

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат геолого-минералогических наук

Поспехов Георгий Борисович

Официальные оппоненты:

Бахаева Светлана Петровна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра маркшейдерского дела и геологии, профессор;

Фоменко Игорь Константинович

доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», кафедра инженерной геологии, профессор.

Ведущая организация – открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу», г. Белгород.

Защита диссертации состоится **23 сентября 2025 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт - Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Оползни являются одной из основных опасностей, угрожающих безопасной разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом, особенно при ведении горных работ в горной местности. Они могут быть обусловлены как природными факторами, такими как интенсивные осадки, сейсмичность или выветривание, так и деятельностью человека, в том числе при формировании и эксплуатации различных откосных сооружений. 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 полуквантитативных 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.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

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 работы:

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.

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.

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, 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 (далее – Перечень ВАК), 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.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 161 наименование, 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 рекомендации при работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены предмет и объект исследований теоретического оползневедения; определение, механизмы, условия, критерии и причины оползневой опасности; динамика оползневых процессов; прогноз оползневой опасности, история изучения оползней на Кубе, современные проблемы и перспективы прогноза в горнодобывающих районах.

Во второй главе представлены анализ условий и факторов, способствующих развитию оползневых процессов в массиве Сагуа-Баракоа. К ним относятся: климатические условия; геоморфологические условия; геологическое строение и тектонические особенности; физико-механические свойства горных пород; гидрологические и гидрогеологические условия; современные экзогенные процессы, включая эрозию, выветривание, сейсмическую активность и проявление оползневых процессов в массиве Сагуа-Баракоа.

В третьей главе представлены подходы и методы оценки и прогноза региональной оползневой опасности и проведено региональное инженерно-геологическое районирование по степени оползневой опасности массива Сагуа-Баракоа с использованием метода вероятностной мультиномиальной логистической регрессии.

В четвертой главе представлена методика прогнозирования оползневой опасности на открытых месторождениях полезных ископаемых массива Сагуа-Баракоа. Были получены критические значения количества атмосферных осадков, способствующие возникновению оползней, и с помощью искусственных нейронных сетей

построена модель прогноза оползневой опасности для открытых месторождений полезных ископаемых. Прогноз подтвержден расчетом коэффициента запаса прочности в трех секторах.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты проведенного исследования

Основные результаты отражены в следующих **защищаемых положениях**:

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.

Для оценки региональной оползневой опасности в массиве Сагуа-Баракоа была собрана и проанализирована имеющаяся информация, проведен кадастр оползней и использован вероятностный метод мультиномиальной логистической регрессии (далее – МЛР).

Независимые переменные могут быть как непрерывными, так и дискретными или категориальными. Вероятность того, что пиксель может принадлежать к определенному классу (k) в пространстве, определяется математическим уравнением (1):

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

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

Опасность оползней – это категориальная переменная, поэтому МЛР может быть пригодна для оценки увеличения или уменьшения опасности оползней на основе оценки климатических, топографических и инженерно-геологических данных. В таблице 1 приведены классы каждого из факторов с учетом их значимости для возникновения неустойчивости откосов.

Для определения взаимосвязи факторов был проведен анализ оползневого кадастра района исследования. Крутизна и высота склона оказывают определяющее влияние, экспозиция склона и кривизна – меньшее. 80 % оползней было сосредоточено в метаморфическом комплексе (свита сьерра-пуриал) и офиолитовом комплексе. На

глинистых и глинисто-суглинистых грунтах наблюдалось наибольшее количество оползней (47 % и 37 % соответственно). 87% оползней произошли в пределах 500 м от разломов, что подтверждает высокую восприимчивость территорий, расположенных вблизи геологических структур. На районы с высоким уровнем осадков пришлось 88,1 % оползней (778); 51 % оползней был распределен на склонах, расположенных не менее чем в 100 м от водоемов. Хотя 87 % оползней были расположены в районах с низким уровнем влияния выемок, этот фактор необходимо учитывать, особенно при наличии в районе месторождений никеля и кобальта, поскольку он является критическим фактором, повышающим нестабильность рельефа (рисунки 1).

МЛР 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. В целом из 883 оползней на исследуемой территории 62 % инвентаризированных оползней распределены по классам «Высокой» и «Очень высокой» опасности (таблица 2).

