

ОТЗЫВ

**официального оппонента, д.г.-м.н., профессора кафедры инженерной геологии
Фоменко Игоря Константиновича на диссертацию Савон Васиано Юсмира на тему
«Применение региональной оценки оползневой опасности для прогноза устойчивости
откосов при вскрытии месторождений на территории горного массива Сагуа – Баракоа,
Куба», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр.**

1. Общие сведения о диссертации

Диссертация Савон Васиано Юсмира выполнена на тему «Применение региональной оценки оползневой опасности для прогноза устойчивости откосов при вскрытии месторождений на территории горного массива Сагуа – Баракоа, Куба» и по содержанию является законченным научным исследованием.

Цель работы - снижение геотехнических рисков, обеспечение безопасности и эффективности эксплуатации месторождений, а также адаптация горнотехнических решений к современной экологической и климатической обстановке.

Диссертационная работа логично построена, 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.

2. Актуальность темы исследования.

Открытая добыча полезных ископаемых сопровождается повышенным риском развития оползневых процессов, что представляет серьёзную угрозу для безопасного ведения горных работ. Особенно остро эта проблема проявляется в карьерах, расположенных в горных районах, таких как северо-восточная часть Кубы. Данный регион отличается сложным геологическим строением, крутым рельефом и наибольшими годовыми суммами осадков на территории страны, что значительно увеличивает вероятность возникновения оползней. Ожидаемое усиление экстремальных погодных явлений в тропических регионах — как по частоте их возникновения, так и по масштабам воздействия — особенно в Латинской Америке и Карибском бассейне, приводит к существенному увеличению вероятности оползневых процессов.

Современные исследования в области прикладной геологии и механики горных пород находят свое развитие в применении интегрированных подходов, включающих вероятностные методы моделирования и алгоритмы искусственного интеллекта. Эти инструменты позволяют эффективно обрабатывать большие массивы геотехнических данных, выявлять скрытые закономерности и формировать пространственно согласованные прогнозы вероятных оползней.

В данном контексте особое значение приобретают научные исследования, направленные на разработку методологии региональной оценки риска оползней с целью повышения

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-84 от 08.09.25
АУ УС

достоверности прогноза устойчивости склонов в геодинамически активных районах, таких как массив Сагуа-Баракоа.

Научная новизна работы и результаты работы.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в решении актуальной задачи повышения безопасности открытых горных работ путём разработки и внедрения передовых методов количественной оценки возникновения оползней. Предложен интегрированный подход, объединяющий методы машинного обучения — в частности, искусственные нейронные сети — с инструментами пространственного анализа для детального геолого-инженерного зонирования массива Сагуа-Баракоа на территории Кубы.

В рамках исследования были определены критические пороговые значения атмосферных осадков, провоцирующих оползневые процессы, что стало важным этапом в построении системы предупреждения. Разработана и апробирована прогностическая модель классификации оползневой опасности, демонстрирующая высокую точность даже в условиях ограниченного геотехнического мониторинга. Это значительно повысило качество оценки устойчивости склонов в исследуемом регионе.

Основной научный вклад работы состоит в создании и экспериментальной проверке инновационной методологии региональной оценки риска оползней, основанной на синтезе геологических данных, инженерно-геотехнических характеристик и алгоритмов искусственного интеллекта. Применение такого подхода впервые позволило получить достоверные количественные результаты для изучаемой территории, выявить зоны повышенного риска и заложить научную основу для разработки мероприятий по повышению геотехнической безопасности в горных регионах с аналогичными природными и климатическими условиями.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Основные результаты работы отражены в трех научных положениях, выносимых на защиту.

Первое научное положение: *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.*

Первое научное защищаемое положение обосновывается исходя из природных и техногенных условий региона, характеризующегося высокой оползнеопасностью. Обеспечение безопасной и устойчивой разработки месторождений в этих условиях требует предварительного анализа геологических и инженерно-геотехнических факторов, оказывающих влияние на формирование оползней.

Для реализации инженерно-геологического районирования была собрана, систематизирована и проанализирована обширная информация о параметрах окружающей среды. На основе данных кадастра оползней и с применением метода мультиномиальной

логистической регрессии проведена количественная оценка региональной оползневой опасности. Данный метод позволяет моделировать вероятность отнесения каждого пространственного элемента (пикселя) к определённой категории оползневой опасности — высокой, средней или низкой — с учётом значений независимых переменных.

Модель включала широкий спектр факторов: крутизну, высоту, кривизну и экспозицию склонов, тип горных пород, тип почв, расстояние до разломов, водоёмов и дорог, а также среднегодовое количество накопленных осадков. Эти переменные были проанализированы с точки зрения их статистической значимости и влияния на формирование оползней. Наиболее значимыми для прогноза оказались тип породы, высота местности, тип грунта, расстояние до разломов и уровень осадков. В частности, накопленные осадки оказались критическим фактором, резко снижающим вероятность отнесения участка к категориям средней и низкой опасности. Напротив, такие факторы, как экспозиция склона, кривизна, расстояние до рек и дорог, не продемонстрировали статистически значимого влияния.

