результатов [78, 89]. Для решения нелинейных задач, в которых имеется более одного слоя, используется метод многослойного перцептрона (Multilayer Perceptron). Эти слои располагаются между входным и выходным слоем [147]. Многослойный перцептрон - это контролируемая сетевая парадигма, в которой обучение происходит путем предъявления сети пар вида (вход, желаемый выход), а настройка параметров осуществляется известным методом убывающего градиента с помощью алгоритма обратного распространения.

Для искусственной нейронной сети способность к обучению является одной из основных характеристик. В контексте искусственных систем обучение можно определить как процесс обновления внутреннего представления системы в ответ на

внешние стимулы таким образом, чтобы улучшить выполнение поставленной задачи [40].

Алгоритм обучения определяет веса сети, которые будут корректироваться между последовательными циклами обучения. Таким образом, процесс обучения сводится к систематическому изменению весов связей для кодирования желаемых отношений между входом и выходами [65].

Алгоритм обратного распространения, также известный как обобщенное правило дельты, является наиболее широко используемым алгоритмом в процессе обучения сети. Этот алгоритм был впервые разработан Вербосом (1988) [152], а затем, МакКлелландом и др. (1986) [101] и Румельхартом и др. (1988) [126]. Это метод обновления синаптических весов сети путем обратного распространения, который представляет собой многократное применение вычислений частных производных ошибок по отношению к весу, следуя цепному правилу следующим образом (4.6) [65]:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial y} * \frac{\partial y}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial Error}{\partial Weight} = \frac{\partial Error}{\partial Activacion} * \frac{\partial Activacion}{\partial Weight} \quad (4.6)$$

Применение этого правила происходит от объективной функции по отношению к выходным блокам, затем производные от выхода последнего скрытого слоя к входу последнего скрытого слоя; затем вход последнего скрытого слоя к весам между ним и предпоследним скрытым слоем, и так далее, вплоть до выходного слоя. В этом процессе обновления синаптических весов происходит обратный поток информации от выходного слоя к входному [141].

Все соединения между узлами имеют соответствующие веса (w_{ij}) (см. рисунок 4.2), называемые синаптическими весами, которые изначально являются случайными. Положительные и отрицательные числа, выраженные на каждой линии связи, соответствуют весу, назначенному для каждого входа узла. Таким образом, нелинейные задачи классификации могут быть решены с помощью промежуточных слоев, называемых скрытыми, которые не взаимодействуют напрямую с внешними

слоями. Эти скрытые слои вносят нелинейность в сеть с помощью функции активации.

Когда значение проходит через соединение, оно умножается на вес, связанный с этим соединением. Принимающий узел суммирует веса всех узлов, с которыми он связан в предыдущем слое. Формально это можно объяснить выражением (4.7) [141]:

$$h_j = \sum_i w_{ij} x_i \quad (4.7)$$

где w_{ij} – вес между узлом i и узлом j , x_i – значение узла i .

Значение, полученное узлом j , o_j , является функцией активации f , оцениваемой как сумма, полученная узлом h_j , согласно уравнению (4.8) [141]:

$$o_j = f(h_j) = f\left[\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i\right] \quad (4.8)$$

В свою очередь, выходное значение y_k является функцией весов между скрытыми и выходными узлами, w_{jk} и выходного значения входных узлов, o_j в соответствии с уравнением (4.9) [141]:

$$y_k = f\left[\sum_i^h w_{jk} o_j\right] \quad (4.9)$$

Функция f – это так называемая функция активации. Для многослойного перцептрона одной из наиболее часто используемых функций активации является сигмоидальная функция. Это нелинейная функция, которая применяется к сумме весов входов перед переходом к следующему слою (уравнение 4.9). Эта функция имеет непрерывный диапазон значений в интервалах $[0,1]$ и $[-1,1]$, соответственно. Однако для того, чтобы можно было применить алгоритм обратного распространения, соответствующие функции (передаточные функции в элементах процесса) должны быть дифференцируемыми. Их производная может быть выражена в виде следующего уравнения (4.10 – 4.11) [141]:

$$o_j = f(h_j) = \frac{1}{1+e^{-h_j}} \quad (4.10)$$

$$f'(h_j) = f(h_j)(1 - f(h_j)) \quad (4.11)$$

Расчет квадратичной ошибки (E) для входного слоя в алгоритме обратного распространения осуществляется по уравнению (4.12) [141]:

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (d_k - y_k) \quad (4.12)$$

где d_k – желаемое выходное значение обучающей модели; y_k – фактический выходной вектор алгоритма обратного распространения для входного слоя.

Основной целью алгоритма является минимизация ошибки Е-квадрат, поэтому в нейронной сети происходит обратное распространение сигнала для пересчета весов между слоями и изменения существующих. Веса (w_{ij}) корректируются в соответствии с уравнениями (4.13 – 4.14)[141]:

$$w_{ij}' = w_{ij} + \Delta w_{ij} \quad (4.13)$$

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{dE}{dw_{ij}} \quad (4.14)$$

где Δw_{ij} – инкрементная разница весов, η – параметр, управляющий скоростью обучения, который является положительным и меньше единицы.

Если при вычислении величины изменения веса с помощью техники, называемой импульсом, к предыдущему изменению добавляется дробь, то этот дополнительный член стремится удерживать изменения веса в том же направлении. Считается, что первые веса должны быть случайными величинами, тогда уравнения изменения веса выходного слоя вычисляются с помощью уравнений (4.15 – 4.16) [141]:

$$w_{ij}(n + 1) = \eta(\delta_j o_i) + \alpha \Delta w_{ij} \quad (4.15)$$

$$\delta_j = (d_k - y_k) y_k (1 - y_k) \quad (4.16)$$

где η – скорость обучения, δ_j – индекс модификации ошибки, α – параметр момента.

Этот процесс обратного распространения повторяется при обучении сети до тех пор, пока ошибка сети не будет минимизирована или не достигнет приемлемого порога. В результате настройки сети получаются веса, которые определяют модель

прогноза оползневой опасности. Впоследствии эти веса будут использоваться на этапе классификации опасных зон.

После того как процесс обучения определен, необходимо объективно оценить обобщающую способность сети на основе набора независимых данных - тестового набора данных - которые ранее не участвовали в этапе обучения. Актуальным является анализ модели с точки зрения производительности модели, то есть необходимо оценить, насколько эффективна модель искусственной нейронной сети. Для проверки результатов отбирается выборка. Таким образом, 70 % выборки используется для этапа обучения нейронной сети, а оставшиеся 30 % - для проверки.

График операционной характеристики приёмника (ОХП) – это показатель эффективности для проблемы классификации по различным категориям оползней; это кривая вероятности, представляющая степень или меру делимости, которая показывает, насколько хорошо модель способна различать классы. Чем выше значение, тем лучше модель различает «0» как «0» и «1» как «1» на участках с данной категорией оползневой опасности.

4.1.3 Валидация модели прогнозирования

После того, как прогноз оползней для открытых месторождений получен, результат подтверждается методом на горном месторождении на основе расчетов устойчивости откосов в отдельных секторах для подтверждения актуальности прогнозируемой опасности на исследуемой территории.

Для расчета коэффициента безопасности откоса, который определяется как отношение между прочностью грунта на сдвиг и напряжением сдвига для поддержания равновесия [60], была использована методика предельного равновесия, которая учитывает прочность на сдвиг (τ) вдоль поверхности, согласно теории Мора-Кулона. Теория Мора-Кулона гласит, что когезия, угол внутреннего трения и приложенное нормальное напряжение влияют на прочность грунта на сдвиг, и подтверждается уравнением (4.17) [60]:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4.17)$$

где τ – прочность на сдвиг, кПа; c' – когезия, кПа; σ' – нормальное напряжение, кПа; ϕ' – угол трения, град.

Коэффициент запаса (КЗ) прочности рассчитывается по методу Моргенштерна-Прайса, который учитывает как равновесие сил, так и равновесие моментов, по формуле (4.18) [60]:

$$КЗ = \sum \frac{(c' * L_i + N_i * \tan(\phi'))}{\sum W_i \sin(\alpha_i)} \quad (4.18)$$

где c' – сцепление горной породы, кПа; L_i – длина поверхности скольжения, м; N_i – нормальная сила между блоками, кН; ϕ' – угол трения горной породы, град; W_i – вес сегмента, кН; α_i – угол наклона поверхности скольжения, град.

$КЗ < 1$ – неустойчивый откос; откос в этих условиях может разрушиться;

$КЗ = 1$ – граничное условие устойчивости, связанное с неизбежным разрушением;

$КЗ > 1$ – откос считается устойчивым, чем выше КЗ, тем меньше вероятность разрушения откоса при воздействии критических условий.

4.2 Определение критических значений количества атмосферных осадков

Основные характеристики осадков в районе исследования

Оценка взаимосвязи между оползнями и осадками во время и сразу после воздействия экстремальных метеорологических явлений, таких как ураганы и ливни, является одной из основных задач данного раздела. Для этого необходимо знать основные характеристики осадков, которые в массиве Сагуа-Баракоа представлены двумя основными типами:

Осадки циклонического происхождения: самые сильные дожди выпадают во время прохождения тропических циклонов. Они охватывают относительно небольшие территории (их диаметр обычно составляет от 80 до 500 км) и сопровождаются очень сильными проливными дождями. Восточный регион Кубы занимает одно из последних мест по количеству циклонов по сравнению с другими

регионами страны, однако именно в этом регионе было зарегистрировано наибольшее количество ежедневно накапливаемых осадков во время прохождения ураганов.

Осадки конвективного происхождения: они вызываются подъемом теплых воздушных масс в верхние слои атмосферы и их последующей конденсацией. Причиной конвекции является температурный контраст, образующийся в результате нагрева воздуха у поверхности земли и охлаждения в верхних слоях или вследствие механического подъема над фронтальной поверхностью или горным хребтом. Интенсивность конвективных осадков может быть очень изменчивой, что обусловлено множеством факторов, включая динамику атмосферы или местные условия, такие как рельеф местности, которые могут увеличить интенсивность и накопление осадков в определенных районах [148].

Другая особенность ливневых осадков заключается в том, что их интенсивность меняется во времени, устанавливая обратно пропорциональную зависимость между интенсивностью осадков и их продолжительностью; с увеличением продолжительности осадков их интенсивность уменьшается. Поэтому осадки могут быть очень интенсивными и непродолжительными, или не такими интенсивными, но более продолжительными. Более интенсивные осадки, выпадающие на территории массива Сагуа-Баракоа, связаны с прохождением тропических циклонов или наличием гор, которые выступают в качестве орографических барьеров и усиливают конвекцию воздушных масс, вызывающих осадки.

При анализе максимальных суточных значений осадков за период 1992-2020 гг. в исследуемом районе данные демонстрируют разнообразие в течение периода (рисунок 4.3). Все метеостанции демонстрируют высокую межгодовую изменчивость, с чрезвычайно дождливыми годами (например, 2016 г. в Пунта-де-Маиси и Джамале) и засушливыми годами (например, 1999 г. в Паленке и 2013 г. в Пунта-де-Маиси). В последние годы (2016-2020) наблюдается увеличение частоты экстремальных явлений, особенно в Джамале и Пунта-де-Маиси. Это может быть связано с изменениями местных глобальных климатических моделей [110 – 112].

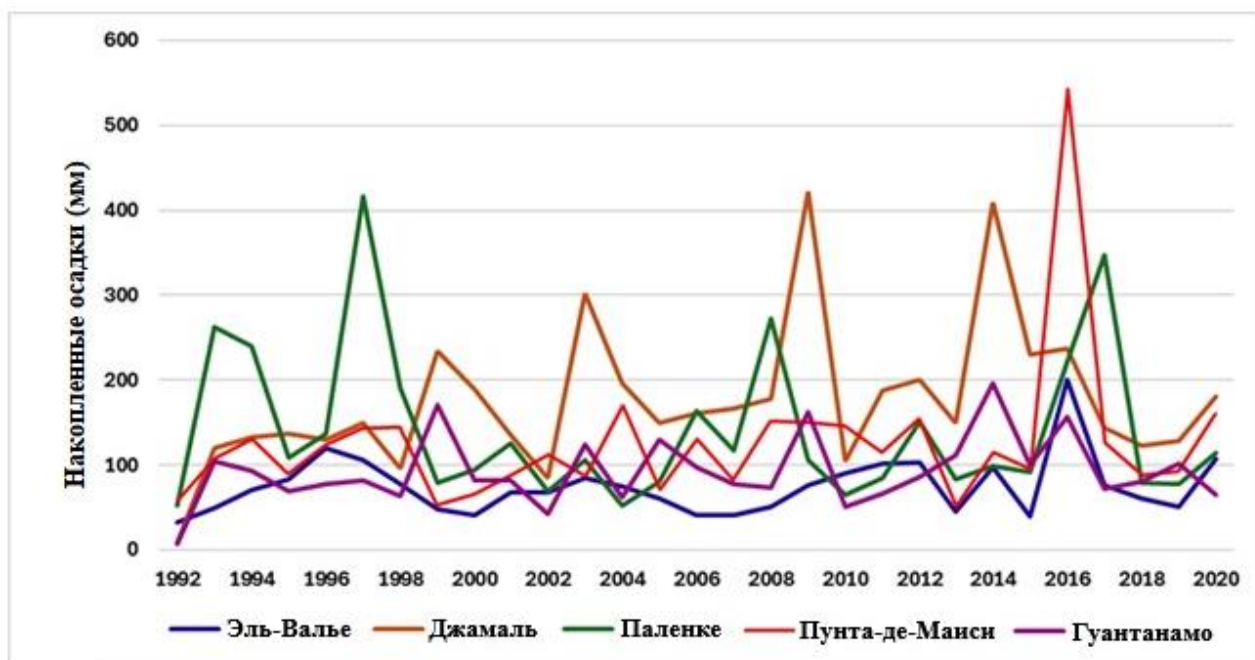


Рисунок 4.3 – Поведение максимальных суточных значений осадков в период 1992-2020 гг. (составлено автором)

Если говорить о тенденциях, то можно сделать вывод, что метеорологические станции Джамаль и Пунта-де-Маиси демонстрируют небольшую тенденцию к увеличению количества осадков, в то время как Эль-Валле и Паленке не демонстрируют четкой тенденции, хотя в последние годы наблюдается большая изменчивость диапазонов осадков. Эти результаты позволяют предположить, что в регионе происходят изменения в характере выпадения осадков с увеличением частоты и интенсивности экстремальных явлений. Это имеет важные последствия для возникновения событий, связанных с гидрометеорологическими факторами, таких как оползни.