При анализе методом МЛР были проанализированы статистическая значимость ($P < 0,05$) и влияние на коэффициенты правдоподобия (таблица 3).

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 опасность» и «Высокая опасность» («logit 1») и 0,23 при сравнении категорий «Низкая опасность» 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 массива Сагуа-Баракоа было проведено с учетом коэффициентов, присвоенных факторам, проанализированным методом МЛР и с использованием геоинформационных систем (рисунок 2).

Проверена с использованием данных инвентаризации предыдущих оползней на исследуемой территории (рисунок 2 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.

Из общего числа оползней, зарегистрированных в массиве Сагуа-Баракоа (883), 486 оползней распределены в зонах высокой опасности и 69 - в зонах средней опасности (рисунок 2 б). Следует отметить, что 328 оползней распределены в зонах низкой опасности. Можно сделать вывод, 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 2 в).

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.

Метод, предложенный Стедингером (1993), для расчета критических значений количества атмосферных осадков (K_0) в основном используется при анализе гидрологических и геологических данных, особенно при выявлении выбросов в рядах данных об осадках. Выражение, предложенное для расчета критических значений, выглядит следующим образом (2):

$$K_0 = \bar{x} \pm k_n S_y \quad (2)$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение выборки; S_y – стандартное отклонение выборки; k_n – критическое значение в зависимости от размера n , рассчитываемое по следующему уравнению (3):

$$k_n = -0.9043 + 3.345\sqrt{\log(n)} - 0.4046 \log(n) \quad (3)$$

Период повторяемости используется для связи критических значений количества атмосферных осадков (интенсивности или накопления) с вероятностью наступления экстремального события, которое может вызвать неустойчивость откоса. Период повторяемости (T) напрямую связан с вероятностью превышения $P(X > x)$ по формуле (4):

$$T = \frac{1}{P(X > x)} \quad (4)$$

где T – период повторяемости в годах; $P(X > x)$ – вероятность события, превышающего критическое значение в данном году.

При анализе максимальных суточных значений осадков за период 1992-2020 гг. данные демонстрируют разнонаправленное поведение в течение всего периода (рисунок 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 погодных условий.

В таблице 4 представлены результаты, полученные для критических значений количества атмосферных осадков для каждой метеостанции и среднего критического значения, соответствующего 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. Станция Джамаль показывает 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 ней регистрируется наименьшее количество накопленных осадков в экстремальных условиях.

На рисунке 4 для подтверждения рассчитанных критических значений использовалось экстремальное погодное явление. Критические значения показаны в отношении накопленных осадков, соответствующих прохождению урагана «Мэтью» - одного из метеорологических явлений, нанесших наибольший ущерб северо-восточной части Кубы в октябре 2016 г. Анализ распределения оползней по критическим значениям показывает, что для 2-летнего периода возврата 89,1 % оползней (552) произошли в период выпадения осадков, равный или превышающий критическое значение, 73 % оползней (453) превысили критическое значение для 5-летнего периода возврата, а для 10- и 20-летнего периодов возврата только 44 % (277) и 30 % (191) оползней соответственно превысили критические значения для этих периодов.

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.

Для прогнозирования оползней на открытых месторождениях полезных ископаемых использовался метод машинного обучения - искусственная нейронная сеть. Архитектура сети для этой цели показана на рисунке 5.

Матрица ошибок, рассчитанная на обучающих данных, обобщает результаты работы нейронной сети для используемого набора данных, предоставляя информацию о проценте правильной классификации и надежности для каждого из классов оползневой опасности (рисунок 6). При этом учитывалось количество оползней, которые были правильно классифицированы для каждого класса опасности на основе общих закономерностей, сформированных анализируемыми факторами. В обучающей матрице 74,8 % оползней были правильно отнесены к высокому классу опасности, 22,1 % – к среднему классу опасности и только 1,5 % – к низкому классу опасности.

На рисунке 7 показан коэффициент истинных положительных результатов (TPR) для каждого класса, который был получен, применив классификацию к обучающему, проверочному, тестовому и полному наборам данных. 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.

Был проведен анализ поведения различных факторов в распределении оползней на открытых месторождениях полезных ископаемых с помощью метода искусственной нейронной сети (рисунок 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».