На основе расчетных коэффициентов была построена карта инженерно-геологического районирования массива Сагуа-Баракоа, отражающая пространственное распределение зон по степени оползневой опасности. Адекватность полученной модели была проверена на основе сопоставления с фактическими данными инвентаризации оползней. Из 883 зарегистрированных оползней, 486 пришлось на зоны высокой опасности, 69 — на зоны средней опасности. Таким образом, 62 % всех оползней были предсказаны моделью в пределах зон с повышенной опасностью, что подтверждает её прогностическую состоятельность. Следует отметить, что 328 оползней попали в зоны низкой опасности, что указывает на возможность переоценки устойчивости отдельных участков. Данный результат может быть обусловлен тем, что некоторые оползни происходили в условиях, по совокупности факторов, приближенных к более опасным категориям.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает, что инженерно-геологическое районирование с использованием методов вероятностного анализа обеспечивает научно обоснованную оценку склоновой устойчивости. Это, в свою очередь, делает его необходимым элементом при проектировании технологии вскрытия месторождений открытым способом в сложных геодинамических условиях массива Сагуа-Баракоа.

Второе научное положение: *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.*

Для обоснования защищаемого положения применён метод, предложенный Стедингером, предназначенный для расчёта критических значений количества атмосферных осадков. Этот метод широко используется в гидрологических и инженерно-геологических исследованиях, особенно при анализе экстремальных осадков и их влияния на устойчивость склонов. Расчёт осуществляется по формуле, в которой критическое значение зависит от среднего значения

осадков, стандартного отклонения и критического коэффициента, определяемого размером выборки. Такой подход позволяет количественно оценить уровни осадков, способные инициировать оползневые процессы.

Для установления связи между критическими осадками и вероятностью возникновения оползней применён расчёт периода повторяемости, который показывает, как часто можно ожидать превышения определённого значения осадков. Установлено, что чем выше значение критических осадков, тем реже они встречаются, что соответствует увеличению периода возврата. Это позволяет классифицировать осадки по степени экстремальности и оценивать вероятность их возникновения в будущем.

Анализ метеорологических данных за 1992–2020 гг. по ряду станций (в том числе Джамаль, Пунта-де-Маиси, Паленке, Гуантанамо) выявил значительную межгодовую изменчивость количества осадков. Отмечены как особо засушливые, так и чрезвычайно дождливые периоды, причём в последние годы (2016–2020 гг.) зафиксировано увеличение частоты экстремальных осадков, особенно в восточных районах. Станция Джамаль продемонстрировала наивысшие значения критических осадков, что подтверждает её локализованную предрасположенность к сильным и частым дождям, тогда как станция Гуантанамо показала наименьшие значения, что указывает на менее экстремальные осадочные условия в данном районе.

Полученные критические значения осадков были проверены на примере — урагане «Мэтью», который в октябре 2016 года вызвал катастрофические погодные условия в северо-восточной части Кубы. Установлена прямая зависимость между величинами накопленных атмосферных осадков и вероятностью возникновения оползней. Метод расчёта критических значений осадков и последующая их верификация на реальных данных обеспечивают научную обоснованность второго положения. Следовательно, при вскрытии месторождений в рассматриваемом районе необходимо учитывать вероятностные характеристики осадков как главный фактор, влияющий на устойчивость склонов и безопасность горных работ.

Третье научное положение: *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.*

Третье научное защищаемое положение, раскрывается через поэтапное применение метода машинного обучения, начиная с построения архитектуры модели и заканчивая верификацией и сопоставлением с инженерными расчетами устойчивости склонов.

Архитектура нейронной сети была разработана с учетом задачи классификации участков открытых горных разработок по степени оползневой опасности. Для оценки точности модели была построена матрица ошибок, отражающая распределение правильных и ошибочных классификаций по каждому из классов опасности. На обучающем наборе данных модель

продемонстрировала высокую точность: 74,8 % оползней были правильно отнесены к категории «Высокая опасность», 22,1 % — к категории «Средняя опасность» и 1,5 % — к «Низкой опасности». Это говорит о высокой чувствительности модели к наиболее критичным зонам и подтверждает её пригодность для задач геотехнического прогнозирования.

Для оценки устойчивости модели применялись коэффициенты истинных положительных результатов (TPR), рассчитанные на обучающих, проверочных и тестовых выборках. Сходство значений TPR между выборками указывает на сбалансированность модели и отсутствие переобучения. Использование стратегии раннего завершения обучения позволило добиться надежных результатов без чрезмерной настройки параметров. Таким образом, нейронная сеть показала стабильность и воспроизводимость на всех этапах верификации.