В таблице 4.1 представлены результаты, полученные для критических значений осадков для каждой метеостанции и среднее критическое значение, соответствующее периодам возврата 2, 5, 10 и 20 лет. По мере увеличения периода возврата критические значения осадков увеличиваются, что указывает на то, что в будущем экстремальные осадки будут происходить реже.

Таблица 4.1 – Критические значения осадков и периоды повторяемости в районе исследования (составлено автором)

Метеостанции	Средние осадки (мм)	Стандартное отклонение	масштабный параметр	Критическое значение осадков для периода повторения (мм)			
				2 года	5 лет	10 лет	20 лет
Эль-Валье	77,2	35,1	27,4	97,5	124,3	141,2	157,1
Джамаль	180,5	90,2	70,3	230,1	290,4	330,2	369,1
Паленке	150,3	100,5	78,4	200,7	260,1	300,5	340,2
Пунта-де-Маиси	120,3	110,3	8,1	180,5	250,3	300,1	349,8
Гуантанамо	95,4	110,3	31,3	120,1	150,3	170,2	190,1
Среднее критическое значение (мм)				163,35	230,4	274,7	317,24

Станция Джамаль имеет самые высокие значения, что подтверждает тот факт, что в этом районе осадки выпадают чаще и интенсивнее, чем в районах, где расположены другие метеорологические станции. Станция Гуантанамо показывает самые низкие значения, что свидетельствует о том, что именно на этой станции выпадает наименьшее количество осадков в экстремальных ситуациях.

Определение эмпирических или статистических критических значений является отличным показателем для прогнозирования оползней, поскольку позволяет связать вероятность оползней с установленными моделями прогнозирования погоды. Следовательно, критические значения осадков, а также другие факторы, которые могут повысить их эффективность, являются важными элементами для разработки систем раннего предупреждения об оползнях.

На рисунке 4.4 показаны критические значения, рассчитанные для накопленных осадков, соответствующих прохождению урагана «Мэтью», одного из метеорологических явлений, нанесших наибольший ущерб северо-восточной части Кубы в октябре 2016 года. Показаны критические значения для периодов возврата.

Анализ распределения оползней по критическим значениям показывает, что для 2-летнего периода повторяемости 89,1 % оползней (552) произошли при количестве осадков, равном или превышающем критическое значение (рисунок 4.4 а), 73 %

оползней (453) превысили критическое значение для 5-летнего периода повторяемости (рисунок 4.4 б), а для 10- и 20-летнего периодов повторяемости только 44 % (277) и 30 % (191) оползней соответственно превысили критические значения для этих периодов (рисунок. 4.4 в, г).

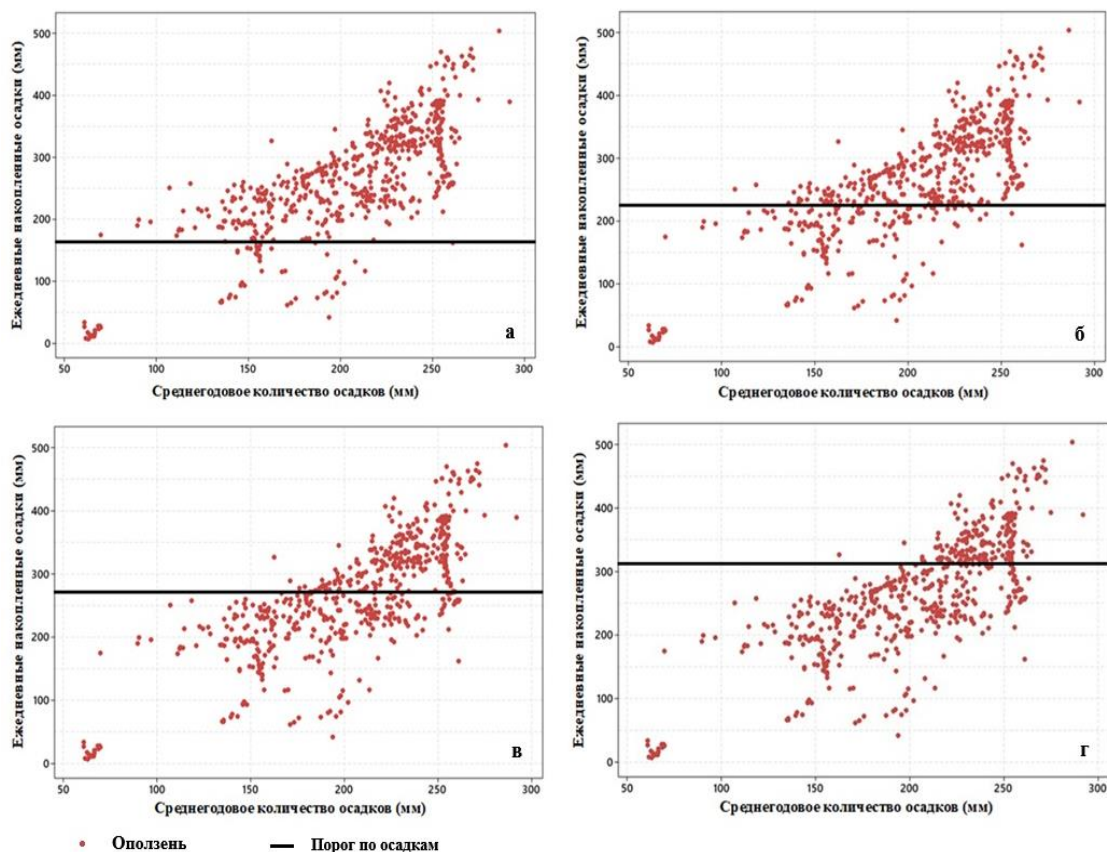


Рисунок 4.4 - Оценка критических значений осадков для возникновения оползней после урагана Мэтью в массиве Сагуа-Баракоа: а – критическое значение для 2-летнего периода повторяемости; б – критическое значение для 5-летнего периода повторяемости; в – критическое значение для 10-летнего периода повторяемости; г – критическое значение для 20-летнего периода повторяемости (составлено автором)

Чем длиннее период повторяемости, тем выше критическое значение количества атмосферных осадков, в то время как количество оползней уменьшается. Это говорит о том, что при больших периодах повторяемости экстремальные события происходят реже. В связи с этим выводом рекомендуется использовать критические значения количества осадков с периодом повторяемости 2 года, так как они

соответствуют частому накоплению осадков в районе исследования и наибольшему количеству оползней. Это свидетельствует о том, что исследуемая территория в значительной степени подвержена неустойчивости откосов и активизации оползневых процессов даже при умеренных осадках, выпадающих в периоды низкой повторяемости, и ситуация может усугубляться, когда этот элемент вступает в синергию с геоморфологическими, геологическими, гидрологическими, гидрогеологическими и антропогенными факторами.

4.3 Прогнозирование оползневых процессов на месторождениях полезных ископаемых открытым способом

Для моделирования прогноза методом искусственной нейронной сети использовалась программа Matlab с применением алгоритма обучения Левенберга – Маркварда, который представляет собой комбинацию методов нисходящего градиента и Гаусса-Ньютона. Данные были разделены на три набора: обучающий набор – для настройки весов сети; валидационный набор – для контроля эффективности модели в процессе обучения, чтобы избежать возможного перебора; тестовый набор - для оценки итоговой эффективности модели после ее обучения с помощью квадратичной ошибки. Обучение нейронной сети прошло успешно (рисунок 4.5).

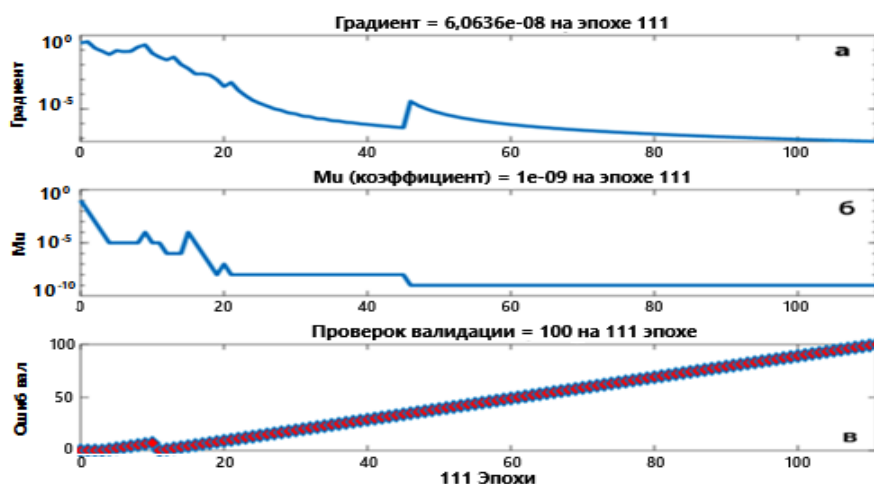


Рисунок 4.5 – Параметры обучения искусственной нейронной сети
(составлено автором)

Полученное значение градиента как функции потерь последней итерации обучения было небольшим (6.0636×10^{-8}), что говорит о том, что веса сети (w_{ij}) практически не меняются, следовательно, для улучшения модели не требуется дополнительных настроек (рисунок 4.5 а). Параметр Mu , являющийся коэффициентом алгоритма Ловенберга-Маркварда (ЛМ), который регулирует переход между градиентной оптимизацией и оптимизацией по Ньютону и позволяет сбалансировать стабильность и скорость в процессе обучения, имеет значение, указывающее на то, что модель достигла хорошей точки стабильности с эпохи 43 (рисунок 4.5 б). Проверка валидации показывает, сколько раз подряд ошибка валидации не улучшалась в процессе обучения; значение, показанное на рисунке 4.5 в, означает, что после 100 последовательных итераций модель не улучшилась в наборе валидации, поэтому при таком количестве итераций процесс останавливается, чтобы избежать ненужного обучения. Тенденция к росту в валидации указывает на способность модели улучшаться с помощью данных, предоставляемых в настоящее время, или при введении новых данных.

Обучив модель, необходимо объективно оценить обобщенность сети, протестировав ее на наборе данных, который не участвовал в этапе обучения. Этот процесс позволяет оценить предсказательную способность модели путем ее тестирования на новом наборе данных и получить ROC-кривую, связанную с моделью. Аналогичным образом было построено несколько графиков для выявления внутреннего поведения нейронной сети. Матрица ошибок была рассчитана на основе данных обучения и обобщает производительность нейронной сети для используемого набора данных (рисунок 4.6). Эта матрица предоставляет информацию о проценте правильной классификации и надежности для каждого из классов оползневой опасности и основных путаницах между ними. Для этого подсчитывалось количество правильно классифицированных оползней для каждого класса опасности, исходя из общих закономерностей, сформированных анализируемыми факторами.



Рисунок 4.6 – Матрица ошибок искусственной нейронной сети
(составлено автором)

В обучающей матрице 74,8 % оползней были правильно отнесены к классу высокой опасности, 22,1 % – к классу средней опасности и только 1,5 % – к классу низкой опасности.

На рисунке 4.7 показан коэффициент истинных положительных результатов (TPR) для каждого класса, который мы получили, применив классификацию к обучающему, проверочному, тестовому и полному наборам данных.

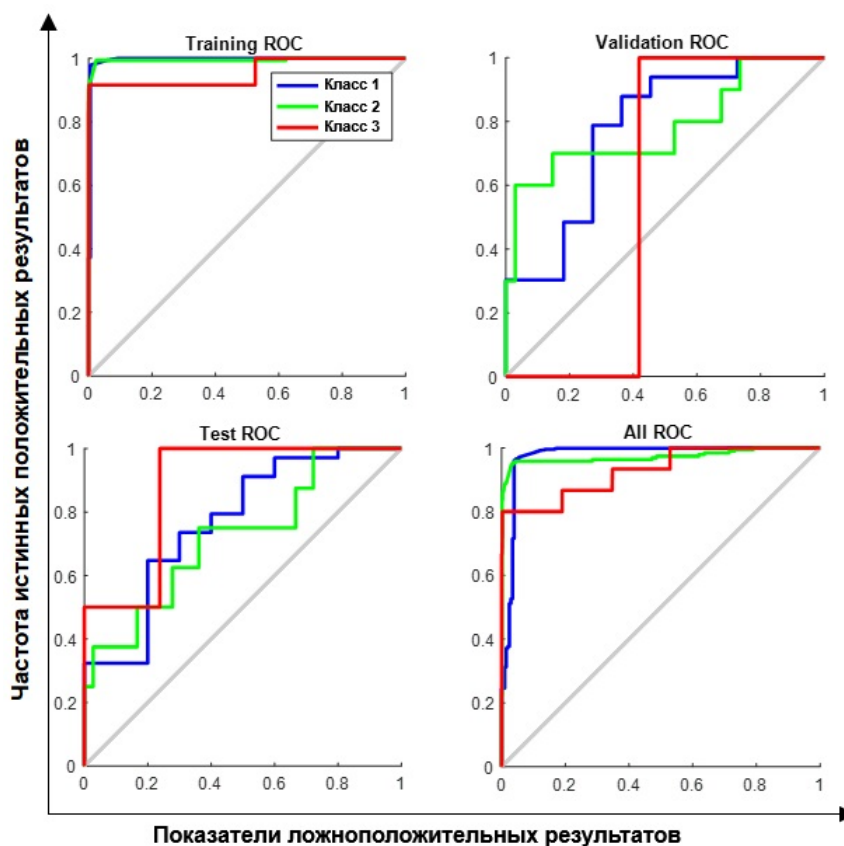


Рисунок 4.7 – Общий TPR в зависимости от количества в скрытом слое и количества оползней на класс (составлено автором)

Значения TPR для обучающих, тестовых и проверочных наборов данных очень похожи друг на друга. Это говорит о том, что обучение с ранним завершением проверки сводит к минимуму перебор. Эти результаты свидетельствуют о том, что модель, созданная методом искусственной нейронной сети, работает удовлетворительно. Таким образом нет необходимости производить дополнительные расчеты, так как разница между обучающим и тестовым множеством не является чрезмерно большой.

Был проведен анализ поведения различных анализируемых факторов в распределении оползней на открытых месторождениях полезных ископаемых с помощью метода искусственной нейронной сети (рисунок 4.8). Использовался перечень из 113 оползней, произошедших на этих территориях, из которых 62 были распределены в категории «Высокая опасность», 38 – в категории «Средняя опасность» и 13 – в категории «Низкая опасность».