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 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 8 б). Количество осадков принимает меньшие суммарные значения с диапазоном 50–100 мм за 24 часа.

В классе «Низкий риск» (рисунок 8 в) по фактору крутизны откоса большинство оползней (10) распределены в классе с 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 9 показаны категории опасности оползней, определенные с помощью метода искусственной нейронной сети для 12 месторождений никеля и кобальта, причем большинство этих площадей относятся к категориям «Высокая опасность» и «Средняя опасность».

Результат прогноза оползневой опасности подтвержден расчетом коэффициента безопасности для откосов подъездной дороги к месторождению Камариока-Восток, чтобы узнать точность и надежность прогноза. Коэффициент запаса рассчитывался по методу предельного равновесия Morgenштерна-Прайса, который учитывает равновесие сил и моментов (5):

$$K3 = \sum \frac{(c' * L_i + N_i * \tan(\phi'))}{\sum W_i \sin(\alpha_i)} \quad (5)$$

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.

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 запаса устойчивости (КЗ) показывают четкое влияние этих аспектов на устойчивость склонов в трех секторах (рисунок 10). Для нормальных условий или при длительном отсутствии дождей в целом все сектора устойчивы. Все три сектора имеют значения, относящиеся к устойчивым откосам: сектор 1 с $KЗ = 1,553$, сектор 2 с $KЗ = 1,562$ и сектор 3 с $KЗ = 1,532$.

В условиях влажности сектор 1, расположенный в зоне с высокой категорией опасности, имеет критическое значение $KЗ = 0,828$, что означает, что он имеет очень неустойчивый откос с плоскостью разрушения, 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, хотя и неустойчив со значением $KЗ = 0,754$; этот горизонт простирает свою наиболее вероятную плоскость разрушения до горизонта II.

Полученное наличие связи между КЗ откосов при вскрытых месторождениях полезных ископаемых и влажностью горизонтов, вызванной осадками, свидетельствует о значимости категорий опасности оползней в прогнозе, особенно категории «Высокая опасность».

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 оползневым 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

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

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

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

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

4. Афанасьев, П.И. Анализ устойчивости откосов горной дороги месторождения Samarioca Este компании Comandante Ernesto Che Guevara / П.И. Афанасьев, С.Я. Медина, **В.Ю. Савон**, П.М. Картайя, М.И. Гарсия де ла Круз // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 4. – С. 78–84.

Публикации в прочих изданиях:

5. Pospehov, G.B. Landslide processes as a natural disturbance in ecosystems in the Alejandro de Humboldt National Park, Cuba / G.B. Pospehov, **Y. Savon-Vaciano**, T. Hernandez-Columbie // 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.

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

7. **Савон-Васиано, Ю.** Применение вероятностного метода при определении опасности оползней на Кубе / Ю. Савон-Васиано, Г.Б. Поспехов // IV Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков «Проблемы горного дела» // ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (28-29 ноября 2024 г). Донецк

Патенты:

8. 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 Васиано**, Г.Б. Поспехов, А.В. Бойков; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 80 КБ.

Таблица 1 – Факторы восприимчивости и триггеры для возникновения оползней на склонах и откосах и их классы