Прогнозная модель была дополнительно использована для анализа факторов, влияющих на распределение 113 известных оползней на открытых месторождениях. Результаты показали, что категория «Высокая опасность» характеризуется совокупностью таких условий, как крутизна откосов более 22 градусов (88,7 % оползней), расположение на расстоянии менее 500 м от разломов (83,9 %), наличие сланцев и сильно деформированных пород, глинисто-суглинистых грунтов, а также наличие суточных осадков свыше 100 мм. Это подтверждает значимость выбранных признаков и адекватность обученной модели.

Анализ категорий «Средняя опасность» и «Низкая опасность» выявил градации по тем же признакам: умеренная крутизна склонов и менее интенсивные осадки — для средней опасности, а также пологие откосы и значительное удаление от геологических активных структур — для низкой. Эти различия подтверждают способность нейросети дифференцировать участки по уровню риска на основе анализа комплекса природных и инженерных факторов.

Прогнозная карта оползневой опасности, составленная на основе нейросетевого моделирования для 12 месторождений никеля и кобальта, показала, что большинство объектов относятся к зонам высокой и средней опасности. Это позволило целенаправленно провести инженерную проверку на одном из объектов — месторождении Камариока-Восток. Для оценки достоверности прогноза был выполнен расчет коэффициента запаса устойчивости откосов методом Моргенштерна–Прайса, основанным на предельном равновесии сил и моментов. Расчёты показали, что в сухих условиях все участки откосов демонстрируют стабильность ($K_3 > 1,5$). Однако в условиях повышенной влажности, соответствующих периоду обильных осадков, значения коэффициента запаса устойчивости значительно снижаются (до 0,828, 0,989 и 0,754), указывая на критическую неустойчивость склонов.

Эти результаты подтвердили, что зоны, отнесенные нейронной сетью к категории «Высокая опасность», действительно демонстрируют физико-механическую нестабильность в условиях насыщения водами. Таким образом, модель не только эффективно классифицирует территорию по уровню опасности, но и отражает фактические изменения устойчивости в зависимости от гидрологических условий.

В совокупности вышеуказанные этапы — обучение нейросети, анализ ключевых факторов, пространственное прогнозирование и инженерная верификация — доказывают научную обоснованность и практическую значимость использования искусственной нейронной сети для прогноза оползней на открытых месторождениях полезных ископаемых, что и составляет содержание третьего научного защищаемого положения.

4. Научные результаты, их ценность

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.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая и практическая значимость данного исследования заключается в установлении количественных закономерностей, характеризующих механизмы возникновения и развития оползней в пределах массива Сагуа-Баракоа. В частности, определены критические значения атмосферных осадков, способные инициировать оползневые процессы, что позволило обосновать причинно-следственные связи между климатическими и геодинамическими факторами. Полученные результаты обладают высокой степенью актуальности и могут быть экстраполированы на другие регионы Карибского бассейна, имеющие схожие геологические и климатические условия. Разработанные в рамках исследования прогностические модели прошли апробацию в условиях производственного процесса — в горнодобывающей компании UEB "EXPLOMAT", где они применяются для оценки геотехнических рисков при проведении текущих и планируемых горных работ, демонстрируя тем самым свою прикладную эффективность и практическую значимость. Кроме того, результаты исследования имеют образовательное значение. Разработанные методические и аналитические материалы могут быть включены в учебные программы и исследовательскую базу ряда кубинских университетов, что способствует подготовке квалифицированных специалистов в области управления геологическими рисками, охраны окружающей среды и устойчивого использования земельных ресурсов.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты инженерно-геологического районирования по степени оползневой опасности, выполненного с применением мультиномиальной логистической регрессии, целесообразно использовать при планировании и проектировании открытых горных работ на территории массива Сагуа-Баракоа и тропических регионах со схожими инженерно-геологическими характеристиками. Методика расчёта критических значений атмосферных осадков по Стединггеру может быть интегрирована в системы мониторинга для заблаговременного

предупреждения оползневых процессов. Разработанная модель прогнозирования оползневой опасности на основе искусственных нейронных сетей рекомендуется к применению для оперативной оценки устойчивости откосов в районах действующих и проектируемых карьеров, а также при разработке программ инженерной защиты территорий. Полученные результаты могут быть использованы органами геологоразведки, проектными организациями и в учебном процессе вузов по направлениям «Инженерная геология», «Геологические риски» и «Безопасность в горном производстве».

7. Оценка содержания диссертации, её завершенности

Рассматриваемая диссертация представляет собой законченное исследование, выполненное автором самостоятельно, в котором методологически четко пройдены все необходимые шаги – от постановки проблемы до ее решения, результатом которого и является представленная диссертационная работа.