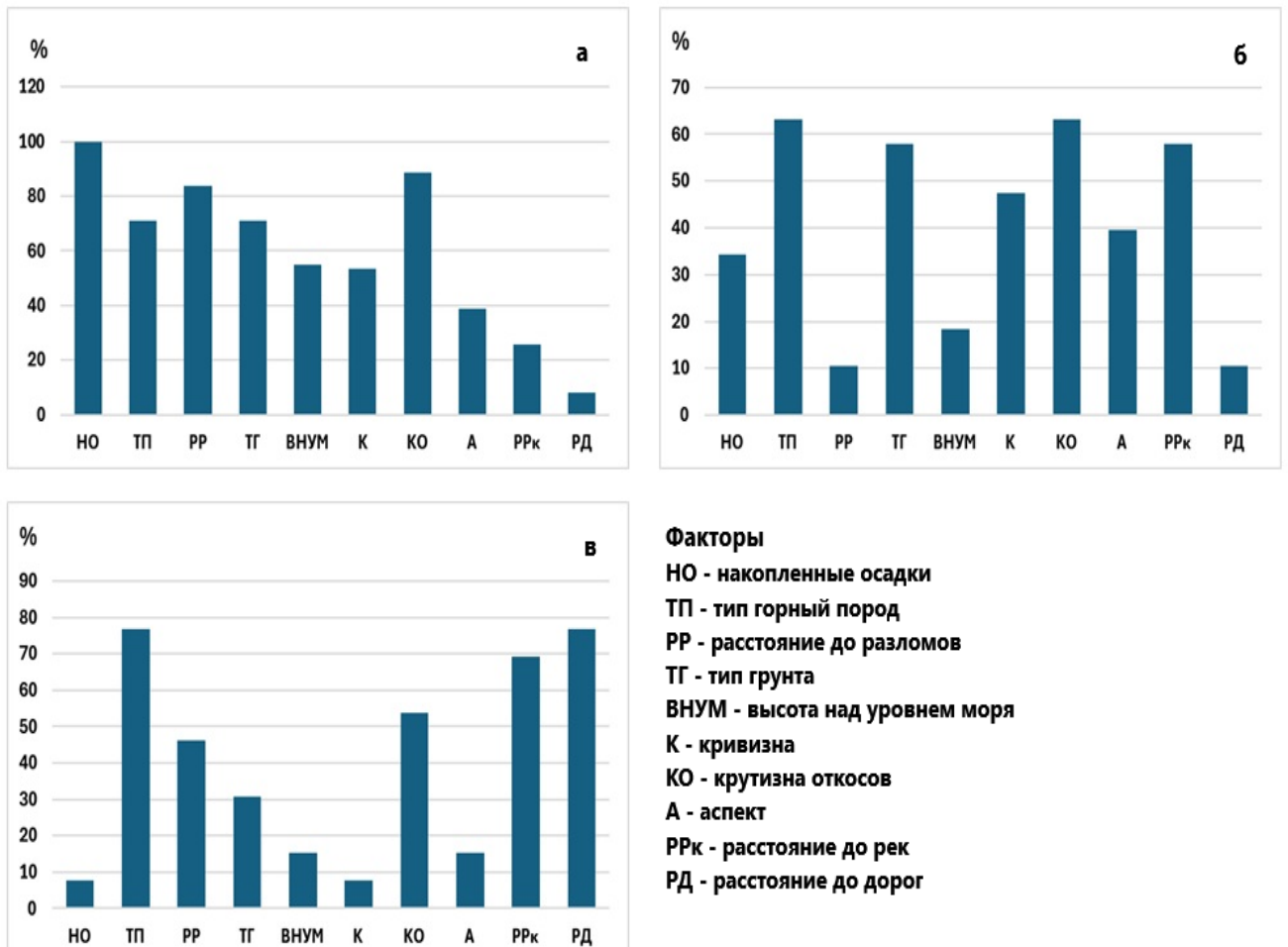


Рисунок 4.8 – Взаимосвязь между факторами и распределением оползней на открытых месторождениях полезных ископаемых с помощью ИНС
(составлено автором)

Среди наиболее влиятельных факторов восприимчивости для категории оползней «Высокой опасности» – крутизна откосов 55 оползней (88,7 %) распределены в классах с крутизной склонов более 22 градусов; расстояние до разломов – еще один фактор, имеющий большое значение: 52 оползня (83,9 %) в классе с расстоянием менее 500 м от разломов. Тип горных пород и тип грунта концентрируют 44 оползня по обоим факторам (71 %) в классах, относящихся к сланцам, сильно деформированным породам и корам выветривания, а также в суглинистых и глинисто-суглинистых грунтах. По накопленным осадкам как триггерному фактору все оползни были сконцентрированы в классах, определяющих обильные осадки свыше 100 мм в день (рисунок 4.8 а).

Для класса «Средней опасности» наиболее важными факторами восприимчивости являются крутизна откосов и тип горных пород – по 24 оползня на склонах 14 – 22 градусов и на породах офиолитового и метаморфического комплекса (рисунок 4.8 б). Количество осадков принимает меньшие суммарные значения с диапазоном 50-100 мм за 24 часа.

В классе «Низкая опасность» (рисунок 4.8 в) крутизна откосов, которая в других классах имела большое значение для оползневой восприимчивости, в данном случае большинство оползней (10) распределены в классе с меньшими углами откосов (менее 14 градусов); другие факторы, такие как тип пород, расстояние до рек и расстояние до дорог, также характеризуются оползнями в низших классах в менее деформированных породах, более чем в 500 м от водных объектов и более чем в 100 м от дорог.

На рисунке 4.9 показан результат определения категорий оползневой опасности методом искусственной нейронной сети для участков 12 месторождений никелевых и кобальтовых руд в массиве Сагуа – Баракоа. Результат показывает, что большинство этих участков относятся к категориям «Высокая опасность» и «Средняя опасность».

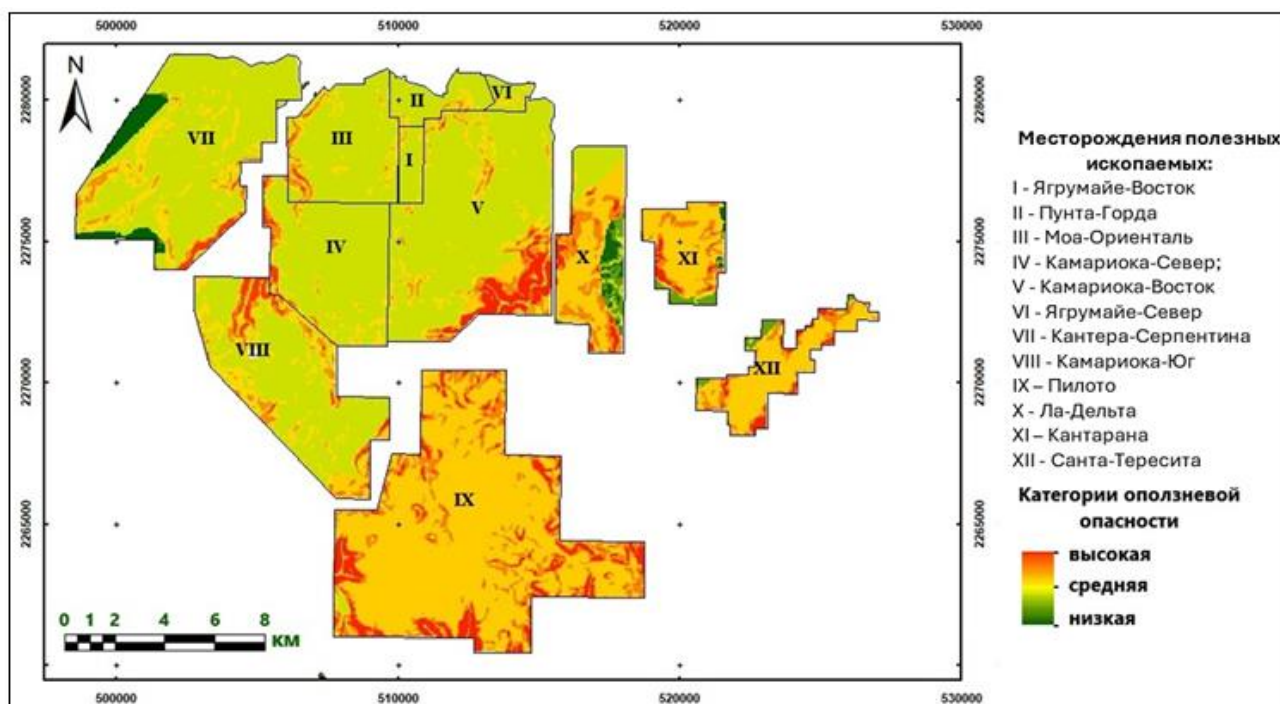


Рисунок 4.9 – Опасность оползней на открытых месторождениях никеля и кобальта в массиве Сагуа - Баракоа. (составлено автором)

4.4 Валидация прогноза на месторождении никеля и кобальта Камариока – Восток

Результат прогноза оползневой опасности подтвержден расчетом устойчивости склона на подъездной дороге к месторождению Камариока-Восток [1], чтобы определить точность и надежность сделанного прогноза.

Месторождение Камариока – восток расположено в муниципалитете Моа, провинция Ольгин. На севере и северо-западе оно граничит с месторождениями Пунта-Горда и Ягромахе, на западе - с месторождением Ягромахе - север, на востоке - с месторождением Ла-Дельта, а на юге - с месторождением Пилото (рисунок 4.9).

Месторождение расположено в зоне тропического климата, где ежегодно выпадает более 2300 мм осадков. Относительная влажность воздуха составляет 79 %, среднегодовая температура - 24 °С. Рельеф низкогорный, с абсолютными высотами с 102,4 м до 788,5 м.

Геология месторождения представлена породами офиолитового комплекса, представленного ультраосновными скоплениями, состоящими из гарцбургитов, дунитов, лерцолитов и пироксенитов, из которых возникла кора выветривания. В меньшей степени и изолированно встречаются мафические кластеры, состоящие из габбровых пород различного состава и размера зерен. Преобладающее направление системы разломов СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ.

Процессы эрозии и насыщения почвы влагой в регионе усиливаются из-за осадков, максимальное суточное количество которых в регионе составляет 224 мм, что выше критическое значение повторяемости в 2 года (163,20 мм); эти условия повышают вероятность неустойчивости откосов.

Оценка устойчивости откосов на карьерной дороге

Строительство дорог – одна из важнейших задач при добыче полезных ископаемых. Она необходима для эффективного выполнения остальных работ, так как эта сеть доступа к месторождениям гарантирует выполнение производственного

плана или графика работы шахты. Дороги должны быть хорошо спроектированы, а это зависит от характеристик используемого оборудования и условий местности.

В настоящее время добыча на месторождении Камариока-Восток ведется на участках, которые не имеют идеальных условий для эксплуатации горного транспорта с соблюдением безопасности дорожного движения, необходимой для данного этапа процесса. Поэтому необходимо было спроектировать основную дорогу, которая служила бы связующим звеном для второстепенных дорог, по которым можно будет добраться до участков, запланированных к разработке, и которая также гарантировала бы безопасную и надежную транспортировку в соответствии с показателями производительности и использования транспортного оборудования [144]. Подобные сооружения могут рассматриваться по аналогии как въездные траншеи при вскрытии месторождений.

Анализ топографического профиля (рисунок 4.10) дороги позволил определить участки для исследования коэффициента безопасности. На этих участках откосы испытывают значительное влияние стоковых вод, что делает их уязвимыми для процессов эрозии и разрушения.

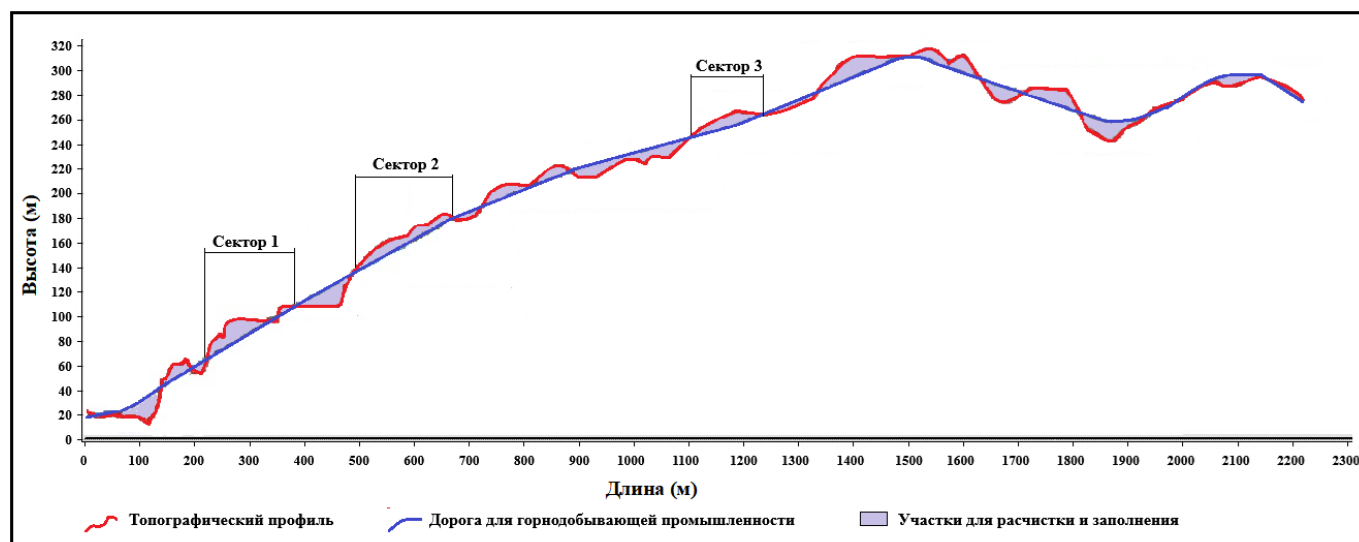


Рисунок 4.10 - Топографический профиль и схема подъездной дороги на участке Камариока-Восток [144]

Кора выветривания представляет собой основное зональное геологическое тело, сформировавшееся на субстрате консолидированных пород под действием факторов выветривания, в которых определяющую роль играют тип или разновидность материнской породы, уклон местности, микроклиматические особенности и гидродинамический режим местности. На рисунке 4.11 показан литологический профиль откосов латеритной коры и его основные элементы. В зависимости от зонального состава выделяют три типа профилей выветривания, которые имеют определенные горизонты и могут быть полными или неполными из-за отсутствия одного из горизонтов типичного латеритного профиля [93].