Фактор	Диапазон	Класс	Степень влияния на устойчивость	Описание	Фактор	Диапазон	Класс	Степень влияния на устойчивость	Описание
Крутизна откосов, град	0 – 14	1	Низкий	Пологие склоны	Высота, м	0 – 150	1	Низкая	Плоские земли
	14 – 22	2	Средний	Умеренно крутые склоны		150 – 300	2	Средняя	Холмы
	22 – 32	3	Высокий	Крутые склоны		300 – 500	3	Высокая	Низкие горы
	32 – 69	4	Очень высокий	Очень крутые склоны		более 500	4	Очень высокая	Горы
Кривизна	0 – 0.5	1	Низкая	Плоская поверхность	Расстояние до реки, м	1-100	3	Высокая	Относится к зоне влияния неустойчивости в пределах установленных классов
	> 0.5	2	Средняя	Вогнутая поверхность		100-250	2	Средняя	
	< 0	3	Высокая	Выпуклая поверхность		более 250	1	Низкая	
Тип грунта	-	1	Несвязные типы грунтов	Низкая	Накопленные осадки, мм	более 2000	4	Очень высокая	Относится к среднегодовому количеству накопленных осадков
	-	2	Суглинок	Средняя		1000-2000	3	Высокая	
	-	3	Переслаивание глин и суглинков	Высокая		700-1000	2	Средняя	
	-	4	Глинистый	Очень высокая		1-700	1	Низкая	
Тип горных пород	-	1	Низкая	Стекловидные, туфы	Экспозиция склона, град	180 – 270	1	Низкая	Склоны, обращенные на юг и юго-запад
	-	2	Средняя	Мергели, серпентины, сланцы		90 – 180	2	Средняя	Склоны, обращенные на восток и юго-восток
	-	3	Высокая	Конгломераты, брекчии, песчаники		270 – 360	3	Высокая	Склоны, обращенные на запад и северо-запад
	-	4	Очень высокая	Мягкие сланцы, коры выветривания		0 – 90	4	Очень высокая	Склоны, обращенные к северу и северо-востоку
Расстояние до дорог, м	1-50	3	Высокая	Относится к зоне влияния неустойчивости в пределах установленных классов	Расстояние разлома, м	> 500	1	Низкая	Зона влияния свыше 500 м
	50-100	2	Средняя			< 500	2	Высокая	Зона влияния до 500 м
	более 100	1	Низкая						

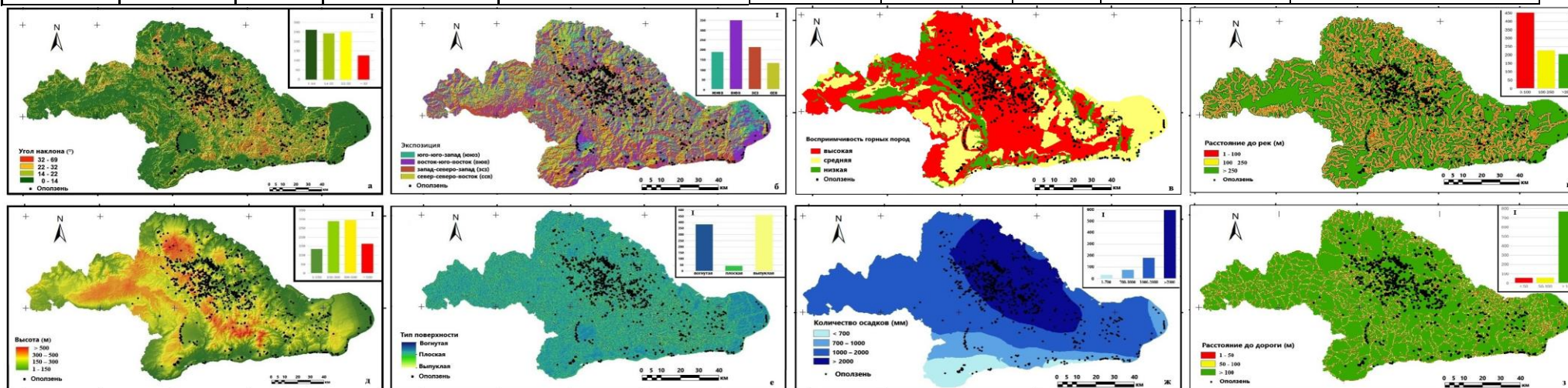


Рисунок 1 – Карта взаимосвязи между факторами и возникновением оползней. а – угол наклона; б – экспозиция; в – восприимчивость типов горных пород к возникновению оползней; г – расстояние до реки; д – высота; е – кривизна склона; ж – накопленные осадки; з – расстояние до выемок. и – количество оползней по классам

Таблица 2 – Данные, полученные в ходе мультиномиального логистического регрессионного анализа

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

Таблица 3 – Мультиномиальный логистический регрессионный анализ

Фактор	Коэф.	СО Коэф.	Z- значение	Р- значение	Отношение вероятностей	ДИ 95% (Доверительный интервал 95%)	
						Нижний	Верхний
Logit 1: (Средняя опасность / Высокая опасность)							
Константа	13,72	1,96	6,98	0	-	-	-
Крутизна 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 выемок	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	-	-	-
Крутизна 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
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 разлома	-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 выемок	0,28	0,25	1,07	0,286	1,31	0,8	2,14

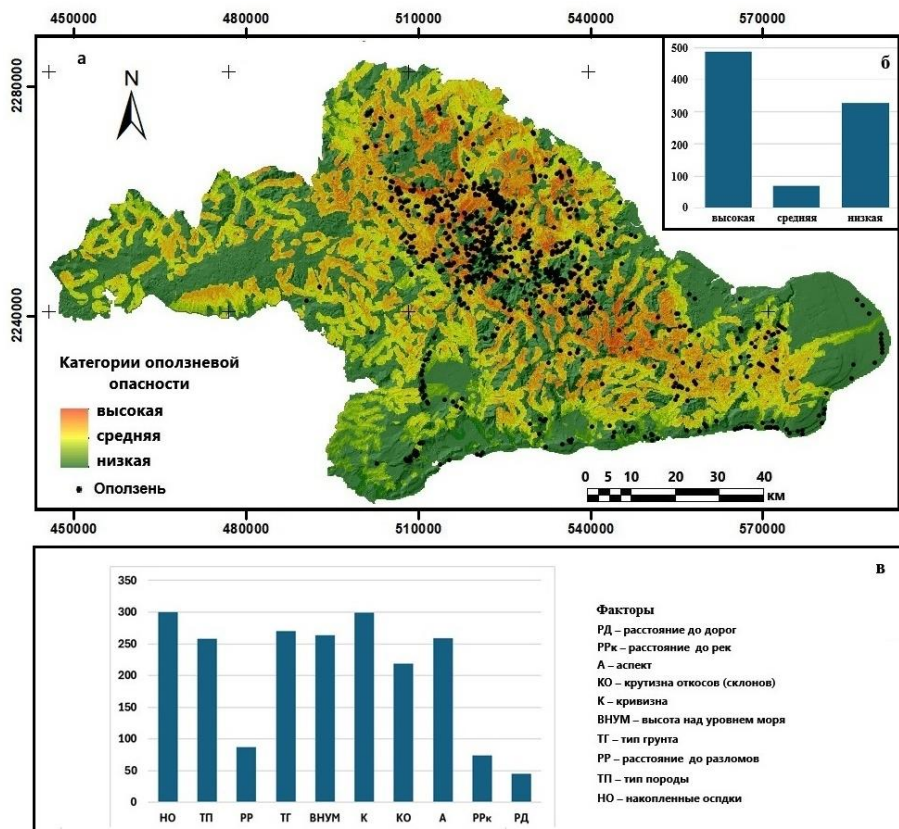


Рисунок 2 – Региональное инженерно-геологическое районирование по оползневой опасности в массиве Сауга-Баракоеа.

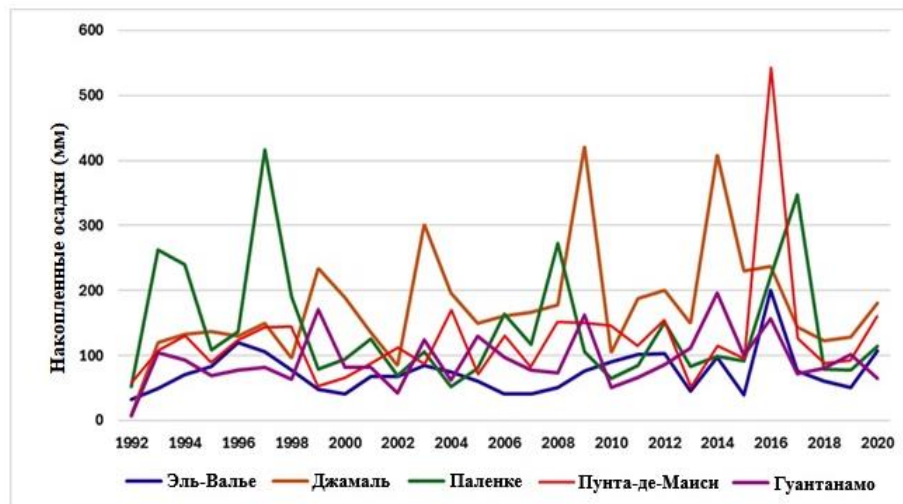


Рисунок 3 – Максимальные значения осадков в период 1992-2020 гг.

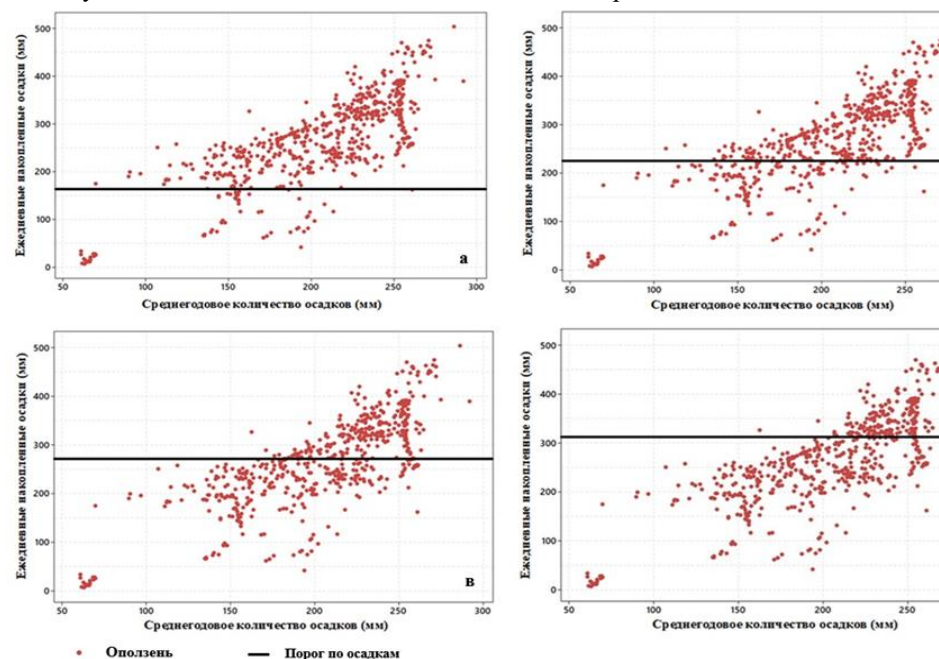


Рисунок 4 – Оценка критических значений осадков для возникновения оползней на территории: а – критическое значение для 2-летнего периода повторяемости; б – критическое значение для 5-летнего периода повторяемости; в – критическое значение для 10-летнего периода повторяемости; г – критическое значение для 20-летнего периода повторяемости

Таблица 4 – Критические значения осадков в массиве Сагуа-Баракоа для периодов возврата 2, 5, 10, 20 лет

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	7,4	200,7	260,1	300,5	340,2
Пунта-де-Манси	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

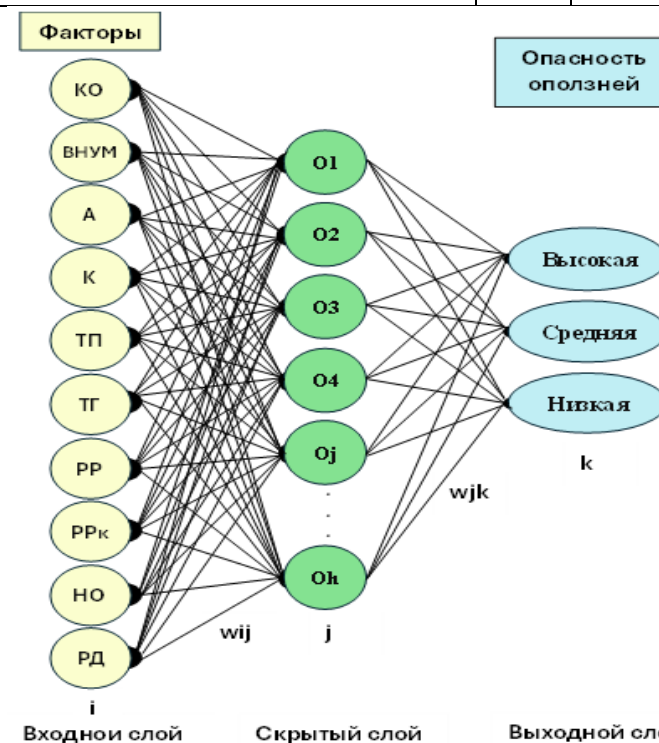


Рисунок 5 – Структура нейронной сети для прогнозирования оползневой опасности в массиве Сагуа-Баракоа

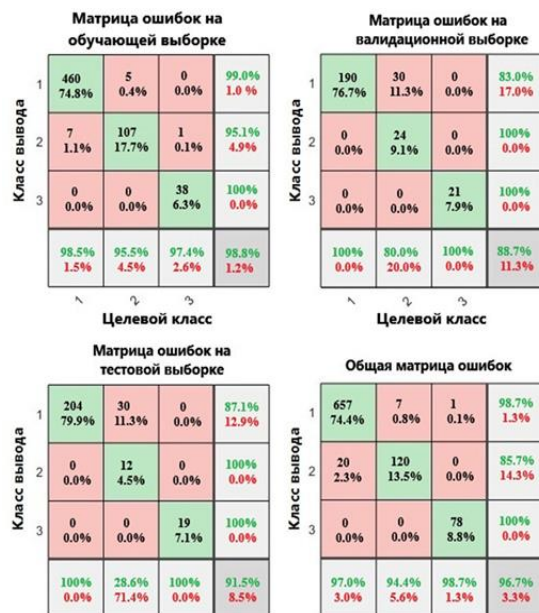


Рисунок 6 – Матрица ошибок для обучения и тестирования данных

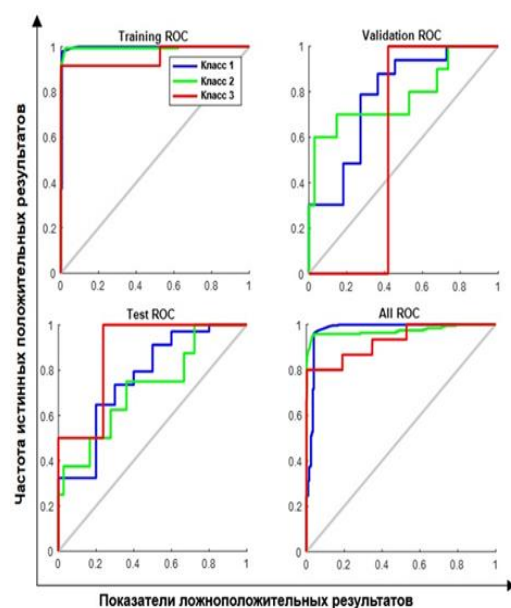


Рисунок 7 – Общий TPR в зависимости от количества оползней в скрытом слое и количества оползней на класс

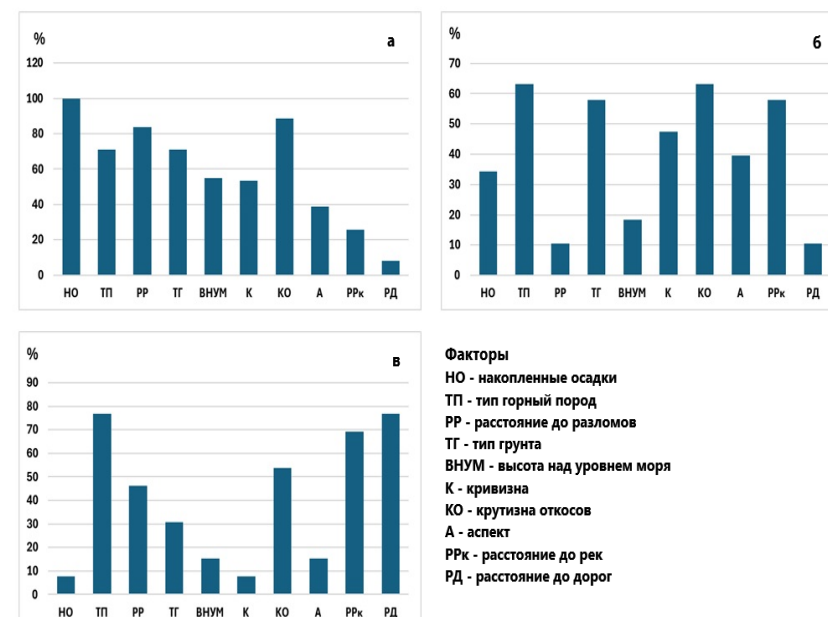


Рисунок 8 – Взаимосвязь между факторами и распределением оползней на открытых месторождениях полезных ископаемых с помощью ИНС

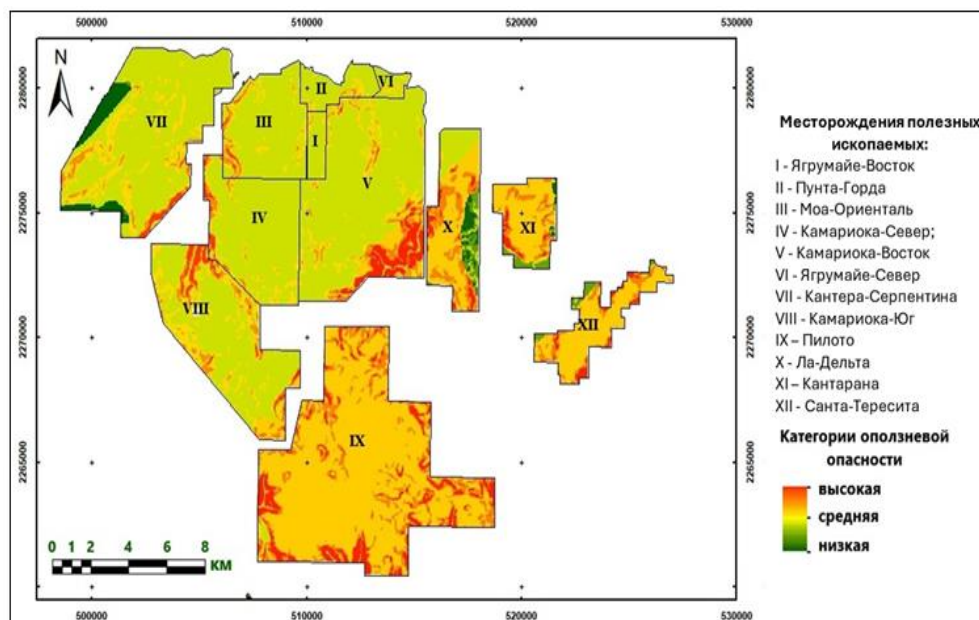


Рисунок 9 – Опасность оползней при вскрытых месторождениях никеля и кобальта в массиве Сауга-Баракоа

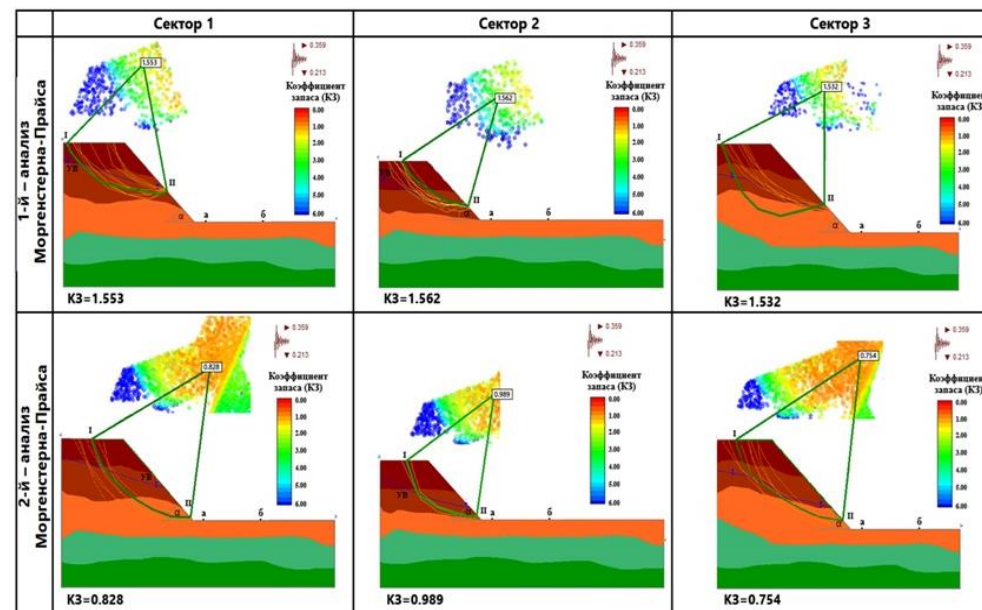


Рисунок 10 – Коэффициент запаса устойчивости (K3) для каждого сектора для двух вариантов нагружения. α – угол откоса; β – трещина растяжения; УВ – Уровень грунтовых вод; I-II – Наиболее вероятный сценарий разрушения