8. Замечания и вопросы по работе

В целом, представленная кандидатская диссертация заслуживает самой высокой оценки. В то же время, при несомненной структурной целостности работы, она вызывает ряд вопросов преимущественно редакционного характера:

1. В работе встречаются отдельные опечатки и неточности, вероятно связанные со сложностью перевода иностранных источников, например на рис. 2.16 и 2.17 в качестве типа гравитационного процесса указан обвал, однако на рис. 2.16 это больше похоже на камнепад, а на рис. 2.17 – на блоки опрокидывания.

2. Первое научное положение относится к инженерно-геологической типизации массива Сагуа-Баракоа по уровню оползневой опасности. Факторами, выбранными для зонирования этой опасности, являются осадки, угол наклона, высота склона, расстояние до рек, тип почвы, тип горной породы, расстояние до разломов и расстояние до дорог. Однако в диссертационной работе не были рассмотрены факторы динамического воздействия, такие как землетрясения и вибрации от взрывных работ. Стоит отметить, что сейсмичность достаточно подробно рассмотрена в п. 2.7.3 диссертационной работы, однако при оценке интенсивности не указан период повторяемости землетрясений.

Так же из работы не совсем понятно как устанавливались границы между зонами с различной оползневой опасностью, на основе каких критериев? Этот вопрос тем более актуален, так как из 883 зарегистрированных оползней, в зону со средней оползневой опасностью попало только 69 оползней, тогда как в зону с низкой оползневой опасностью – 328 оползней. Было бы наглядней оперировать не абсолютным количеством оползней в зоне, а их плотностью.

3. В исследовании устанавливаются критические значения осадков для различных периодов повторяемости. Ряд вопросов вызывает рис. 4.4 «Оценка критических значений осадков для возникновения оползней» и сделанные на его основе выводы. В частности, из рис. 4.4 следует, что при ежедневном уровне осадков близком к 0, вероятность активизации оползней близка к 100%.

Так же вызывает сомнение следующее утверждение (стр. 110): «По мере увеличения периода возврата критические значения осадков увеличиваются, что указывает на то, что в будущем экстремальные осадки будут происходить реже».

4. В п. 4.4 «Валидация прогноза на месторождении никеля и кобальта Камариока – Восток» приводятся расчеты устойчивости откосов на карьерной дороге. Так как откос сложен скальными грунтами различной степени выветрелости, требует уточнения ряд вопросов:

- учитывалась ли при расчетах трещиноватость скального массива и, если учитывалась, то каким образом?

- как учитывался масштабный эффект при переходе от прочности в образце к прочности в массиве?

- как определялась величина и направление (вверх или вниз) вертикальной составляющей сейсмического воздействия?

Вышеприведенные замечания носят рекомендательный характер, не снижают научной значимости диссертационной работы.

9. Соответствие автореферата содержанию диссертации

Автореферат по форме, объему и оформлению соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ. Содержание автореферата в целом соответствует содержанию диссертационной работы. Основные материалы диссертационной работы, аргументация защищаемых положений и выводы в полной мере отражены в автореферате.

10. Заключение по диссертационной работе

Новые результаты, полученные Савон Васиано Юсмира, имеют существенное научно-практическое значение.

Работа выполнена автором самостоятельно на актуальную тему, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты. Для достижения поставленной цели сформулированы задачи исследований и выбрана методология их решения. Защищаемые положения в достаточной степени аргументированы, и основываются на прочном теоретическом базисе и качественном фактическом материале, полученном лично автором либо при его участии. Выводы обоснованы и отличаются научной новизной, практической ценностью и достоверностью, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Таким образом, диссертация «Применение региональной оценки оползневой опасности для прогноза устойчивости откосов при вскрытии месторождений на территории горного массива Сагуа – Баракоа, Куба», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.3 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр, соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Горного университета от

20.05.2021 № 953 адм., а ее автор – Савон Васиано Юсмира – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.3 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры инженерной геологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», д-р геол.-минерал. наук

Фоменко Игорь Константинович

leg 02.03.25

Подпись Фоменко Игоря Константиновича заверяю

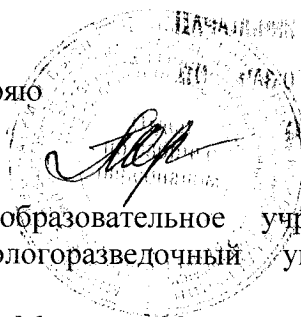
Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»

Почтовый адрес: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая д. 23

Официальный сайт в сети Интернет: <https://mgri.ru/>

Эл. почта: fomenkoik@mgri.ru . Телефон: +7 (495) 255-15-10.



02.03.2025