I – Латеритные профили, состоящие из горизонтов III, IV и V.

II – Латеритно - сапролитовые профили, состоящие в целом из 5 горизонтов.

III – Сапролитовые профили, состоящие только из горизонтов IV и/или V.

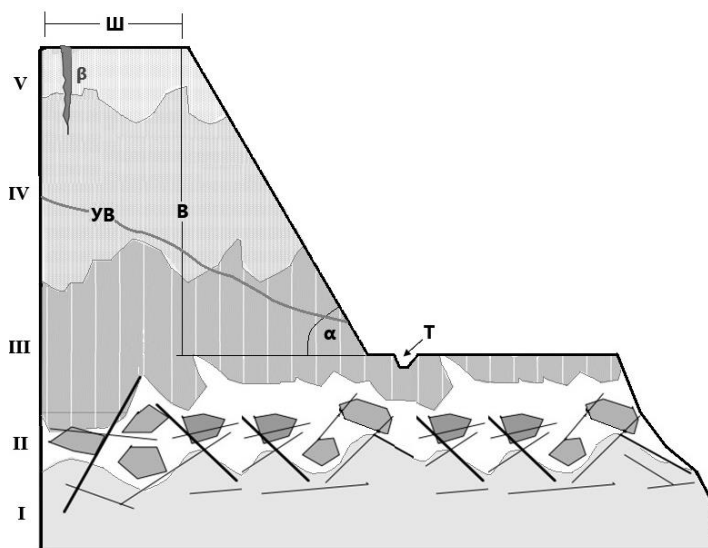


Рисунок 4.11 – Типичный профиль латеритной коры выветривания. Литология: V - феррикрит; IV - ламонит; III - переходная зона; II - сапролит; I - подошвенная порода). Elementos del talud: Ш – ширина дороги; В – высота откоса; Т – траншеи; α – угол откоса; β – трещина растяжения; УВ - Уровень грунтовых вод [35]

В месторождении преобладают латеритно – сапролитовые профили [91], в которых присутствуют следующие горизонты (см. рисунок 4.11).

- Подошвенная порода сложена твёрдыми серпентинитами тёмно-зелёного до зеленовато-серого цвета, в трещиноватом состоянии. Для этого горизонта характерно максимальное содержание SiO_2 и MgO при минимальных содержаниях Fe , Al_2O_3 , Ni , Co

- Сапролит представлен выщелоченными и трещиноватыми серпентинитами. Это трещиноватые, выщелоченные, дезинтегрированные породы зеленовато-серого цвета, а также серые габброиды. Отличаются повышенным содержанием SiO_2 (30,97 %), Al_2O_3 (15,45 %) и MgO (14,94 %).

- Переходная зона: состоит из реликтов ультраосновных или мафических пород. Они встречаются от поверхности до глубины 23 м, при средней глубине залегания 7,89 м. Основным минералом является гётит, также отмечаются значительные содержания серпентина и глинистых минералов

- Ламонит: Имеет темно-коричневый до зеленовато-желтоватого, а иногда и фиолетового цвета цвет. Основная минералогическая фаза - гетит. Среднее содержание Fe = 45,3 %, Ni = 1,17 % и Co = 0,146 %. С минералогической точки зрения он представляет собой основной полезный горизонт как для никеля, так и для кобальта.

- Феррикрит: слагающий его материал имеет типичный темно-коричневый цвет, хотя может принимать оттенки до красновато-коричневого в корках, развитых на ультраосновных породах, и фиолетового в корках на мафитах. Она представлена железистыми стяжениями, которые могут занимать 50 % и более охровой массы и варьировать в размерах от 6 мм до 2 см. Основная минералогическая фаза - гетит, затем гиббсит. Соответственно, преобладающим химическим элементом является Fe с максимумами алюминия.

Протяженность основной дороги, которую предстоит построить, составляет 2,292 км, продольные уклоны минимальные 3,5 % и максимальные 7,87 %, которые находятся в диапазоне до 8 %, согласно стандартам для волнистого рельефа, представленным в программе CIVIL 3D 2020 [144]. Ширина дороги составляет 12 м с

двумя полосами шириной 6 м. Определены параметры, влияющие на сдвигающие усилия и прочность на сдвиг рельефа в каждом из секторов, включая высоту откоса; угол откоса 45 градусов, рассчитанный в соответствии с рекомендуемыми типичными углами для глинистых грунтов, исходя из значений угла трения $c' > 25$ кПа) и сцепления (ϕ') [60]. Чтобы убедиться в надежности и прочности модели, ее дополнили проверкой пространственной согласованности между районами, отнесенными нейронной сетью к категории высокой опасности, и секторами с $FS < 1$ (неустойчивыми), а также оценкой сценариев в сухих и влажных условиях, что имеет ключевое значение, поскольку влага снижает прочность грунта на сдвиг.

На развитие оползней на открытых месторождениях полезных ископаемых большое влияние оказывают физико-механические свойства грунтов и пород, слагающих откосы. В таблице 4.2 приведены свойства материалов откосов.

Таблица 4.2 – Физико-механические свойства и средняя толщина материалов, присутствующих в профиле склона [144]

Физические свойства	Невыветренная порода	Слабая кора выветривания	Умеренная кора выветривания	Сильная кора выветривания	Остаточная кора выветривания
	I	II	III	IV	V
Удельный вес (сухой), кН/м ³	24,5	21	22,5	18,5	22
Удельный вес (влажный) кН/м ³	25,8	22,3	23,7	20	23,2
Влажность, %	5-8	10-15	8-12	15-25	6-10
Сцепление, c' кПа	39,22	12,5	1,1	7,8	16,4
Угол трения ϕ'	25	16	26	17	25
Индекс пластичности	-	26	28	28	12
Толщина средняя (м)	20	4,16	5,31	3,58	1,89

В рамках анализа также учитывалось поведение уровня грунтовых вод, который изменяется в нормальных или сухих условиях, распределяясь в основном на глубине, затрагивающей горизонты II и III, с глубиной, варьирующейся в пределах 40-24,5 м, в

то время как во влажных условиях, соответствующих дождливым периодам в районе исследования, этот уровень резко повышается, распределяясь с горизонта IV с колебаниями менее 16 м в глубину [56].

В качестве другого граничного условия рассматривалось сейсмическое воздействие на территории, основанное на частоте возникновения землетрясений умеренной силы в этом районе (магнитуда 5,5 по шкале Рихтера), с максимальными значениями ускорения для горизонтальной составляющей 0,359% и продолжительностью возникновения максимальных значений ускорения 12,31 секунды, а для вертикальной составляющей 0,213 % и продолжительностью 10,48 секунды [1].

Изменение значений удельных весов в горизонтах II, III и IV (рисунок 4.12), для нормальных и сухих условий и условий влажности показывает, что в этих слоях возможно увеличение дестабилизирующих сил.

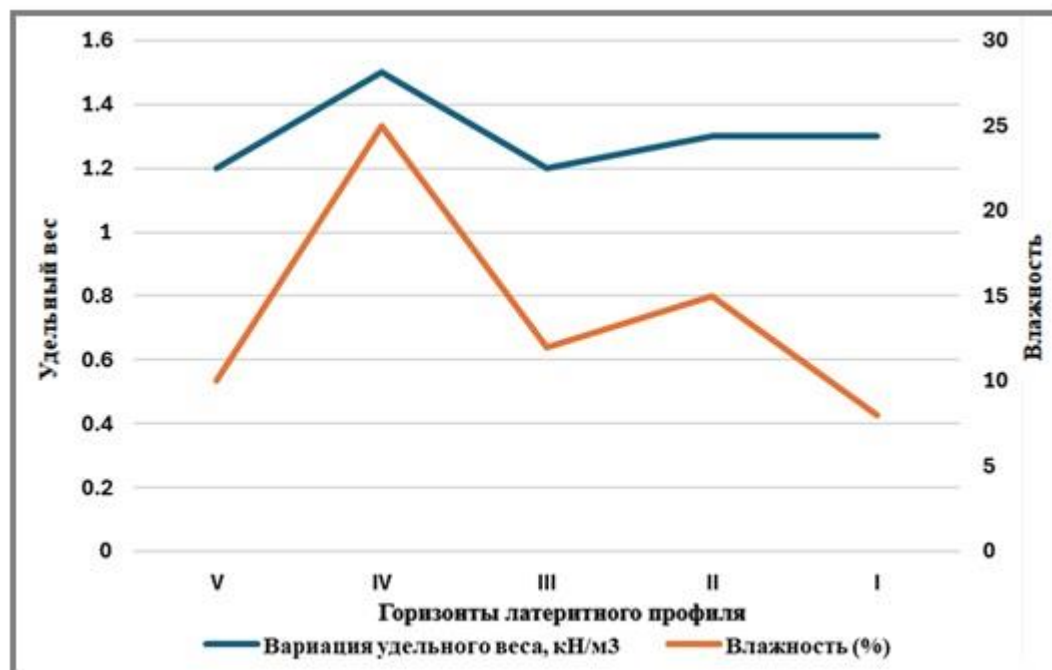


Рисунок 4.12 – Взаимосвязь между влажностью и удельным весом в различных горизонтах (составлено автором)

Относительная влажность показывает резкое увеличение в горизонтах IV (25 %), III (12 %) и II (15 %), что может быть связано с изменением уровня грунтовых

вод в дождливые периоды. Значения угла трения, которые представляют собой меру внутреннего сопротивления скольжению между частицами почвы или фрагментами породы, показывают, что горизонты II и IV вносят значительный вклад в нестабильность, поскольку имеют низкие углы трения со значениями менее 20 градусов (16 градусов для горизонта II и 17 градусов для горизонта IV), что указывает на то, что частицы почвы или фрагменты породы легко скользят друг по другу и поэтому могут служить плоскостями скольжения для материалов более высоких горизонтов [32], причем это условие усугубляется во влажных условиях.

Несмотря на то, что горизонт III имеет больший угол трения, необходимо учитывать, что уровень грунтовых вод влияет на этот горизонт в двух предложенных условиях, что подтверждается увеличением влажности и удельного веса материала в условиях влажности материала в этом горизонте, увеличивая его возможность превращения в плоскости разрушения.

Анализ чувствительности физико-механических и геометрических параметров был проведен для оценки неопределенности и определения того, как они влияют на коэффициент запаса прочности.

Коэффициент запаса прочности был рассчитан для сухих или нормальных условий и с учетом влажных или насыщенных условий, исходя из существующих геометрических элементов и физико-механических свойств материалов, из которых они состоят. Результаты оценки коэффициента безопасности (K_3) показывают четкое влияние этих аспектов на устойчивость склонов в трех секторах (рисунок 4.13). Для нормальных или сухих условий в целом все сектора устойчивы. Все три сектора имеют значения, относящиеся к устойчивым откосам: сектор 1 с $K_3 = 1,553$, сектор 2 с $K_3 = 1,562$ и сектор 3 с $K_3 = 1,532$

В условиях влажности или насыщения сектор 1, расположенный в зоне с высокой категорией опасности, имеет критическое значение $K_3 = 0,828$, что означает, что он имеет очень неустойчивый склон с плоскостью разрушения, наиболее вероятной для возникновения оползней, расположенной между горизонтами V, IV и

III; сектор 2 демонстрирует высокую неустойчивость с $KЗ = 0,989$, где плоскость разрушения расположена между горизонтами V и IV.

Горизонт 3, расположенный в зоне со средней категорией опасности, хотя и неустойчив со значением $KЗ = 0,754$, имеет значение, очень близкое к предельному равновесию ($KЗ = 1$); этот горизонт простирает свою наиболее вероятную плоскость разрушения до горизонта II.

Полученные результаты подтверждают связь между коэффициентом запаса прочности откосов в дорожных разрезах и влажностью, возникающей в результате выпадения осадков [119]. Неустойчивость откосов, вызванная дождями, может стать более частым явлением на месторождении, порождающим оползни, что доказывает актуальность категорий оползневой опасности, особенно категории «высокая опасность».

Чтобы определить, какая переменная оказывает наибольшее влияние на коэффициент запаса прочности, было проанализировано, как изменяется коэффициент запаса прочности откоса в зависимости от изменения каждого конкретного геотехнического параметра материалов в каждом из секторов (рисунок 4.14).

В секторе 1 среднее значение коэффициента запаса прочности составляет 1,19 (варьируется от 0,84 до 1,73). В неизменной серпентиновой породе и выщелоченном серпентине горизонтов I и II коэффициент безопасности уменьшается с увеличением связности и удельного веса и немного увеличивается с увеличением угла внутреннего трения. Для материалов горизонтов 3, 4 и 5 коэффициент запаса прочности остается в постоянных пределах ($FS \approx 1,19885$) для большинства вариаций свойств этих материалов, что говорит об их ограниченном влиянии на коэффициент запаса прочности.

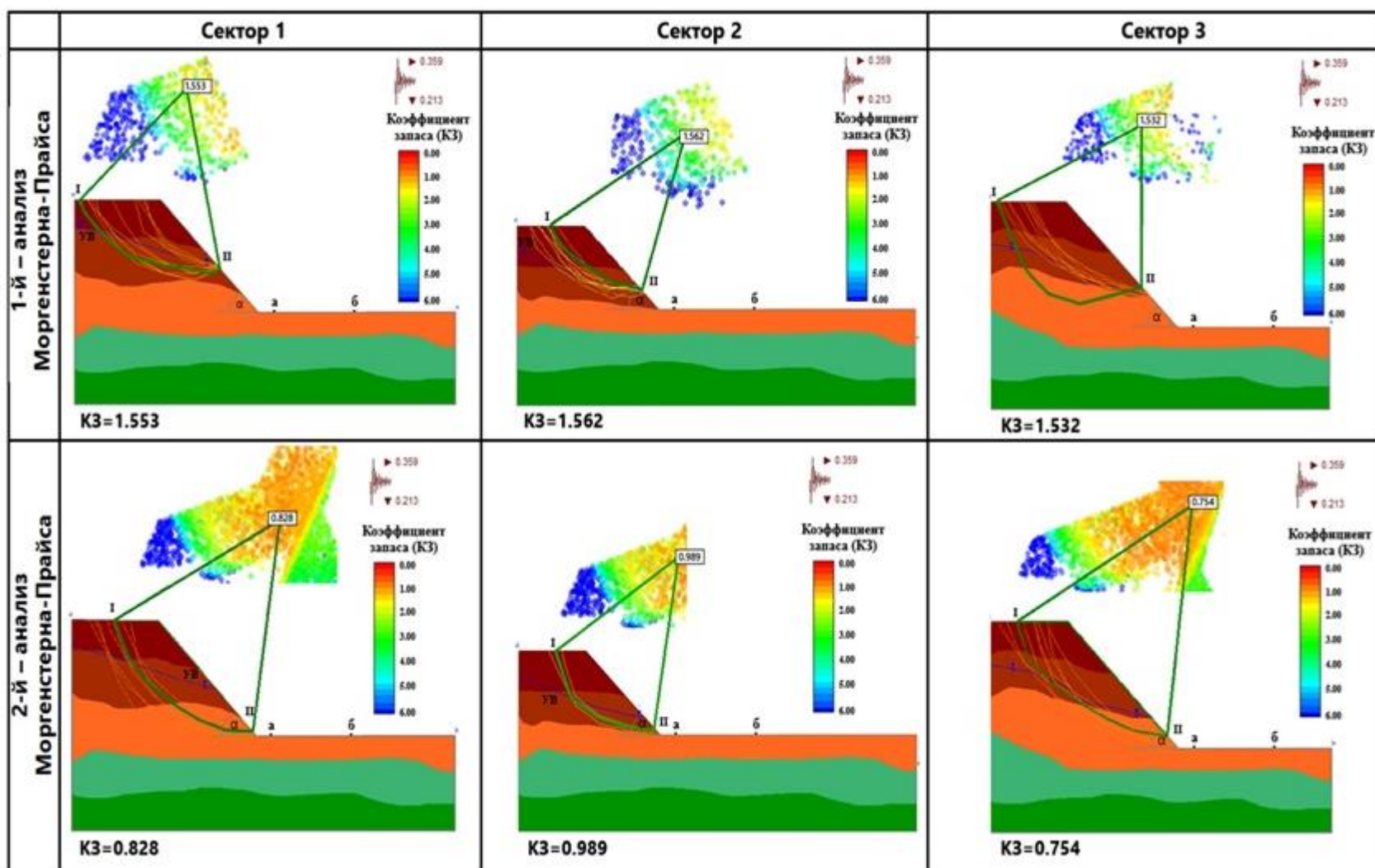


Рисунок 4.13 – Коэффициент запаса (КЗ) для каждого сектора для двух вариантов нагружения. α – угол откоса; β – трещина растяжения; УВ – Уровень грунтовых вод; I – II – Наиболее вероятный сценарий разрушения; а – б – Дорожная вили карьерная выемка (составлено автором)

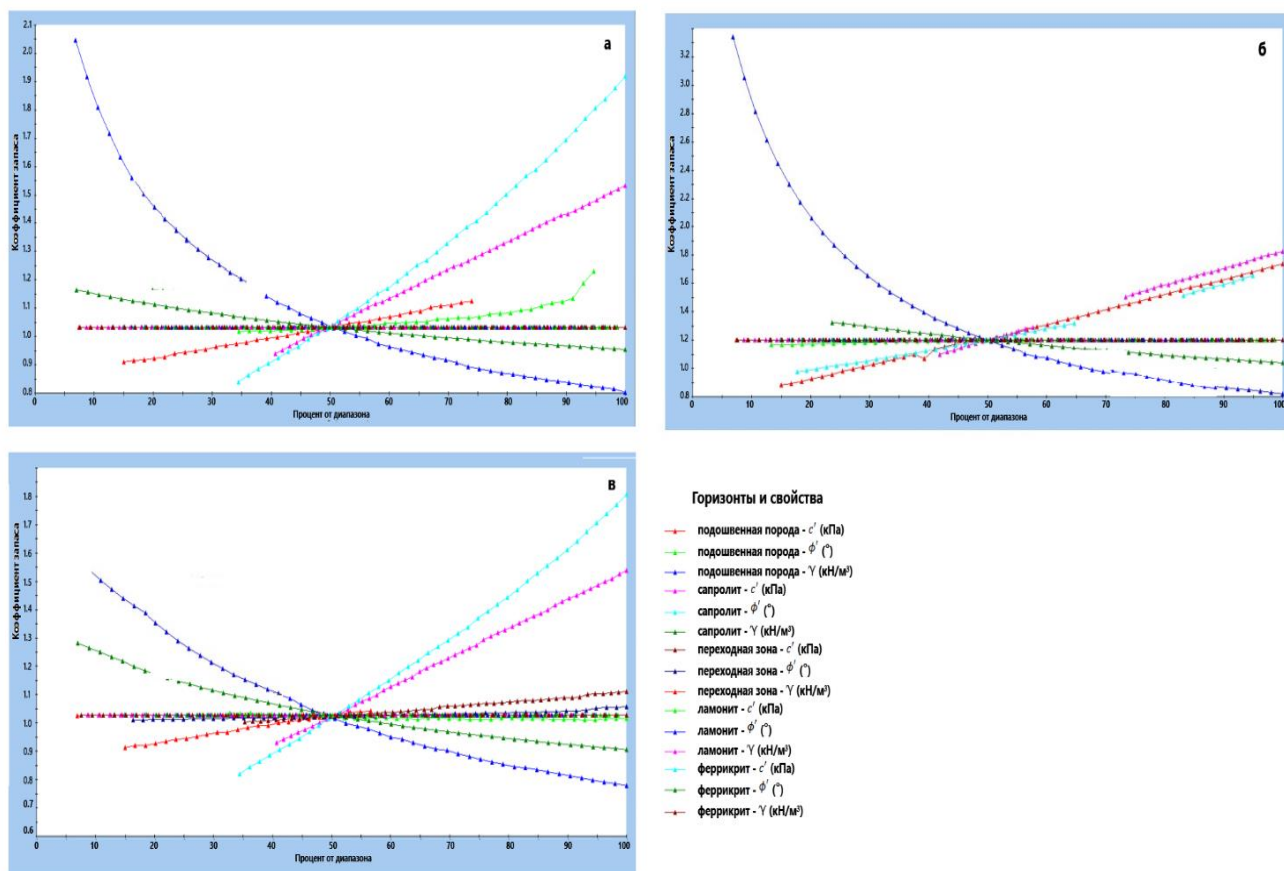


Рисунок 4.14 – Анализ чувствительности между коэффициентом запаса и физико-механическими свойствами в секторе 1 (а), секторе 2 (б) и секторе 3 (в)
(составлено автором)

В анализе чувствительности для сектора 2 средний коэффициент запаса прочности составляет 1,03 и варьируется между 0,69 и 1,65, при этом критические значения $< 1,0$ (нестабильность). В целом, ФБ увеличивается с ростом связности и угла трения. Для сектора 3 наиболее влиятельными свойствами являются когезия и угол трения. Наибольшее негативное влияние оказывает удельный вес, так как он является дестабилизирующим элементом для горизонта IV (лимонит) во всех трех секторах.

Согласно полученным данным о коэффициенте запаса, стабильность (как правило, $FS \geq 1,5$) в различных секторах может быть достигнута при помощи подходящих комбинаций, которые представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Вероятные комбинации для прогнозирования откоса с достаточными коэффициентами запаса прочности (составлено автором)

Сектор	Сцепление c' , кПа	Угол трения ϕ' , град	Удельный вес, кН/м ³	Горизонт
Сектор 1	>30	>25	24-28	на горизонте 3-4
Сектор 2	>25	>22	21-25	на горизонт 3
Сектор 3	>28	>24	23-27	на горизонте 3-4

Эти комбинации зависят от значений геометрических и гидрогеологических факторов, таких как угол откоса (45 градусов), высота откоса (5-10 м) и глубина залегания грунтовых вод (1-10 м) в дождливый период.

4.5 Выводы по Главе 4

1. Осадки в массиве Сагуа-Баракоа характеризуются циклоническим и конвективным происхождением, при этом в последние годы наблюдается тенденция к увеличению количества накопленных осадков, что свидетельствует об изменениях в частоте и интенсивности.

2. Определение критических значений количества атмосферных осадков является важным элементом для прогнозирования оползней в районах открытых месторождений полезных ископаемых. Накопление осадков за критическими значениями возрастает с увеличением периода повторяемости. 89,1 % оползней произошли при количестве осадков, равном или превышающем критическое значение для двухлетнего периода повторяемости, что позволяет сделать вывод о высокой вероятности возникновения оползней в районе исследования даже при умеренном количестве осадков, выпадающих при низких периодах повторяемости.

3. Искусственные нейронные сети (ИНС) являются инструментом с большим потенциалом для прогнозирования оползневой опасности, учитывая их высокую способность анализировать большие объемы данных, их адаптивность к обучению на основе новых данных и способность анализировать сложные взаимосвязи между переменными и устанавливать закономерности.

4. Разработанная ИНС – модель продемонстрировала удовлетворительную производительность при классификации оползневой опасности. В обучающей матрице 74,8 % оползней были правильно отнесены к классу высокой опасности, 22,1 % - к классу средней опасности и 1,5 % - к классу низкой опасности. Эти результаты свидетельствуют о том, что модель эффективно определяет зоны повышенной опасности, что очень важно для управления рисками и превентивного планирования.

5. Значения истинно положительных результатов (TPR), полученные для тренировочного, тестового и валидационного наборов данных, были очень похожи друг на друга. Это говорит о том, что стратегия раннего прекращения обучения была эффективна для минимизации избыточной подгонки, обеспечивая адекватное обобщение модели на невидимые данные. Согласованность значений TPR отражает устойчивость модели и ее способность сохранять стабильную производительность на разных наборах данных. Значение градиента как функции потерь на последней итерации обучения было крайне мало (6.0636×10^{-8}), что говорит о том, что веса нейронной сети (w_{ij}) на этом этапе практически не изменились. Это подтверждает, что модель достигла оптимальной точки сходимости, в которой не требуется дальнейших корректировок для улучшения ее работы. Стабильность в процессе обучения подтверждает надежность модели и ее способность делать точные прогнозы. Минимальная разница между результатами тренировочного и тестового наборов подтверждает, что модель не переборщила с подгонкой и что ее работа последовательна. Это говорит о том, что модель способна адекватно обобщать новые данные, что очень важно для ее практического применения при оценке оползневой опасности в различных геологических и топографических условиях.

6. Наибольшее влияние на прогнозирование оползней на открытых рудных месторождениях в массиве Сагуа-Баракоа оказали такие факторы, как крутизна склона, расстояние до разломов, тип породы и накопление осадков.

Расчет коэффициента запаса устойчивости на трех участках дорожной выемки на месторождении никеля и кобальта Камариока-Восток подтвердил актуальность категорий оползневой опасности, предсказанных методом искусственной нейронной сети. Результаты подтверждают, что в условиях влажной или насыщенной горной породы, вызванной осадками, устойчивость снижается. Это подтверждает важность прогнозирования опасных зон для предсказания поведения откосов в различных сценариях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается решение научной задачи по повышению безопасности при открытой разработке месторождений полезных ископаемых и эффективности управления оползневыми рисками.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации.

В исследуемом районе, на территории массива Сагуа-Баракоа на острове Куба, имеются ограничения для мониторинга оползневых процессов, а ранее проведенные исследования характеризуются использованием качественных и полуколичественных методов, которые, в силу своей субъективной природы, вносят погрешности в оценку оползневой опасности. Интеграция методов и применение методов машинного обучения позволяют обрабатывать большие объемы числовых или категориальных данных, улавливать нелинейные и сложные взаимосвязи между факторами и выявлять закономерности, что значительно повышает точность и надежность оползневых оценок и прогнозов.

На основе инженерно-геологического районирования массива Сагуа-Баракоа выявлены участки с высокой вероятностью возникновения и развития оползней при вскрытии месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом, с учетом климатических, геоморфологических, гидрологических, геологических и антропогенных факторов, среди которых: накопленные осадки, угол, высота, экспозиция и кривизна склонов и откосов, расстояние до рек, расстояние до разломов, тип пород, тип грунты и расстояние до дорог.

Проанализирован характер осадков на исследуемой территории и определены критические значения количества атмосферных осадков, приводящие к возникновению и активизации оползневых процессов. Утверждается, что массив и его горнопромышленные районы сильно подвержены оползням при умеренном количестве осадков в короткие периоды повторяемости.

Разработана прогностическая модель с использованием метода искусственной нейронной сети, которая показала удовлетворительную эффективность при классификации оползневого риска на открытых месторождениях полезных ископаемых, с высокой точностью определяя зоны повышенного риска. Эти результаты подтверждают применимость модели в качестве надежного инструмента для оценки и управления оползневом риском.

Методология оценки риска возникновения оползней при вскрытии месторождений, разрабатываемых открытым способом, на территории массива Сагуа-Баракоа была проверена и подтвердила эффективность категорий оползневой опасности, определенных с помощью искусственной нейронной сети. Результаты показали, что в горных породах, в случае инфильтрации атмосферных осадков, устойчивость склонов и откосов значительно снижается на участках, отнесенных к категории высокого риска.

Перспективы дальнейшего развития темы связаны с расширением географии исследований на другие горные регионы Кубы и стран Карибского бассейна с аналогичными инженерно-геологическими условиями. В будущем возможно развитие методов прогноза на данной территории за счёт интеграции спутникового мониторинга и беспилотных технологий с искусственными нейронными сетями. Дополнительно целесообразно исследовать влияние изменений климата на частоту и интенсивность оползневых процессов с использованием сценарного климатического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев П.И. Анализ устойчивости откосов горной дороги месторождения Camarioca Este компании comandante Ernesto Che Guevara / Афанасьев П.И. Медина С.Я., **Савон В.Ю.**, Картайя П.М., Гарсия де ла Круз М.И. // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 24. – С. 78–84.
2. Белый Л.Д. Инженерная геология: Учебное пособие / Белый Л.Д., Попов В.В. – Москва : Стройиздат, 1975. – 448 с.
3. Бондарик Г.К. Инженерная геодинамика / Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. – Москва : КДУ, 2007. – 327 с.
4. Выстрчил М.Г. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна / Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К. // Записки Горного Института. – 2023. – Т. 262. – С. 562–570.
5. Григоренко А.Г. Инженерная геодинамика / Григоренко А.Г., Кюнтцель В.В., Новак В.Е., Тамутис З.П. – Киев : Лыбидь, 1992. – 296 с.
6. Демин А.М. Механизм оползней в карьерах / Демин А.М. // Записки Горного Института. – 1976. – Т. 70. – № 2. – 86 с.
7. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов / Емельянова Е.П. – Москва : Недра, 1972. – 308 с.
8. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика / Золотарев Г.С. – Москва : МГУ, 1983. – 328 с.
9. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика / Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. – Санкт – Петербург : Наука, 2001. – 416 с.
10. Кузин А.А. Разработка алгоритма выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений на примере Миатлинской ГЭС / Кузин А.А., Филиппов В.Г. // Вестник СГУГиТ Сибирского Государственного Университета Геосистем И Технологий. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 22–37.

11. Кузин А.А. Информационное обеспечение методики регионального зонирования территорий по степени опасности проявления оползневых / Кузин А.А. // Записки Горного Института. – 2012. – Т. 199. – С. 141.
12. Кутепов Ю.И. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений / Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.Ю. // Горный Журнал. – 2023. – № 5. – С. 69–74.
13. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР и его региональный прогноз / Кюнтцель В.В. – Москва : Недра, 1980. – 213 с.
14. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология: Инженерная геодинамика: учебное пособие / Ломтадзе В.Д. – Ленингр. отделение : Недра, 1977.
15. Ломтадзе В.Д. Словарь по инженерной геологии / Ломтадзе В.Д. – Изд. СПбГИ, 1999. – 360 с.
16. Мустафин М.Г. Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров / Мустафин М.Г., Валькова Е.О. // Уголь. – 2024. – Т. 1182. – № 7. – С. 55–61.
17. Осипов В.И. Опасные экзогенные процессы / Осипов В.И., Кутепов В.М., Зверев В.П. – Москва : ГЕОС, 1999. – 290 с.
18. Паффенгольц К.Н. Геодогический Словар / Паффенгольц К.Н.. – Москва : Недра, Т. 2., 1973. – 458 с.
19. Пендин В.В. Методология оценки и прогноза оползневой опасности / Пендин В.В., Фоменко И.К. – Москва : ЛЕНАНД, 2015. – 320 с.
20. Петров Н.Ф. Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации) / Петров Н.Ф. – Кишинева : Штиинца, 1988. 226 с.
21. Погребов Н.Ф. Сравнительная характеристика оползневых районов СССР / Погребов Н.Ф. – Труды Первого Всесоюзного оползневого совещания, 1935. – С. 199 – 213.

22. Попов, И.В. Инженерная геология / Попов И.В. – Москва : МГУ, 1959. – 512 с.

23. Поспехов Г.Б. Определение зон оползневой опасности методом анализа иерархий на примере провинции Гуантанамо / Поспехов Г.Б., **Савон Ю.**, Мосейкин В.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 125–145.

24. Поспехов Г.Б. Оценка оползневой опасности при предварительной разведке месторождений на северо-востоке Кубы / Поспехов Г.Б., **Савон-Васиано Ю.** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 178–192.

25. **Савон-Васиано Ю.** Применение вероятностного метода при определении опасности оползней на Кубе / **Савон-Васиано Ю.**, Поспехов Г.Б // Сборник научных трудов IV форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию со дня первого выпуска горных инженеров в Донбассе «Проблемы горного дела», Донецк, 28-29 ноября 2024 года. – Донецк: ДонНТУ, 2024. – С. 243-246.

26. Свидетельство о государственной регистрации база данных № 2022623538 Российская Федерация. База данных проявлений оползневых процессов в Гуантанамо, Куба. Заявка № 2022623642 : заявл. 14.12.2022 опубл. 19.12.2022 / **Ю. Савон Ваиано**, Г.Б. Поспехов, А.В. Бойков; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 80 КБ.

27. Сергеев Е.М. Инженерная геология / Сергеев Е.М. – Москва : Издательство МГУ, 1978. – 384 с.

28. Теодоронский В.С. Строительство и эксплуатация объектов ландшафтной архитектуры / Теодоронский В.С., Сабо Е.Д., Фролова В.А. – Москва : Академия, 2008. – 352 с.

29. Чуринов М.В. Современные метода прогноза оползневого процесса / Чуринов М.В., Емельянова Е.П., Хоситашвили Г.Р. – Москва : Наука, 1981. 120 с.

30. Abdel-Kader F.H. Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach / Abdel-Kader F.H. // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. – 2011. – Vol. 14 (1). – pp. 29–40.
31. Acosta-Quesada M. Landslides and flood hazard mapping using geomorphological methods in Santa Ana, Costa Rica / Acosta-Quesada M., Quesada-Román A. // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2024. – Vol. 113. – p. 104882.
32. Agbaje S. Spatial variability characteristics of the effective friction angle of Crag deposits and its effects on slope stability / Agbaje S., Zhang X., Ward D., Dhimitri L., Patelli E. // *Computers and Geotechnics*. – 2022. – Vol. 141. – p. 104532.
33. Akintan O.B. Geotechnical and GIS-based environmental factors and vulnerability studies of the Okemesi landslide, Nigeria / Akintan O.B., Olusola J.A., Imole O.P., Adeyemi M.O. // *Regional Sustainability*. – 2023. – Vol. 4(3). – pp. 249–260.
34. Alemayo G.G. Landslide vulnerability of the Debre Sina-Armania Road section, Central Ethiopia: Insights from geophysical investigations / Alemayo G.G., Eritro T.H. // *J. Afr. Earth Sci.* – 2021. – Vol. 184. – pp. 104383.
35. Ali S.A. GIS-based landslide susceptibility modeling: A comparison between fuzzy multi-criteria and machine learning algorithms: 2 / Ali S.A., Parvin F., Vojteková J., Costache R., Linh N.T.T., Pham Q.B., Vojtek M., Gigović L., Ahmad A., Ghorbani M.A. // *Geoscience Frontiers*. – 2021. – Vol. 12 (2). – pp. 857–876.
36. Almaguer Y. Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda / Almaguer Y. – Holguin: ISMM, 2005. – 100 p.
37. Almaguer–Carmenate Y. Caracterización ingeniero geológica del perfil de meteorización de rocas ultrabásicas serpentinizadas en el territorio de Moa, Cuba / Almaguer–Carmenate Y., Guardado–Lacaba R. // *Minería y Geología*. – 2005. – Vol. 21(3). – pp. 13–23.
38. Alsabhan A.H. Landslide susceptibility assessment in the Himalayan range based along Kasauli – Parwanoo road corridor using weight of evidence, information value, and

frequency ratio / Alsabhan A.H., Kanwarpreet S., Sharma A., Alam S., Pandey D.D., Rahman S.A.S., Khursheed A., Munshi F.M. // Journal of King Saud University-Science. – 2022. – Vol. 34(2). – p. 101759.

39. Asmare D. Landslide hazard zonation and evaluation around Debre Markos town, NW Ethiopia—a GIS-based bivariate statistical approach / Asmare D. // Scientific African. – 2022. – Vol. 15. – p. e01129.

40. Bonham–Carter G.F. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential / Bonham–Carter G.F., Agterberg F.P. // In Statistical Applications in the Earth. Geological Survey of Canada. – 1989. – Vol. Paper 89-9. – p. 171–183.

41. Bosque–Sendra J. Los sistemas de información geográfica en el estudio de los problemas sociales y territoriales / Bosque–Sendra J. – Madrid : Universidad-verdad, 2005. – 111 p.

42. Bravo–López E. Landslide Susceptibility Mapping of Landslides with Artificial Neural Networks: Multi-Approach Analysis of Backpropagation Algorithm Applying the Neuralnet Package in Cuenca, Ecuador / Bravo-López E., Fernández Del Castillo T., Sellers C., Delgado–García J. // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – p. 3495.

43. Cabrera J. El catastro ingeniero-geológico y geoambiental de la provincia de Pinar del Río, una herramienta novedosa en la gestión de información georeferenciada / Cabrera J. – La Habana, Cuba. – 2005.

44. Cai S. Optimization of 3D Slope Sliding Surface Combining NURBS Method and Explicit Solution of Landslide Stability Factors / Cai S., Ren W., Liu Y., Liu C., Wei X. // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2024. – p. 100116.

45. Carmenate J.A. Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para la zonificación de los fenómenos geológicos en áreas urbanas y suburbanas de la ciudad de Moa / J. A. Carmenate. – Moa, Holguin: Instituto Superior Minero Metalúrgico, 1996. 108 p.

46. Carreño B. Pronóstico de deslizamientos con el empleo de sistemas computarizados / Carreño B., García M., Alvelo N. – La Habana, Cuba, 2005.

47. Castellanos E. Design of a GIS-Based System for Landslide Hazard Management, San Antonio del Sur, Cuba, case study / Castellanos E. – Enschede : International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 2000. – 108 p.

48. Castellanos E. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation / Castellanos E., Van Westen C.J. // *Landslides*. – 2007. – Vol. 4. – pp. 311–325.

49. Castellanos E. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba / Castellanos E., Van Westen C.J. // *Geomorphology*. – 2008. – Vol. 94 (3-4). – pp. 453–466.

50. Chan H.C. Using multinomial logistic regression for prediction of soil depth in an area of complex topography in Taiwan / Chan H.C., Chang C.C., Chen P.A., Lee J.T. // *CATENA*. – 2019. – Vol. 176. – p. 419–429.

51. Chang J.L. Análisis de riesgos por deslizamientos. Contribución a partir del estudio de la migración de los radioelementos naturales / Chang J.L., Leyva V.S., Castellanos E., Núñez K., Moreira J. // *V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente*. – La Habana, Cuba, 2005.

52. Che V.B. Landslide susceptibility assessment in Limbe (SW Cameroon): A field calibrated seed cell and information value method / Che V.B., Kervyn M., Suh C.E., Fontijn K., Ernest G.G.J., del Marmol M.A., Trefois P., Jacobs P. // *CATENA*. – 2012. – Vol. 92. – p. 83–98.

53. Cheng L. Improving Landslide Prediction: Innovative Modeling and Evaluation of Landslide Scenario with Knowledge Graph Embedding / Cheng L., Peng L., Yang L. // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16 (1). – p. 145.

54. Chuy T.J. Fenómenos naturales en el municipio Guantánamo. Valoración e impactos negativos / Chuy T.J., Puente G., Baza R., Seisdodos J.L., Reyes C., Rivera Z., Borges E. – La Habana, Cuba, 2005.

55. Chuy T.J. Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación Sísmica / Chuy T.J. – Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), Santiago de Cuba, 1999. – 273 p.

56. De Miguel–Fernández C. Regionalización hidrogeológica de la provincia Holguín, República de Cuba / De Miguel–Fernández C., Vazquez-Taset Y. // Minería y Geología – 2005. – Vol. 21 (3). – pp. 1–14.

57. Delgado F. Inventory of large landslides along the Central Western Andes (ca. 15°–20° S): Landslide distribution patterns and insights on controlling factors / Delgado F., Zerathe S., Schwartz S., Mathieux B., Benavente C. // Journal of South American Earth Sciences. – 2022. – Vol. 116. – p. 103824.

58. Di Maio R. Geotechnical and geophysical property models of soil-covered slopes prone to landsliding. The case study of the Ischia Island (southern Italy) / Di Maio R., Salone R., De Paola C., Carbonari R., Cusano D. De Vita P. // CATENA. – 2024. – Vol. 247. – p. 108509.

59. Dong L. Landslide risk assessment in mining areas using hybrid machine learning methods under fuzzy environment / Dong L., Zhang J., Zhang Y., Zhang B. // Ecological Indicators. – 2024. – Vol. 167. – p. 112736.

60. Duncan J.M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes / Duncan J.M. // Journal of Geotechnical engineering. – 1996. – Vol. 122 (7). – pp. 577–596.

61. Duncan J.M. Soil strength and slope stability / Duncan J.M., Wright S.G., Brandon T.L. – John Wiley & Sons, 2014.

62. Escobar E.M. Variantes geofísicas en la solución de algunas tareas de valoración de la vulnerabilidad sísmica / Escobar E.M. // VI Congreso Cubano de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y Riesgos Geológicos, 2005, La Habana, Cuba.

63. Fan L. Rainfall Intensity Temporal Patterns Affect Shallow Landslide Triggering and Hazard Evolution / Fan L., Lehmann P., Zheng C., Or D. // Geophysical Research Letters. Blackwell Publishing Ltd. – 2020. – Vol. 47 (1). – p. e2019GL085994.

64. Farahbakhsh E. Prospectivity modelling of critical mineral deposits using a generative adversarial network with oversampling and positive-unlabelled bagging / Farahbakhsh E., Maughan J., Müller R.D. // *Ore Geology Reviews*. – 2023. – Vol. 162. – p. 105665.

65. Freeman J.A. Neural networks: algorithms, applications, and programming techniques / Freeman J.A., Skapura D.M. – Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., United States, 1991. – 414 p.

66. Galban L. Modelación del peligro a deslizamientos en el Municipio Santiago de Cuba considerando el peso de las variables determinantes / Galbán L., Guardado R. // *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*. – 2016. – Vol. 18 (1). – pp. 89–99.

67. Gantimurova S. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia Using UAV Data / Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13(18). – pp. 3629.

68. Gao J. Optimization design method of 2D + 3D slope shape for landslide prevention in open-pit coal mine / Gao J., Wang S., Ye L., Jiang J., Sun J. // *Geohazard Mechanics*. – 2024. – Vol. 2(4). – pp. 236-243.

69. Glade T. Applying Probability Determination to Refine Landslide-triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical “Antecedent Daily Rainfall Model” / Glade T., Crozier M., Smith P. // *Pure and Applied Geophysics*. – 2000. – Vol. 157(6). – pp. 1059–1079.

70. Gómez–Miranda I.N. Advanced AI techniques for landslide susceptibility mapping and spatial prediction: A case study in Medellín, Colombia / Gómez–Miranda I.N., Restrepo–Estrada C., Builes–Jaramillo A., Porto de Albuquerque J. // *Applied Computing and Geosciences*. – 2025. – Vol. 25. – p. 100226.

71. González D.E. Riesgos geológicos y degradación ambiental: el caso del asentamiento urbano del Mariel, Cuba occidental / González D.E., Pacheco S.E., Pedroso I.I., García J.A., Pérez L.D., Serrano M.Y., Guerra M. // *VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de Sismicidad y Riesgos Geológicos, 2005, La Habana, Cuba*. – p. 23.

72. Goodchild M.F. Geographic information systems and cartography / Goodchild M.F. // Cartography. – 1990. – Vol. 19(1). – pp. 1–13.

73. Guardado R. Evaluación del riesgo por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguin / Guardado R., Almaguer Y. // Minería Geol. – 2001. – Vol. 18 (2). – p. 12.

74. Guo W.Z. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / Guo W.Z, Luo L., Wang W.L., Liu Z.Y., Chen Z.X., Kang H.L., Yang B. // Geomorphology. – 2019. – Vol. 337. – pp. 69–78.

75. Guo Z. Landslide susceptibility zonation method based on C5.0 decision tree and K-means cluster algorithms to improve the efficiency of risk management / Guo Z., Shi Y., Huang F., Fan X., Huang J. // Geosci. Front. – 2021. – Vol. 12 (6). – p. 101249.

76. Guzzetti F. Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy / Guzzetti F., Carrara A., Cardinalli M., Reichenbach P. // Geomorphology. – 1999. – Vol. 31. – pp. 181–216.

77. Han J. Data mining: concepts and techniques / J. Han, J. Pei, H. Tong. – Morgan Kaufmann : 4th ed., 2022. – 752 p.

78. Hirasawa K. Forward propagation universal learning network / Hirasawa K., Ohbayashi M., Koga M., Harada M. // Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'96). – 1996. – Vol. 1. – pp. 353–358.

79. Hoek E. Rock Slope Engineering / Hoek E., Bray J. D. – Taylor & Francis : CRC press., Third Edition, 1981.

80. Huang D. Identification of topographic factors for gully erosion susceptibility and their spatial modelling using machine learning in the black soil region of Northeast China / Huang D., Su L., Fan H., Zhou L., Tian Y. // Ecological Indicators. – 2022. – Vol. 143. – p. 109376.

81. Huang F. Modelling Uncertainties and Sensitivity Analysis of Landslide Susceptibility Prediction under Different Environmental Factor Connection Methods and

Machine Learning Models / Huang F., Xiong H., Zhou X., Catani F., Huang J. // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2024. – Vol. 28(1). – pp. 45–62.

82. Huang J. Determination of rainfall thresholds for shallow landslides by a probabilistic and empirical method / Huang J., Ju N P., Liao Y.J., Liu D.D. // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2015. – Vol. 15. – pp. 2715–2723.

83. Huang P. An innovative partition method for predicting shallow landslides by combining the slope stability analysis with a dynamic neural network model / Huang P. // CATENA. – 2022. – Vol. 217. – p. 106480.

84. Hutchinson J.N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology / Hutchinson J.N. – Lausanne AA: General report, 1988.

85. International Energy Agency: IEA: site. United State, 2022–. – URL: <https://www.iea.org/policies/15271-final-list-of-critical-minerals-2022> (date of access: 10.10.2023). Access mode: open access.

86. Iturralde-Vinent M.A. Sinopsis de la constitución geológica de Cuba / Iturralde-Vinent M.A. // Acta Geológica Hispánica. – 1998. – Vol. 33(1-4). – pp. 9–56.

87. Jazouli A.E. Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco) / Jazouli E.A., Barakat A., Khellouk R., Rais J., Baghdadi M.E. // Remote Sensing Applications: Society and Environment. – 2019. – Vol. 13. – pp. 361–374.

88. Jiménez A.M. Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS / Jiménez A.M. // Cuadernos Geográficos. – 2006. – Vol. 39(2). – pp. 231–233.

89. Kag A. Training Recurrent Neural Networks via Forward Propagation Through Time / Kag A., Saligrama V. // Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning. – 2021. – Vol. 139. – pp. 5189–5200.

90. Kang Y. InSAR monitoring of creeping landslides in mountainous regions: A case study in El dorado National Forest, California / Kang Y., Lu Z., Zhao C., Xu Y., Kim J.W., Gallegos A.J. // *Remote Sensing of Environment*. – 2021. – Vol. 258. – p. 112400.
91. Kavzoglu T. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression / Kavzoglu T., Sahin E.K., Colkesen I. // *Landslides*. – 2014. – Vol. 11(3). – pp. 425–439.
92. Keterma A. Water erosion assessment methods: a review / Keterma A., Dwarakish G.S. // *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. – 2019. – Vol. 27(4). – pp. 434–441.
93. Lavaut–Copa W. Patrones de meteorización de rocas ofiolíticas de Cuba oriental: su importancia para la minería / Lavaut–Copa W. // *Minería y Geología*. – 2004. – № 3–4. – pp. 3–14.
94. Li E. Indirect hazard evaluation by the prediction of backbreak distance in the open pit mine using support vector regression and chicken swarm optimization / Li E., Zhang Z., Zhou J., Khandelwal M., Yu Z., Monjezi M. // *Geohazard Mechanics*. – 2024. – Vol. 3(1). – pp. 1– 4.
95. Lima P. Conventional data-driven landslide susceptibility models may only tell us half of the story: Potential underestimation of landslide impact areas depending on the modeling design / Lima P., Steger S., Glade T., Mergili M. // *Geomorphology*. – 2023. – Vol. 430. – p. 108638.
96. Lokesh P. Machine learning and deep learning-based landslide susceptibility mapping using geospatial techniques in Wayanad, Kerala state, India / Lokesh P., Madhesh C., Mathew A., Shekar P.R. // *HydroResearch*. – 2025. – Vol. 8. – pp. 113–126.
97. Lomtadze V. Regularities of development of gravitational processes and their prediction / Lomtadze V. // *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*. – 1977. – Vol. 15(1). – p. 9.
98. Lu H. Seismic and environmental controls on slow-moving landslides: Insights from the 2008 Wenchuan Earthquake / Lu H., Tanyaş H., Li W., Xu Q., van Westen C.J., Lombardo L. // *Eng. Geol.* – 2025. – Vol. 344. – p. 107865.

99. Mantovani F. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe / Mantovani F., Soeters R., van Westen C.J. // *Geomorphology*. – 1996. – Vol. 15(3-4). – pp. 213–225.
100. Mao Y.M. Assessment of landslide susceptibility using DBSCAN-AHD and LD-EV methods / Mao Y.M., Mwakapesa D.S., Li Y.C., Xu K.B. // *Journal of Mountain Science*. – 2022. – Vol. 19(1). – pp. 184–197.
101. McClelland J.L., Feldman J., Adelson B., Bower G., McDermott D. Connectionist Models and Cognitive Science: Goals, Directions and Implications / McClelland J.L., Feldman J., Adelson B., Bower G., McDermott G. // Report to the National Science Foundation. – 1986. – [No page numbers].
102. Mekonnen A.A. GIS-based landslide susceptibility zonation and risk assessment in complex landscape: A case of Beshilo watershed, northern Ethiopia / Mekonnen A.A., Raghuvanshi T.K., Suryabhagavan K.V., Kassawmar T. // *Environmental Challenges*. – 2022. – Vol. 8. – p. 100586.
103. Molan Y.E. A Pattern-Based Strategy for InSAR Phase Unwrapping and Application to Two Landslides in Colorado / Molan Y.E., Lohman R.B. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2023. – Vol. 128(3). – p. e2022JB025761.
104. Mora C.S. Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination / Mora C.S., Vahrson W.G. // *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. – 1994. – Vol.3(1). – pp. 49–58.
105. Mwakapesa D.S. Landslide susceptibility mapping using O-CURE and PAM clustering algorithms / Mwakapesa D.S., Lan X., Nanekaran Y.A., Mao Y. // *Frontiers in Environmental Science*. – 2023. – Vol. 11. – p. 1140834.
106. Nguyen V.B.Q. Rainfall-Earthquake-Induced Landslide Hazard Prediction by Monte Carlo Simulation: A Case Study of MT. Umyeon in Korea / Nguyen V.B.Q., Kim Y.T. // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2020. – Vol. 24(1). – pp. 73–86.
107. Oficina Nacional de Estadísticas e Información. Anuario estadístico de Cuba 2022, 2023, La Habana, Cuba. – 464 p.

108. Pedroso E. Peligros, vulnerabilidad y riesgos geológicos, geofísicos y tecnológicos. Caso estudio en el municipio Playa / Pedroso E., Fundora M., González Y., Guerra M., Jaimez E., González B.T., David L., Llanes C., Suarez Y. Hernández V. – La Habana, Cuba, 2005.

109. Peel M.C. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification / Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. // Hydrology and earth system sciences. – 2007. – Vol. 11. – pp. 1633–1644.

110. Peña A. Estudios de clima de montaña en Cuba, topoclimas / Peña A., Delgado R., Guevara A.V, Rodríguez L., Savón Y. // Revista Cubana de Meteorología. – 2021. – Vol. 27(3).

111. Peña A. Patrones sinópticos que generan lluvias intensas capaces de producir inundaciones en el municipio de Baracoa / Peña A., Álvarez A.S., Téllez R.D., Quíala C.H., Fuentes A.M., Roman E.P., Vicente L.B. // Revista Cubana de Meteorología. – 2013. – Vol. 19(2). – pp. 113–126.

112. Peña–De la Cruz A. Delineation of the topoclimates of eastern Cuba by local weather patterns and unsupervised machine learning / Peña–De la Cruz A., Delgado–Téllez R., Savón–Vaciano Y., Ding M. // Revista Brasileira de Meteorologia. – 2025. – Vol. 40. – p. e40230023.

113. Pirone M. Study of the groundwater regime in unsaturated slopes prone to landslides by multidisciplinary investigations: Experimental study and numerical modelling / Pirone M., Di Maio R., Forte G., De Paola C., Di Marino E., Salone R., Santo A., Urciuoli G. // Engineering Geology. – 2023. – Vol. 315. – p. 107045.

114. Posphehov G.B. Inventory of Landslides Triggered by Hurricane Matthews in Guantánamo, Cuba / Posphehov G.B., **Savón Yu.**, Delgado R., Castellanos E.A., Peña A. // Geography, Environment, Sustainability. – 2023. – Vol. 16, №. 1. – pp. 55-63.

115. Posphehov G.B. Landslide hazard assessment in Yateras municipality, Cuba / Posphehov G.B., **Savón Y.** // International conference on ensuring sustainable development: ecology, energy, earth science and agriculture (AEES2023). – 2024. – p. 1006.

116. Posphehov G.B. Landslide processes as a natural disturbance in ecosystems in the Alejandro de Humboldt National Park, Cuba / Posphehov G.B., **Savon-Vaciano Y.**, Hernandez-Columbie, T. // Ensuring sustainable development in the context of agriculture, energy, ecology and earth science (ESDCA-III-2023) (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science). – 2023. – Vol. 1212. - p. 12029.

117. Pourghasemi H.R. Is multi-hazard mapping effective in assessing natural hazards and integrated watershed management? / Pourghasemi H.R., Gayen A., Edalat M., Zarafshar M., Tiefenbacher J.P. // Geoscience Frontiers. – 2020. – Vol. 11(4). – pp. 1203–1217.

118. Prabha R. A Novel Predictive Analysis and Classification of Land Subsidence Vulnerability Mapping based on GIS using Hybrid Optimized Machine Learning Techniques and Computer Vision / Prabha R., Arun M., Nisha A.S.A., Prabu S. // Procedia Computer Science. – 2024. – Vol. 233. – pp. 343–352.

119. Pradhan S. An investigation of the combined effect of rainfall and road cut on landsliding / Pradhan S., Toll D.G., Rosser N.J., Brain M.J. // Engineering Geology. – 2022. – Vol. 307. – p. 106787.

120. Raghuvanshi T.K. Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme – An approach for landslide hazard zonation / Raghuvanshi T.K., Ibrahim J., Ayalew D. // African Earth Sciences. – 2014. – Vol. 99. – pp. 595–612.

121. Rahmani S.R. Estimating natural soil drainage classes in the Wisconsin till plain of the Midwestern U.S.A. based on lidar derived terrain indices: Evaluating prediction accuracy of multinomial logistic regression and machine learning algorithms / Rahmani S.R., Libohova Z., Ackerson J.P., Schulze D.G. // Geoderma Regional. – 2023. – Vol. 35. – p. e00728.

122. Reichenbach P. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy) / Reichenbach P., Cardinali M., De Vita P., Guzzetti F. // Environmental Geology. – 1998. – Vol. 35(2). – pp. 146–159.

123. Reyes P. Peligro geológico de la red vial de las provincias orientales para caso de sismos de gran intensidad / Reyes P., Ríos Y., Arango E. // VI Congreso de Geología y Minería. Simposio de sismicidad y riesgos geológicos, La Habana, Cuba, 2005.

124. Rosabal S. Evaluación de peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica, en Cuba Oriental / Rosabal R. – Moa, Holguín: Universidad de Moa, 2018. – 231 p.

125. Rosabal S. Incidencia de la geomorfología en los deslizamientos de la carretera de Beltrán, Guantánamo, Cuba / Rosabal R., Zapata J.A., Gómez J. // GEOS. – 2009. – Vol. 29(2). – pp. 257–268.

126. Rumelhart D.E. Learning internal representations by backpropagation / Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. // Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition: in 2 vol. / Ed by Rumelhart D. E., McClelland J. L., PDP Research Group. – 1986. – Vol. 1. – P. 318–362

127. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process / Saaty T.L. // Int. J. Serv. Sci. – 2008. – Vol. 1(1). – pp. 83–98.

128. Saeidi T. Modeling the effect of slope aspect on temporal variation of soil water content and matric potential using different approaches by HYDRUS-1D / T. Saeidi, M. R. Mosaddeghi, M. Afyuni, S. Ayoubi, D. Sauer // Geoderma. – 2023. – Vol. 35. – p. e00724.

129. Sahrane R. Investigating the effects of landslides inventory completeness on susceptibility mapping and frequency-area distributions: case of Taounate province, Northern Morocco / Sahrane R., Bounab A., Kharim Y.E. // CATENA. – 2023. – Vol. 220. – p. 106737.

130. Salini P.N. Risk and vulnerability analysis of road network in landslide prone areas in Munnar region, India / Salini P.N., Rahul P. // Transportation Engineering. – 2024. – Vol. 18. – p. 100275.

131. Sarker I.H. Data Science and Analytics: An Overview from Data-Driven Smart Computing, Decision-Making and Applications Perspective / Sarker I.H. // SN Computer Science. – 2021. – Vol. 2(5). – p. 377.

132. Sarker I.H. Cybersecurity data science: an overview from machine learning perspective / Sarker I.H., Kayes A.S.M., Badsha S., Alqahtani H., Watters P., Ng A. // Journal of Big data. – 2020. – Vol. 7(1). – pp. 1–29.

133. Sarker I.H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions / Sarker I.H. // SN Computer Science. – 2021. – Vol. 2(3). – p. 160.

134. Savón Y. Evaluación del peligro de ocurrencia de movimientos gravitacionales en la provincia Guantánamo, Cuba / Savón Y., Mesa A., Castillo L., Ané M., Cordovez J.M // Hombre Ciencia y Tecnología. – 2016. – Vol. 20(3). – pp. 112–121.

135. Shano L. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review / Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. // Geoenvironmental Disasters. – 2020. – Vol. 7(1). – pp. 1–19.

136. Song Z. Intelligent early-warning platform for open-pit mining: Current status and prospects / Song Z., Li X., Huo R., Liu L. // Rock Mechanics Bulletin. – 2024. – Vol. 3(1). – p. 100098.

137. Stedinger J.R. Frequency analysis of extreme events / Stedinger J.R., Vogel R., Foufoula-Georgiou E. // Handbook of hydrology. – 1993. – pp.18.1-18.66.

138. Su Z. Deep convolutional neural network-based pixel-wise landslide inventory mapping / Su Z., Chow J.K., Tan P.S., Wu J., Ho Y.K., Wang Y.H. // Landslides. – 2021. – Vol. 18(4). – pp. 1421–1443.

139. Suarez J. Deslizamientos y estabilidad de Taludes En Zonas Tropicales. Bucaramanga, Colombia / Suarez J. – Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos: Ingeniería de Suelos Ltda, 1998. – 550 p.

140. Tareke K.A. Hydrological drought forecasting and monitoring system development using artificial neural network (ANN) in Ethiopia / Tareke K.A., Awoke A. G. // Heliyon. – 2023. – Vol. 9(2). – p. e13287.

141. Thankappan J. Adaptive Momentum-Backpropagation Algorithm for Flood Prediction and Management in the Internet of Things / Thankappan J., Mary K., Raj D.,

Yoon D.J., Park S.H. // Computers, Materials & Continua. – 2023. – Vol. 77(1). pp. 1053–1079.

142. Tien J.M. Internet of Things, Real-Time Decision Making, and Artificial Intelligence / Tien J.M. // Annals of Data Science. – 2017. – Vol. 4(2). – pp. 149–178.

143. Undrr.org: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030: Website. – Geneva, 2000 – URL: www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework (access date: 23.03.2023). – Access mode: open access.

144. Unidad Básica Minera. Grupo de Planificación y topografía. Proyecto Camino Principal Yacimiento Camarioca Este: Plan 5 Años 2022 / 2026 // Productora de níquel y cobalto “Empresa Che Guevara”, 2001.

145. Unidad Presupuestada de Servicios Ambientales (UPSA). Plan de manejo de área protegida de recursos manejados / Delegación del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. – Guantánamo, 2016. – 68 p.

146. Varnes D.J. Slope movement types and processes / Varnes D.J. // Special Report Transportation Research Board. – 1978. – Vol. 176. – p. 12–33.

147. Velasco L.C.P. Week-ahead Rainfall Forecasting Using Multilayer Perceptron Neural Network / Velasco L.C.P., Serquiña R.P., Zamad M.S.A.A., Juanico B.F., Lomocso J.C. // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 161. – pp. 386–397.

148. Villalobos E.E. Estudio de tormentas convectivas sobre los Andes Centrales del Perú usando los radares PR-TRMM y KuPR-GPM / Villalobos E.E., Martinez–Castro D., Kumar S., Silva Y., Fashe O. // Revista Cubana de Meteorología. – 2019. – Vol. 25(1). – pp. 59–75.

149. Vishnu C.L. Challenges of modeling rainfall triggered landslides in a data-sparse region: A case study from the Western Ghats, India / Vishnu C.L., Chatterjee S., Sajinkumar K.S. // Geosystems Geoenvironment. – 2022. – Vol. 1(3). – p. 100060.

150. Wang J. Landslide susceptibility evaluation based on landslide classification and ANN-NFR modelling in the Three Gorges Reservoir area, China / Wang J., Wang Y., Li C., Li Y., Qi H. // *Ecological Indicators*. – 2024. – Vol. 160. – p. 111920.

151. Wang Y. Automatic detection and update of landslide inventory before and after impoundments at the Lianghekou reservoir using Sentinel-1 InSAR / Wang Y., Dong J., Zhang L., Deng S., Zhang G., Liao M., Gong J. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2023. – Vol. 118. – p. 103224.

152. Werbos P.J. Generalization of Backpropagation with Application to a Recurrent Gas Market Model / Werbos P.J. // *Neural Networks*. – 1988. – Vol. 1. – No 4. – pp. 339–356.

153. Xi X. Evaluation on geological environment carrying capacity of mining city – A case study in Huangshi City, Hubei Province, China / Xi X., Wang S., Yao L., Zhang Y., Niu R., Zhou Y. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2021. – Vol. 102. – p. 102410.

154. Xia M.P. Risk Assessment and Mitigation Evaluation for Rockfall Hazards at the Diversion Tunnel Inlet Slope of Jinchuan Hydropower Station by Using Three-dimensional Terrestrial Scanning Technology / Xia M.P., Li H.B., Jiang N., Chen J.L., Zhou J.W. // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 27(1). – pp. 181–197.

155. Yaelsy C. Legislación ambiental y minera en Cuba. Aciertos y desaciertos / Yaelsy C., Cobas L. // *Revista de la Academia Nicaragüense de Ciencias Jurídicas y Políticas*. – 2021. – Vol. 7(13). – pp. 146–164.

156. Yin K.L. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed Rock / Yin K.L., Yang T.Z. // *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 1988*. – Vol. 2. – pp. 1269–1272.

157. Zadeh L.A. Fuzzy probabilities / Zadeh L.A. // *Information processing & management*. – 1984. – Vol. 20(3). – pp. 363-372.

158. Zapico I. Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park / Zapico I., Molina A., Laronne J.B., Castillo L.S., Duque J.F.M. // *Engineering Geology*. – 2020. – Vol. 264. – p. 105321.

159. Zhang L. Landslide susceptibility evaluation and determination of critical influencing factors in eastern Sichuan mountainous area, China / Zhang L., Guo Z., Qi S., Zhao T., Wu B., Li P. // *Ecological Indicators*. – 2024. – Vol. 169. – p. 112911.

160. Zhang Y. Enhancing landslide hazards survey and management to reduce the loss of human lives and properties / Zhang Y. // *Spec. Issue Landslide Monit. Early Warn. Risk Assess.* – 2024. – Vol. 7(2). – pp. 169–170.

161. Zhou J. Slope stability prediction for circular mode failure using gradient boosting machine approach based on an updated database of case histories / Zhou J., Li E., Yang S., Wang M., Shi X., Yao S., Mitri H.S. // *Safety Science*. – 2019. – Vol. 118. – pp. 505–518.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2022623538

**База данных проявлений оползневых процессов в
Гуантанамо, Куба**

*Правообладатель: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

*Авторы: Савон Васиано Юсмира (CU), Поснехов Георгий
Борисович (RU), Бойков Алексей Викторович (RU)*



Заявка № 2022623642

Дата поступления 14 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Роспатенте 19 декабря 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

подпись: *Ю.С. Зубов*
Служба по интеллектуальной собственности
Почтовый адрес: 125080, Москва, ул. Мясницкая, д. 26
Телефон: 8 (495) 793-8200

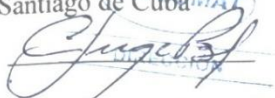
Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов диссертации

Aprobado

Director de la Unidad Empresarial
de Base (UEB) "EXPLOMAT"
Santiago de Cuba



Pérez Rodríguez A.

12 de septiembre del 2024

ACTA

sobre la aplicación de los resultados de la tesis doctoral

Savón Vaciano Yusmira

sobre la especialidad científica

2.8.3- Geología y minería de yacimientos de petróleo y gas, geofísica, topografía y geometría del subsuelo.

La comisión compuesta por:

Presidente: Director de la UEB «EXPLOMAT» Santiago de Cuba, Pérez Rodríguez A.

Miembros de la comisión

Especialista Principal Departamento de Proyecto

e Investigaciones, Palacios Greco Livan

Especialista "A" en Geología, Cayamo Ferrera Raidel

Han redactado la presente acta (certificado) para constatar que los resultados de la disertación sobre el tema «Aplicación de una evaluación regional de peligro de deslizamientos para predecir la estabilidad de taludes durante la apertura de depósitos en el macizo Sagua-Baracoa, Cuba», presentado para el grado de Candidato en Ciencias Técnicas, han sido utilizados en las actividades de la Unidad empresarial de base, de la empresa de servicios minero geológicos «EXPLOMAT» en la aplicación de la minería en forma de:

- método y sistema de procesamiento de información geológica, topográfica y climática en apoyo del proceso minero.
- modelo predictivo para la formulación de escenarios de procesos de deslizamientos de tierra en canteras.
- Seguimiento del entorno geológico y topográfico durante el desarrollo de depósitos minerales y el cierre de canteras.

La aplicación de los resultados de la tesis en el flujo de trabajo de la Unidad empresarial de base (UEB) Santiago de Cuba, de la empresa de servicios minero geológicos «EXPLOMAT» dio lugar a los siguientes indicadores:

- mejora de la calidad de los servicios prestados a los usuarios del subsuelo;
- reducción de costes de realización trabajos de procesamiento de información geológica, topográfica y climática con alta fiabilidad de los resultados;
- aumento de la productividad laboral en la prospección del terreno y el desarrollo de áreas mineras;
- aumentó el nivel de formación de los especialistas de la Unidad empresarial de base (UEB) Santiago de Cuba, de la empresa de servicios minero geológicos «EXPLOMAT».

Director de la comisión

Director de la Unidad Empresarial de Base (UEB) «EXPLOMAT» Santiago de Cuba

UEB SANTIAGO
EXPLOMAT
DIRECCIÓN

Pérez Rodríguez A.

Miembros de la comisión

Especialista Principal Departamento de Proyecto e Investigaciones

TR

Palacios Greco Livan

Especialista "A" en Geología

Ryama

Cayamo Ferrera Raidel

Бюро переводов Guten Morgen ®
 OzimokGroup ®
 Санкт-Петербург, ул. Восстания, 4, офис 1
 Тел. +7 911 112 31 64
 Тел. +7 (812) 579 04 72
 E-mail: perevodoc@gmail.com
 www.gutenmorgen.pro

Translation Agency Guten Morgen ®
 OzimokGroup ®
 St. Petersburg, Vosstaniya, 4, office 1
 Tel. +7 911 112 31 64
 Tel. +7 (812) 579 04 72
 E-mail: perevodoc@gmail.com
 www.gutenmorgen.pro

Перевод с испанского языка

Утверждаю

Директор Базового структурного
 подразделения (UEB) «ЭКСПЛОМАТ»
 Сантьяго-де-Куба
/подпись/ Перес Родригес А.
12 сентября 2024 года
Штамп: Подразделение Сантьяго
 ЭКСПЛОМАТ
 Дирекция

АКТ

о применении результатов кандидатской диссертации

Савон Васиано Юмиры

по научной специальности

2.8.3 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
 маркшейдерское дело и геометрия недр.

Комиссия в составе:

Председатель: Директор подразделения «ЭКСПЛОМАТ», Сантьяго-де-Куба, Перес
 Родригес А.

Члены комиссии

Главный специалист Проектно-
 исследовательского отдела, Паласиос Греко Ливан
 Специалист «А» в Геологии, Кайамо Феррера Райдел

Настоящий акт (свидетельство) составлен для указания, что результаты диссертации по теме «Применение региональной оценки оползневой опасности для прогноза устойчивости откосов при вскрытии месторождений на территории горного массива Сагуа – Баракоа, Куба», представленной на соискание степени кандидата технических наук, были использованы в деятельности Базового структурного подразделения компании «ЭКСПЛОМАТ», предоставляющей услуги горных и геологических работ, применительно к горнодобывающей промышленности в виде:

- метода и системы обработки геологической, топографической и климатической информации для процесса горнорудного производства;
- прогностической модели для формулировки сценариев процессов схода оползней в карьерах;
- мониторинга геологической и топографической обстановки при разработке месторождений полезных ископаемых и закрытии карьеров.

Применение результатов диссертации в потоке работ в Базовом структурном подразделении (UEB) Сантьяго-де-Куба компании «ЭКСПЛОМАТ», предоставляющей услуги горных и геологических работ, вызвало следующее:

- улучшение качества услуг, предоставляемых пользователям недр;
- сокращение расходов на проведение работ по обработке геологической, топографической и климатической информации с высокой достоверностью результатов;
- увеличение производительности труда при геологоразведке и разработке районов горных работ;
- повышение уровня подготовки специалистов Базового структурного подразделения (UEB) Сантьяго-де-Куба компании «ЭКСПЛОМАТ», предоставляющей услуги горных и геологических работ.

Директор комиссии

Директор Базового структурного подразделения
(UEB) «ЭКСПЛОМАТ» Сантьяго-де-Куба /подпись/ Перес Родригес А.

Штамп: Подразделение Сантьяго
ЭКСПЛОМАТ
Дирекция

Члены комиссии

Главный специалист
Проектно-исследовательского отдела /подпись/ Паласиос Греко Ливан

Специалист «А» в Геологии /подпись/ Кайамо Феррера Райдел

----- Конец перевода документа -----

Я, дипломированный переводчик, Лаптев Иван Олегович, владеющий русским и испанским языками, подтверждаю, что выполненный мною перевод приложенного документа является правильным, точным и полным.

Лаптев Иван Олегович



САНКТ-

ПЕТЕРБУРГ

Российская Федерация. Санкт-Петербург.

Десятого января две тысячи двадцать пятого года.

Я, Карпунина Ольга Васильевна, нотариус нотариального округа Санкт-Петербург
свидетельствую подлинность подписи переводчика **Лаптева Ивана Олеговича**.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре за № 78/303-н/78-2025- *2-107*

Уплачено за совершение нотариального действия: 700 руб. 00 коп.

О.В. Карпунина



Итого в настоящем документе

Прошито 5 (пять) листов

Нотариус: