

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ
(МГРИ)**

на правах рукописи



ЗЫОНГ ВАН БИНЬ

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

Специальность 1.6.7 – инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва, 2023 г.

Работа выполнена на кафедре инженерной геологии ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель: **Фоменко Игорь Константинович**
Доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры инженерной геологии
гидрогеологического факультета МГРИ

Официальные оппоненты: **Стром Александр Леонидович**
доктор геолого-минералогических наук,
главный специалист филиала АО «Институт
Гидропроект» – ЦСГНЭО

Барыкина Ольга Сергеевна
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры инженерной и экологической
геологии геологического факультета
Московского Государственного Университета
имени М. В. Ломоносова

Ведущая организация: ФГБОУ ВО "Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный университет"
(НИУ МГСУ). Кафедра инженерных
изысканий и геоэкологии

Защита диссертации состоится «22» июня 2023 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.364.01 при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационных советов (ауд. 473).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке МГРИ и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, <http://mgri.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета 24.2.364.01 к.г.-м.н., доцент

Горобцов Д.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Степень разработанности

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

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

Основные задачи исследований:

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

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

Фактический материал

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

Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие в полевых работах и дешифрировании данных дистанционного зондирования, картировании и

инвентаризация оползней, определении и анализе факторов оползнеобразования с оценкой их значимости. Лично автором построены все модели и выполнен комплексный анализ оползневой опасности на региональном, локальном и элементарном уровнях организации ПТС.

Научная и методическая новизна работы:

1. Определена значимость основных факторов оползнеобразования на развитие оползневого процесса.
2. Разработан и апробирован алгоритм поэтапной оценки оползневой опасности с учетом уровня иерархии ПТС.
3. Модернизирована классификационная схема методов оценки оползневой опасности.
4. Доказана большая достоверность количественных статистических методов в сравнении с полуколичественным мультикритериальным подходом при оценке оползневой опасности.
5. Выявлено влияние разрешающей способности цифровой модели рельефа и корректности выбора факторов оползнеобразования на результаты оценки оползневой опасности.
6. Впервые (на примере оценки оползневой опасности коммуны Чунгчай) удалось оценить динамику изменение площади неустойчивой зоны в зависимости от длительности ливневых осадков, в том числе с учетом интенсивности сейсмического воздействия.
7. Продемонстрирована целесообразность выполнения вероятностного анализа и определение индекса надежности при оценке оползневой опасности ПТС элементарного уровня.
8. Оценена значимость влияния на результаты моделирования устойчивости склонов численным методом плотности конечноэлементной сетки.

Теоретическая и практическая значимость работы

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

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

Методы исследования

Методы исследования включают анализ и обобщение общемирового опыта оценки оползневой опасности, а также применение современных программных продуктов и методик для решения поставленных задач. При оценке оползневой опасности ПТС регионального уровня были использованы современные методы

статистического и мультикритериального анализа с применением геоинформационной системы ArcGIS. При оценке оползневой опасности ПТС локального уровня были использованы программные комплексы Scoops3D и ArcGIS. Математическое моделирование при оценке оползневой опасности на элементарном уровне было выполнено методами предельного равновесия и конечных элементов в плоской и объемной постановке задачи посредством расчёта устойчивости склона с использованием программного комплекса Rocscience (Slide 2, Slide 3, RS 2, RS 3).

Защищаемые положения

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

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

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

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

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

Научная апробация и публикации

Основные результаты настоящей работы были представлены на следующих конференциях:

- XV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». (Москва, 01–02 апреля 2021 г.). Тема доклада: Анализ влияния

изменения порового давления в период ливневых осадков на устойчивость склона (на примере оползня в микрорайоне Као Тханг города Халонг, Вьетнам).

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

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

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

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

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

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

Структура и объём работы

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

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, д.г-м.н., Фоменко И.К., который поддерживал автора на протяжении всего процесса работы над диссертацией. Правильная ориентация и полезные идеи научного руководителя помогли автору сформулировать научные взгляды, выбрать соответствующее направление исследований, разработать методологию для решения поставленных задач и предложить направления будущих исследований. Автор выражает благодарность д.г-м.н., профессору Ярз Л.А. за ценные комментарии при завершении диссертации. Автор также хотел бы поблагодарить старшего научного сотрудника кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ Сироткину О.Н. за поддержку в завершении диссертации. Кроме того, автор хотел бы поблагодарить весь профессорско-преподавательский состав кафедры инженерной геологии МГРИ за их ценные замечания при завершении этой работы. Автор также благодарен Институту

геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий и Вьетнамскому институту геонаук и минеральных ресурсов за их помощь в сборе материалов для диссертации. Наконец, автор выражает благодарность моей жене и всей семье за их одобрение и поддержку в процессе работы над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Научно-понятийная база оценки оползневой опасности

Для получения полного представления об оползневом процессе необходим синтез различных знаний. Без всестороннего понимания причин развития оползней прогноз оползневой опасности невозможен.

Объектом исследования при оценке оползневой опасности является оползневой процесс.

Оползневая опасность определяется как вероятность развития оползневого процесса.

При оценке опасности оползневой процесс целесообразно рассматривать как компонент природно-технической системы.

Подход к оценке оползневой опасности для ПТС различных иерархических уровней будет различен. Таким образом, иерархический уровень ПТС должен определять методику оценки и прогноза оползневой опасности. На Рисунок 1 приведена иерархическая структура ПТС для оценки оползневой опасности района Шапа провинции Лаокай.



Рисунок 1 – Иерархическая структура ПТС оценки оползневой опасности (на примере района Шапа провинции Лаокай)

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

Глава 2. Условия и причины, определяющие развитие оползневого процесса в районе Шапа

Главной задачей при проведении анализа оползневой опасности является определение условий оползнеобразования, под которыми следует понимать всю совокупность природных и антропогенных факторов, нарушающих равновесие масс грунтов. Для каждой территории набор таких условий может существенно отличаться.

На основе опыта региональных оценок оползневой опасности территории Вьетнама, для исследуемого района Шапа, в качестве «основных» были выбраны следующие факторы-условия: климатические условия; гидрография; геоморфологические условия; растительный покров; техногенные воздействия; особенности геологического строения; структурно-тектонические особенности; сейсмическая активность; особенности гидрогеологических условий; современные экзогенные геологические процессы.

Их анализ позволил выявить следующие закономерности:

- периоды образования и активизации оползней совпадают с периодами дождей;
- большинство оползней (68,46% от общего количества) произошло в пределах расстояния 400 м от эрозионной сети;
- большинство оползней происходило в районах с высотой над уровнем моря не более 1700 м (88,47%), выше отметки 2000 м над уровнем моря оползни практически отсутствуют;
- оползни происходили в основном в районах с крутизной склонов от 20° до 40° (61,54%), на зоны с крутизной склонов менее 20° приходится 26,15% от общего количества оползней;
- оползни происходят главным образом на склонах восточной, юго-восточной и южной экспозиции (47%) и сосредоточены в районах с вертикальным расчленением рельефа менее 520 м/км² (78,46%);
- наибольшая плотность оползней наблюдается на застроенных территориях, 72,31% от всех оползней произошло в пределах 200 м от дорог.
- большинство оползней произошло в районах, сложенных геологическими комплексами По Сен и Йе Йен Сун (75,38%);
- оползневой процесс наиболее активен на расстоянии до 1000 м от зон разломов, а приуроченные к зонам разломов землетрясения интенсивностью порядка VII-VIII баллов (по шкале MSK) стали причиной развития оползневого процесса;
- обводненность скальных массивов мало влияет на развитие оползневого процесса в элювиально-делювиальных отложениях, наличие воды в которых определяется главным образом атмосферными осадками;
- большинство оползней связано с сиаферритной корой выветривания (82,31%);
- эрозия определяет горизонтальную расчлененность рельефа и, в перспективе, способствует активизации оползневых процессов.

Таким образом, условия района исследования способствуют образованию и развитию оползней.

Глава 3 Методы оценки оползневой опасности

Существующие в настоящее время методы оценки оползневой опасности можно классифицировать на прямые и косвенные, качественные и количественные. Классификационная схема методов оценки оползневой опасности (на основе исследования Шано (2020 г.) с изменениями автора), приведена на Рисунок 2.

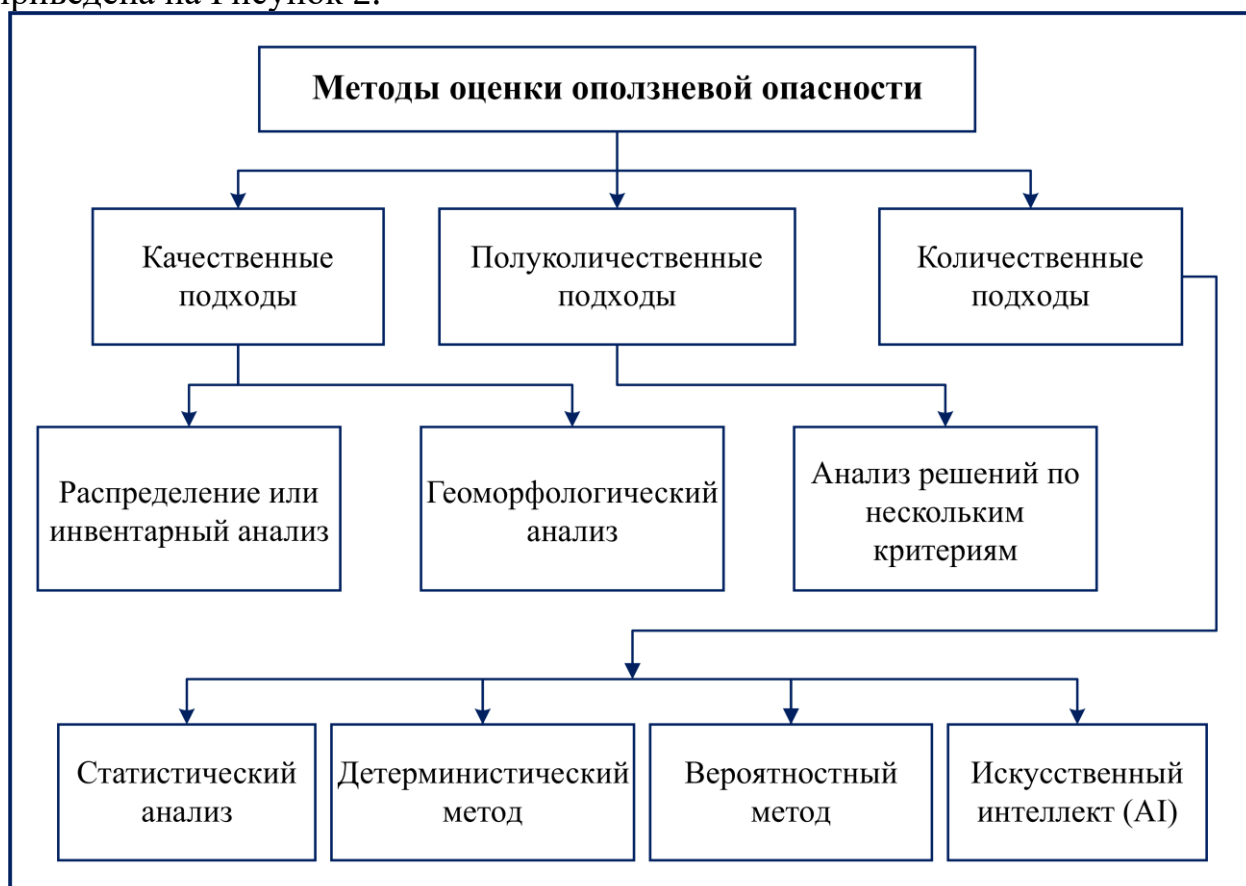


Рисунок 2 – Методы оценки оползневой опасности

При выборе наиболее эффективного метода следует учитывать несколько аспектов:

1. Выбор метода следует основывать на доступных данных и масштабе анализа. Рекомендуется избегать использования несовместимых с масштабом исследования методов и данных.

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

3. Не рекомендуется использовать фактические данные, не связанные с развитием оползневого процесса.

4. Многие методы оценки оползневой опасности основаны на постоянстве принципа актуализма. Однако, факторы-условия, вызвавшие оползни в прошлом, со временем меняются и эти изменения необходимо учитывать.

Вышеизложенное позволяет сформулировать первое защищаемое положение:

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

Глава 4. Оценка оползневой опасности ПТС регионального уровня (район Шапа провинции Лаокай)

На примере района Шапа провинции Лаокай (северо-запад Вьетнама) апробирована методика оценки оползневой опасности ПТС регионального уровня с использованием ГИС, базирующаяся на совместном анализе результатов комплекса статистических методов (частотного анализа (FR), статистического индекса (SI), анализа оползневой восприимчивости (LSA)).

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

Результат анализа FR (Рисунок 3) показал, что зоны с очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой оползневой опасностью составляют: 21,02; 22,26; 20,39; 16,36 и 19,97 % площади изученной территории, соответственно. В результате анализа LSA (Рисунок 4) оценка показала, что 25,01; 20,95; 17,16; 19,52 и 17,37 % площади района исследования находится в зонах очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой оползневой опасности, соответственно. По результатам анализа SI (Рисунок 5) зоны очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой оползневой опасности составляют: 19,26; 18,54; 24,14; 19,33 и 18,73 % площади территории работ.

Анализ AUC ROC (площадь под кривой ошибок, Рисунок 6) показал высокую результативность всех трех используемых моделей, превышающую 75%. При этом наиболее точные результаты были получены с помощью SI модели.

В настоящем исследовании изучалось влияние пространственного разрешения цифровой модели рельефа (ЦМР) на достоверность оценки оползневой опасности в Шапе провинции Лаокай. Для решения поставленной задачи был использован модифицированный метод анализа иерархий (МАНР) при двух разных разрешениях ЦМР - 30 м (МАНР30) и 10 м (МАНР10).

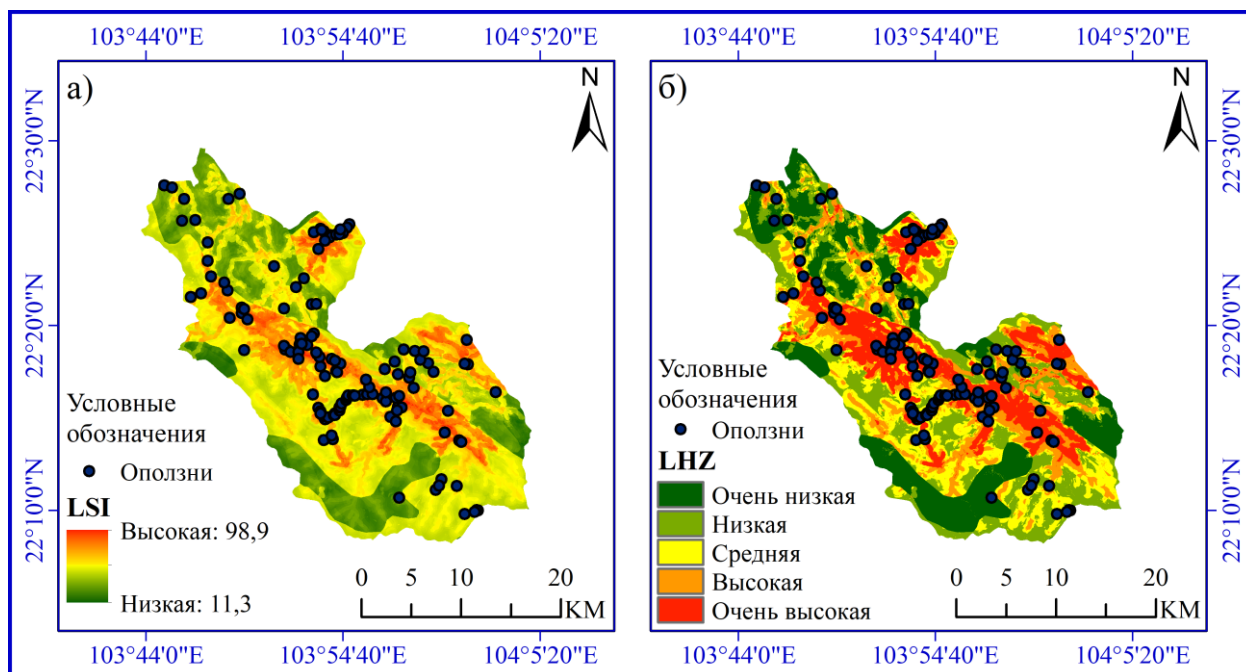


Рисунок 3 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением метода соотношения частотностей

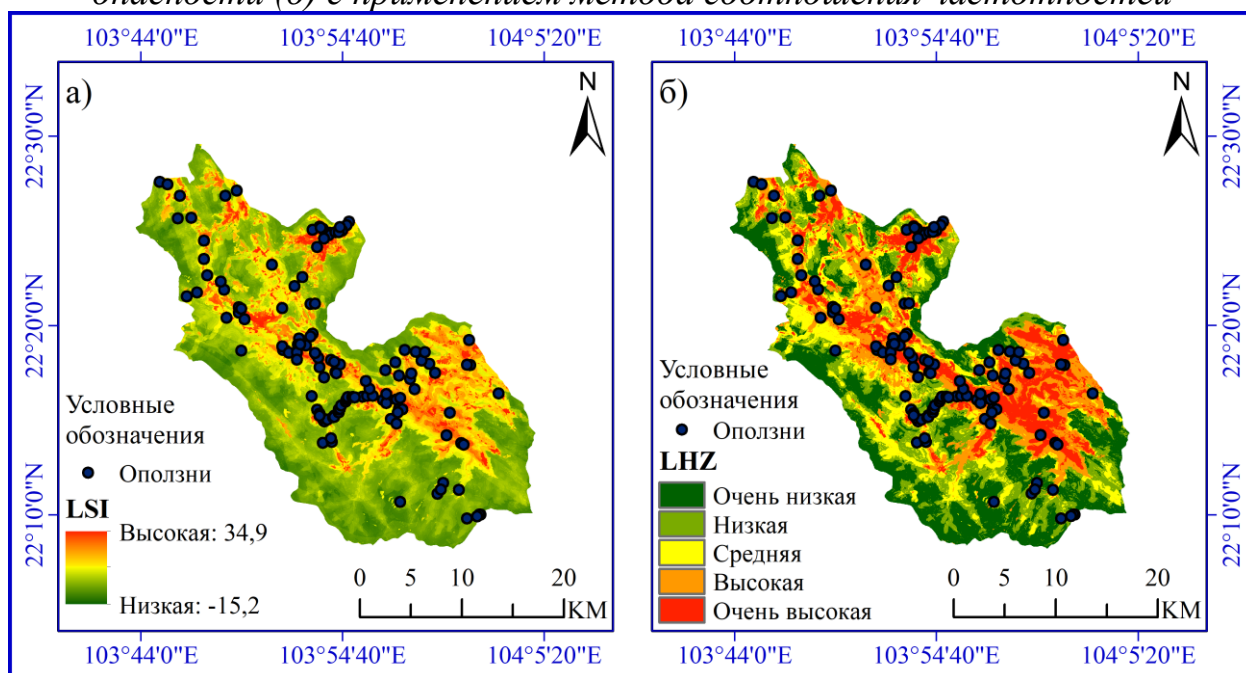


Рисунок 4 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением метода анализа оползневой восприимчивости

Выполненный анализ показал, что для зоны с очень высокой опасностью модель МАНР10 является более достоверной в сравнении с моделью МАНР30. Аналогичные результаты получены и для зоны с очень низкой опасностью.

AUC ROC (площадь под кривой ошибок) анализ так же показал, что при использовании ЦМР более высокого разрешения, достоверность модели увеличивается и таким образом можно сделать вывод, что качество оценки оползневой опасности имеет прямую корреляцию с пространственным разрешением цифровой модели рельефа (Рисунок 7).

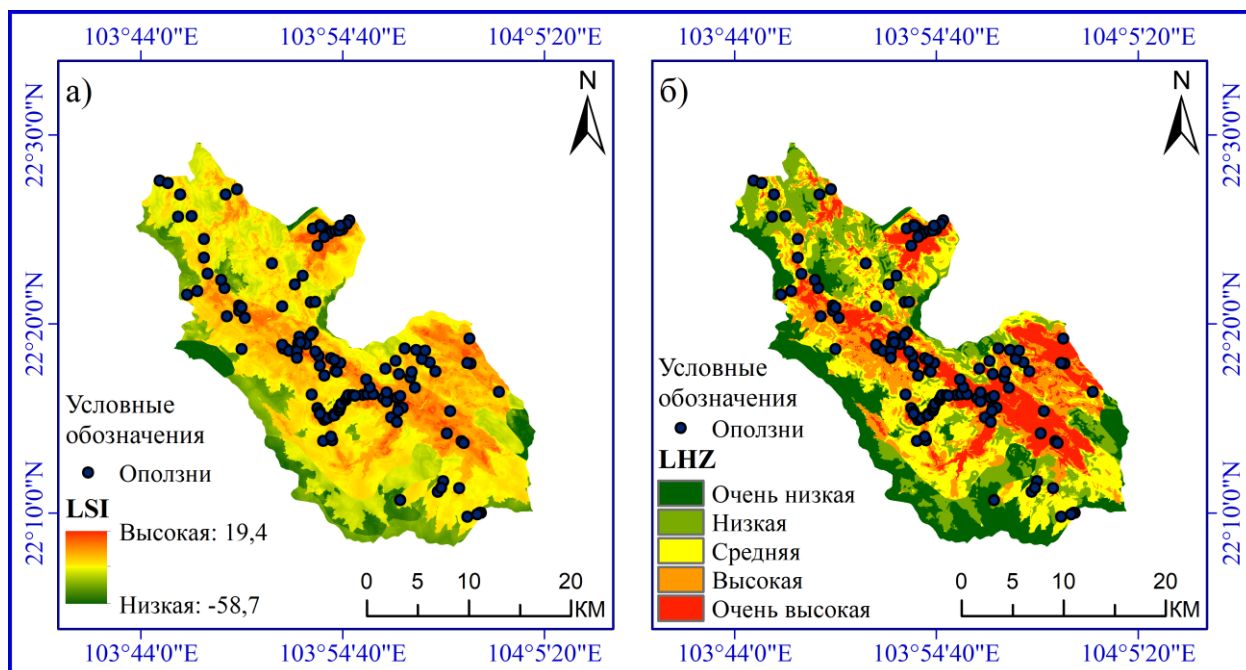


Рисунок 5 – Карта оползневой восприимчивости (а), карта оползневой опасности (б) с применением метода статистического индекса

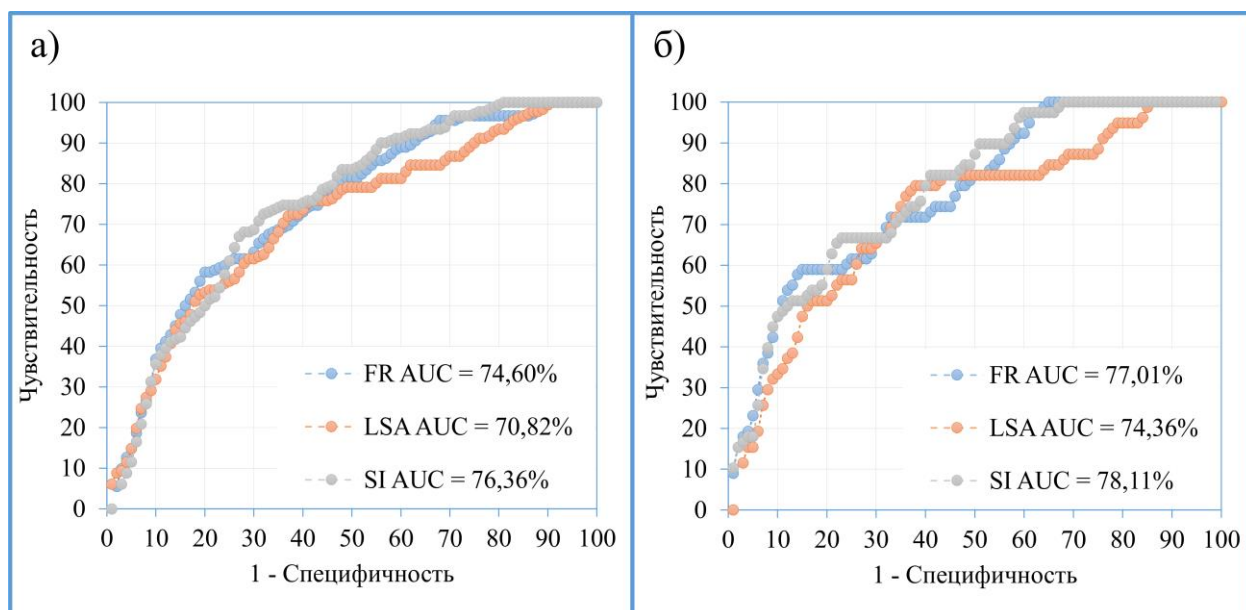


Рисунок 6 – Кривая успеха (а) и прогнозирования (б) моделей FR, LSA и SI

Вышеизложенное позволяет сформулировать второе защищаемое положение:

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

оползневой опасности с картой инвентаризации оползней.

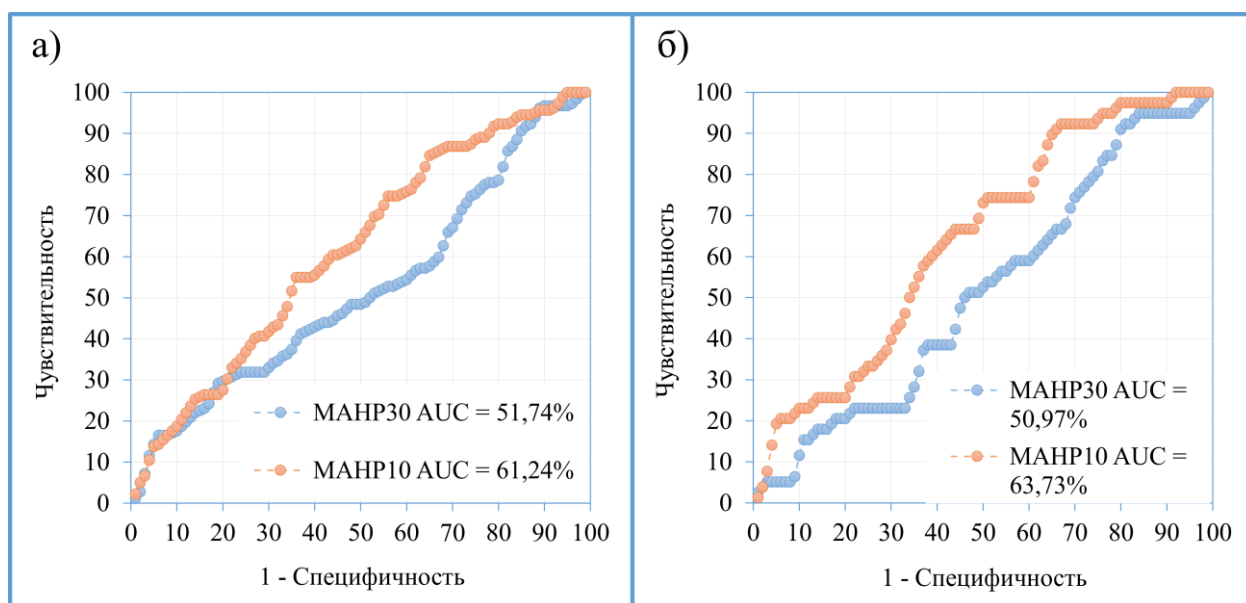


Рисунок 7 – Кривая успеха (а) и прогнозирования (б) моделей МАНР30 и МАНР10 по кривой ROC

Глава 5. Оценка оползневой опасности ПТС локального уровня (коммуна Чунгчай района Шапа)

Для оценки оползневой опасности территории коммуны Чунгчай было выполнено моделирование устойчивости склонов в Scoops3D, с последующим анализом результатов в геоинформационной системе ArcGIS. Достоверность модели Scoops3D была оценена путем сравнения полученных результатов с картой инвентаризации оползней с использованием расчета индекса подтверждения $\% LR_{class}$.

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

Вариант расчета 1 (без влияния осадков и без учета сейсмического воздействия)

При оценке устойчивости склонов в сухой период (Рисунок 8а) на карте выделяются два типа участков - среднеустойчивые (средний уровень оползневой опасности), занимают 8,8% площади и устойчивые (низкий уровень оползневой опасности) – занимают 91,2% территории исследования.

Вариант 2 (без учета сейсмического воздействия, но с фактическим количеством осадков за 16 часов)

Для периода интенсивных осадков (Рисунок 8б) выделяют четыре типа: неустойчивые (критический уровень оползневой опасности), занимают 18,12% площади, квазиустойчивые (высокий уровень оползневой опасности), занимают

15,04%, среднеустойчивые (средний уровень оползневой опасности), занимают 11,92% и устойчивые (низкий уровень оползневой опасности), занимают 54,92% площади. Таким образом, результаты моделирования доказали тезис о том, что интенсивные осадки увеличивают опасность возникновения оползней.

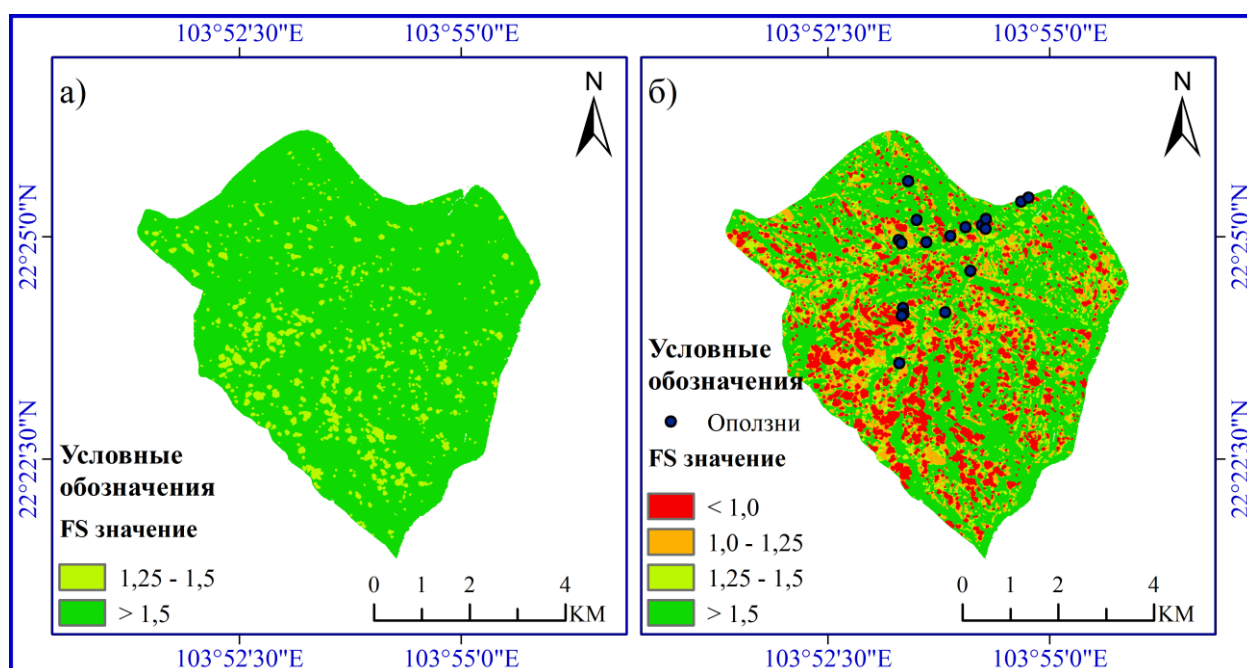


Рисунок 8 – Карты оползневой опасности,
(а) в сухом сезоне и (б) под влиянием осадков

Результаты оценки $\%LR_{class}$ демонстрируют достоверность модели Scoops3D с вероятностью $> 64\%$, что может считаться удовлетворительным результатом.

Вариант расчета 3 (учет сейсмического воздействия без влияния осадков)

Учет сейсмического воздействия на возникновение и активизацию оползней в районе исследований был выполнен с использованием значений коэффициента сейсмичности (k_{eq}) в диапазоне от 0,025 до 0,2 (Рисунок 9).

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

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

В результате моделирования синергетического эффекта от совместного сейсмического воздействия (k_{eq}) в диапазоне от 0,025 до 0,2 и осадков были получены четыре карты оползневой опасности (Рисунок 10). Анализ полученных результатов показал, что площадь неустойчивой зоны закономерно увеличивается.

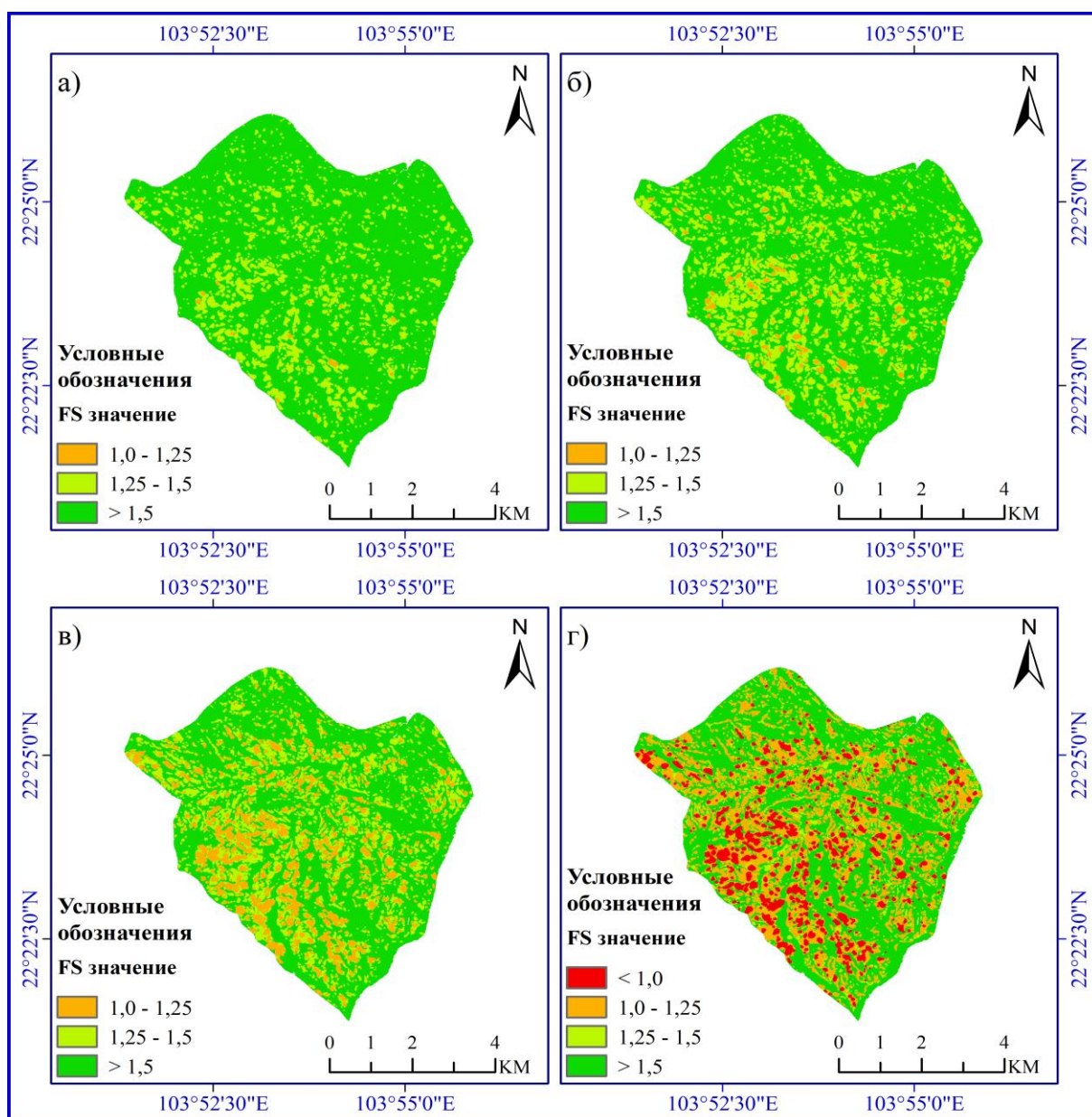


Рисунок 9 – Карты оползневой опасности с учетом сейсмического воздействия
(а) $k_{eq} = 0,025$, (б) $k_{eq} = 0,05$, (в) $k_{eq} = 0,1$, (г) $k_{eq} = 0,2$

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

Для оценки влияния длительных интенсивных осадков был взят «экстремальный случай» обильных ливней, прошедших в провинции Лаокай 31 мая 2020. Анализ полученных результатов показал, что зона с критическим уровнем оползневой опасности ($FS < 1$) может возникнуть через час после начала интенсивных ливневых дождей (Рисунок 11а). При этом она будет линейно увеличиваться с течением времени, достигнув 15,8% от площади территории через 24 часа (Рисунок 11б).

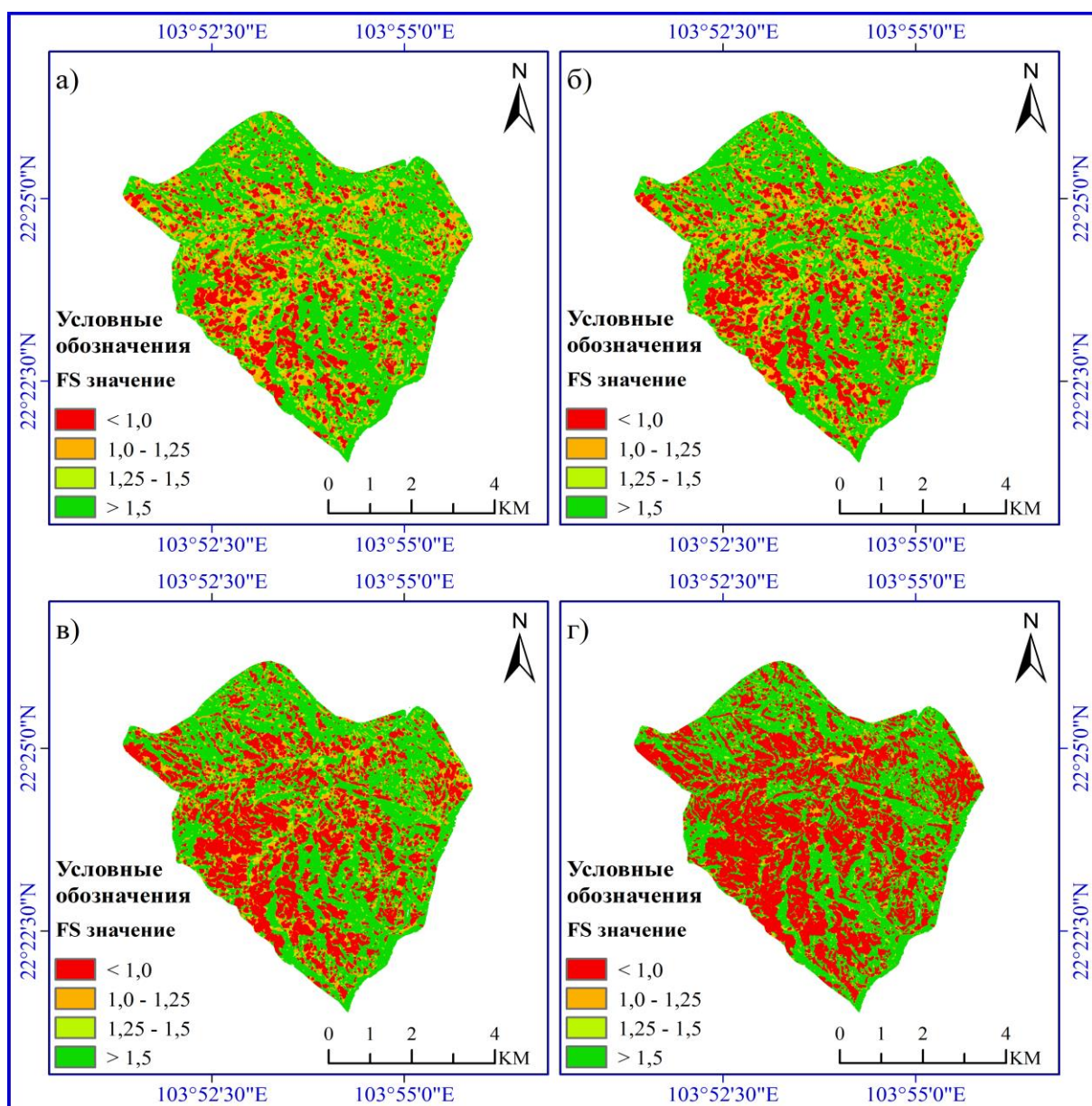


Рисунок 10 – Карты оползневой опасности с учетом совместного воздействия землетрясений и осадков

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

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

В данном варианте расчета было оценено совместное влияние сейсмического воздействия и интенсивных ливневых осадков (с учетом их продолжительности) на уровень оползневой опасности. Результаты моделирования с учетом продолжительности дождя 24 часа ($t = 24ч$) для землетрясений интенсивностью 6, 7, 8 и 9 баллов показаны на картах оползневой опасности (Рисунок 12а, б, в, г, соответственно).

Следует отметить более высокий градиент прироста площади с критическим уровнем оползневой опасности при уровне сейсмического воздействия интенсивностью в 6 и 7 баллов (10,56% и 11,14% соответственно), в сравнении с 8 и 9 бальными землетрясениями (7,97% и 2,44% соответственно).

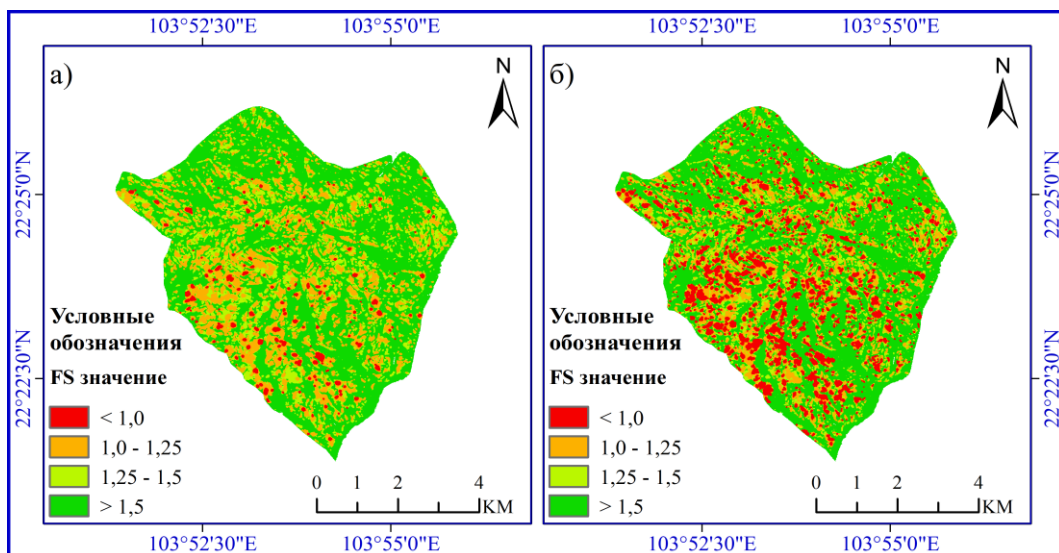


Рисунок 11 – Карты оползневой опасности
(а) $t = 1ч$ и (б) $t = 24ч$

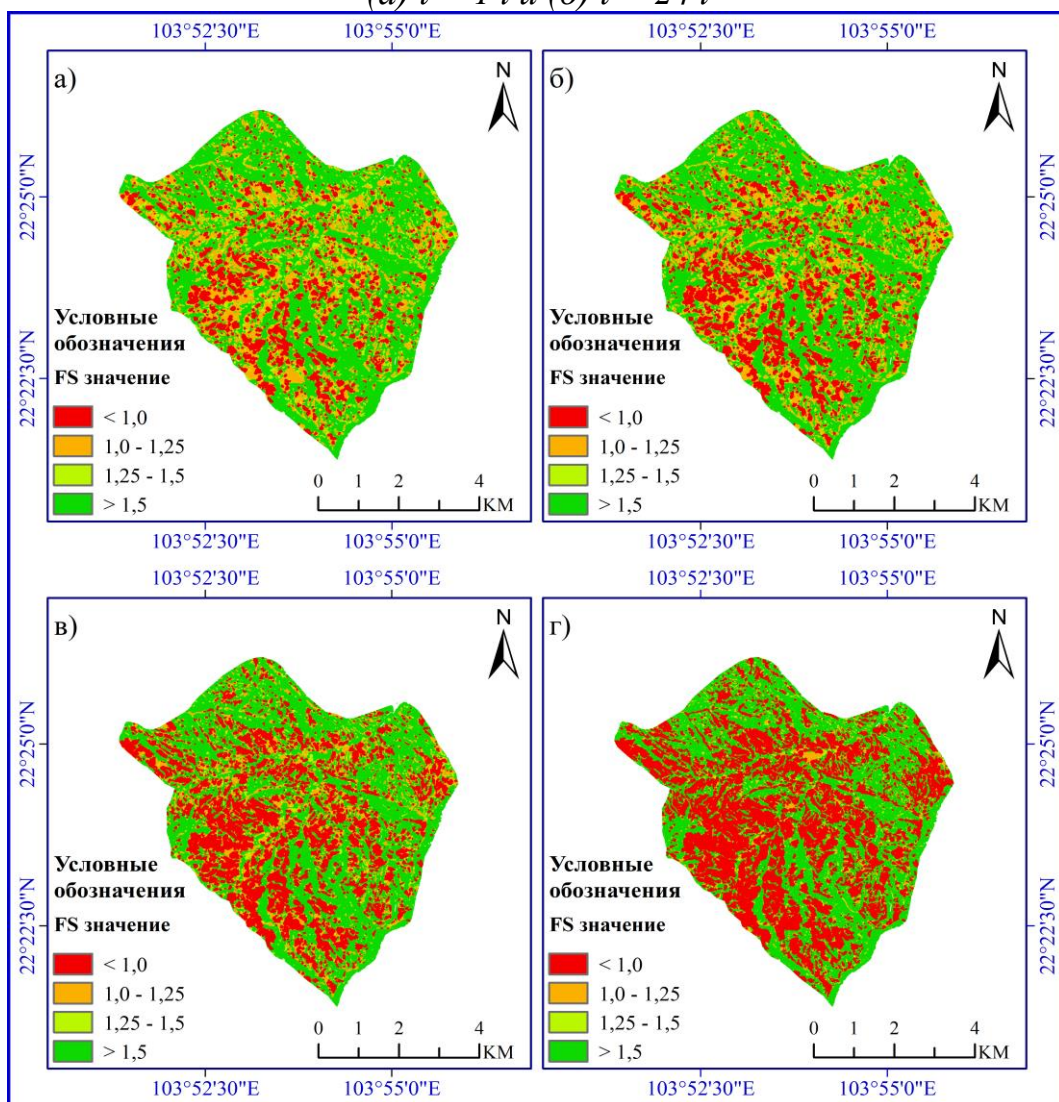


Рисунок 12 – Карты оползневой опасности
(а) $k_{eq} = 0,025$, (б) $k_{eq} = 0,05$, (в) $k_{eq} = 0,1$, (г) $k_{eq} = 0,2$

Вышеизложенное позволяет сформулировать третье защищаемое положение:

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

Глава 6. Оценка оползневой опасности ПТС элементарного уровня (оползневой склон в коммуне Чунгчай)

Для оценки оползневой опасности ПТС элементарного уровня на основе комплекса методов предельного равновесия и конечных элементов как в плоской так и в объемной постановке задачи, были выполнены обратные расчеты устойчивости оползня в коммуне Чунгчай района Шапа.

Результаты 3D расчета устойчивости склона методом предельного равновесия (МПР)

Анализ полученных результатов показал, что в «сухой» период склон является устойчивым, FS составляет 1,258 и 1,178 при вероятностном и детерминистическом анализе соответственно (Рисунок 13).

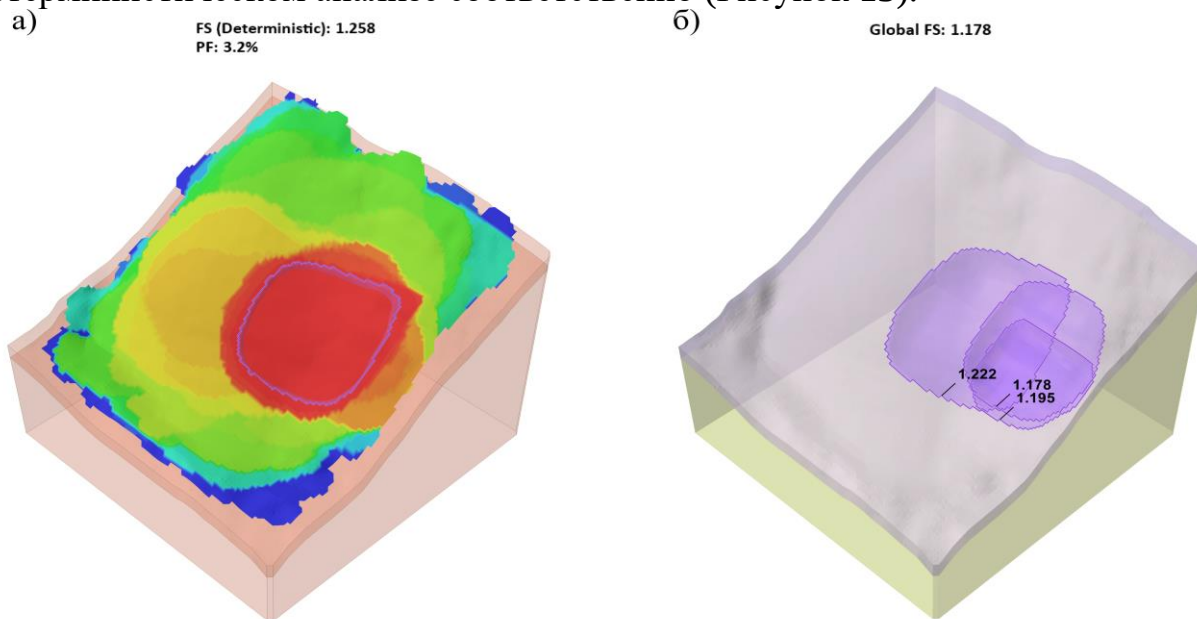


Рисунок 13 – Результат расчета устойчивости склона в «сухой» период: а) карта устойчивости склона; б) положение возможных поверхностей скольжения, полученных в процессе мультимодальной оптимизации PSO

Вероятность активизации оползневого процесса (PF) составляет 3,2%. При $PF > 2,3\%$ уровень надежности системы оценивается как опасный. Поэтому, несмотря на тот факт, что моделируемый склон в «сухой» период является устойчивым, уровень надежности ПТС к развитию оползневого процесса следует оценивать как опасный. В процессе интенсивных ливневых осадков, за счет инфильтрации воды в грунт, будет происходить увеличение порового давления, что, как следствие, приведет к снижению коэффициента устойчивости

склона.

При увеличении коэффициента порового давления (R_u) от 0 до 0,144 (на момент времени 10ч 31 мая, 2020г.), FS уменьшается с 1,258 до 0,995 при вероятностном анализе и с 1,178 до 0,954 при детерминистическом расчете. Вероятность активизации оползневой процесса (PF) при этом увеличивается с 3,2 до 50,4%. (Рисунок 14).

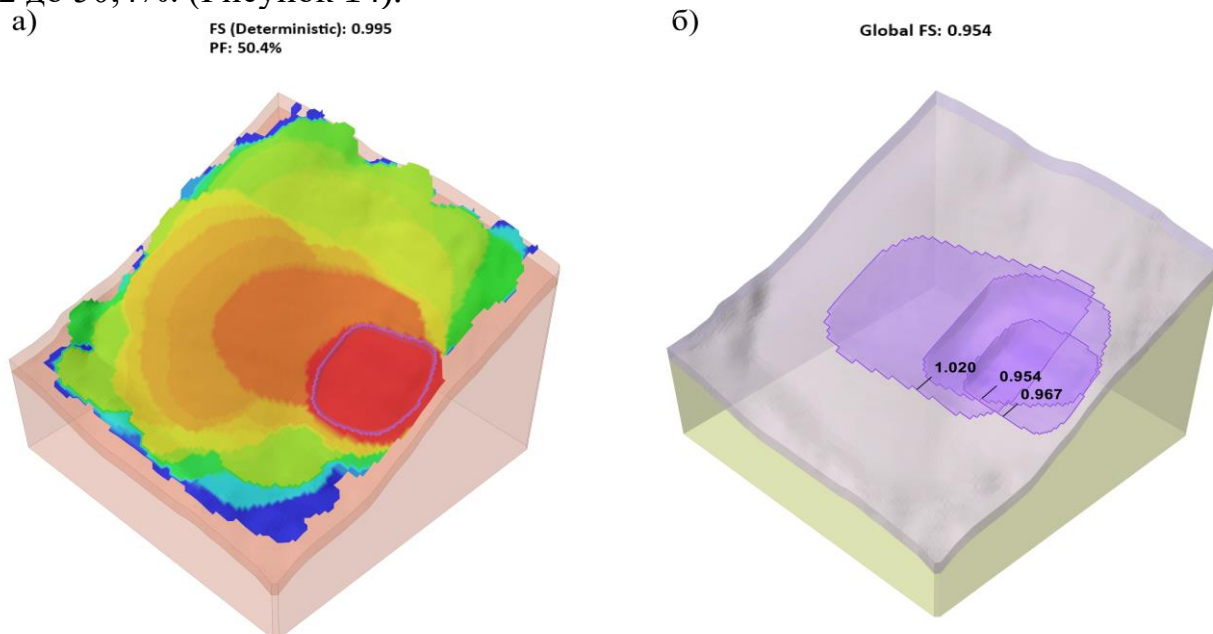


Рисунок 14 – Результат расчета устойчивости склона период интенсивных ливневых осадков на момент времени 10ч, 31 мая, 2020 года: а) карта устойчивости склона; б) положение возможных поверхностей скольжения, полученных в процессе мультимодальной оптимизации PSO

Совместный учет сейсмического воздействия и ливневых осадков на устойчивость склона

С целью оценки влияния сейсмического воздействия и порового давления на результаты оценки устойчивости склона, был выполнен анализ чувствительности, результаты которого представлены на Рисунок 15-17.

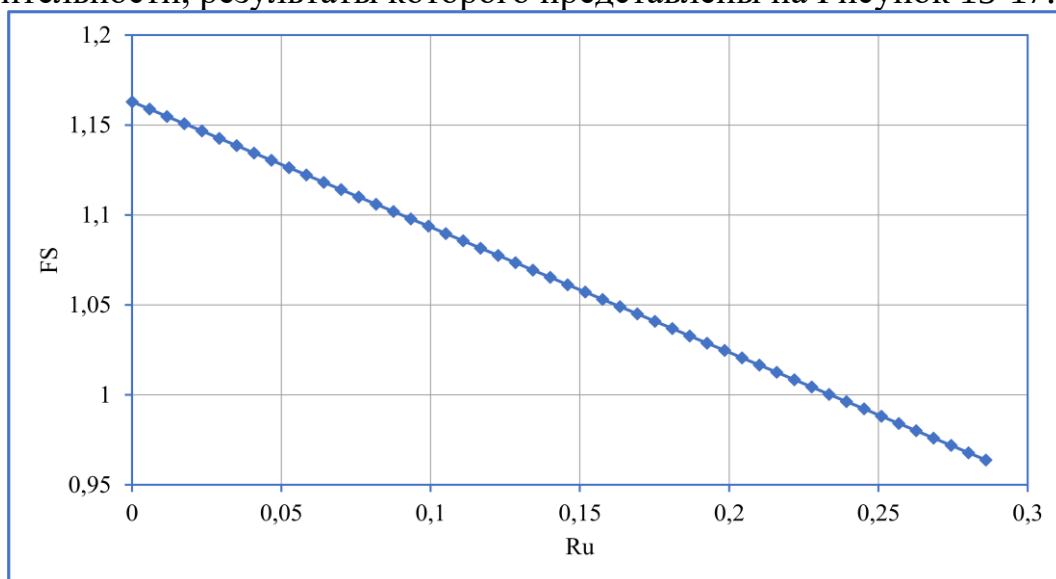


Рисунок 15 – Связь между значением FS и значением R_u

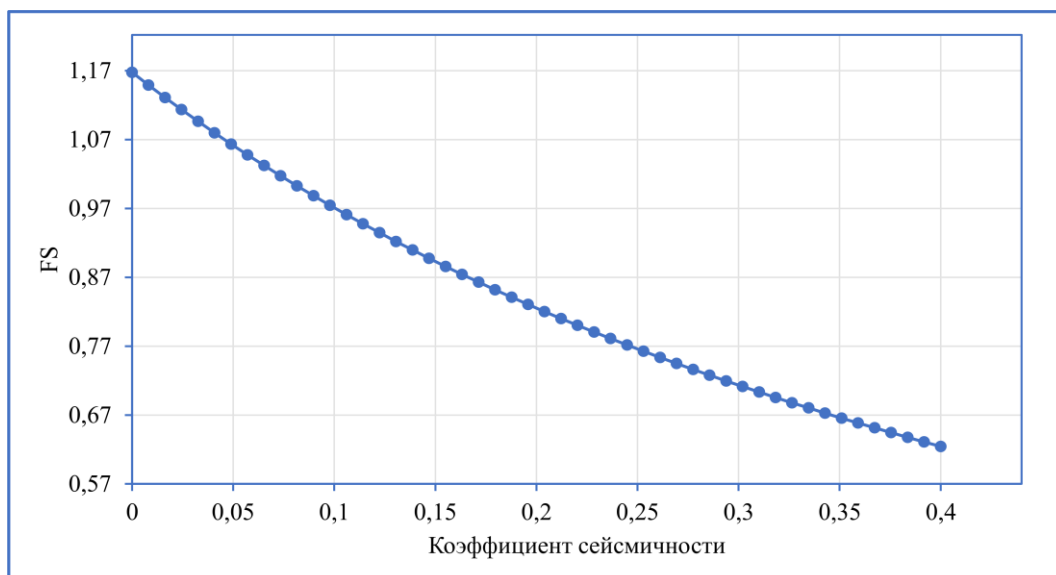


Рисунок 16 – Связь между значением FS и коэффициентом сейсмичности

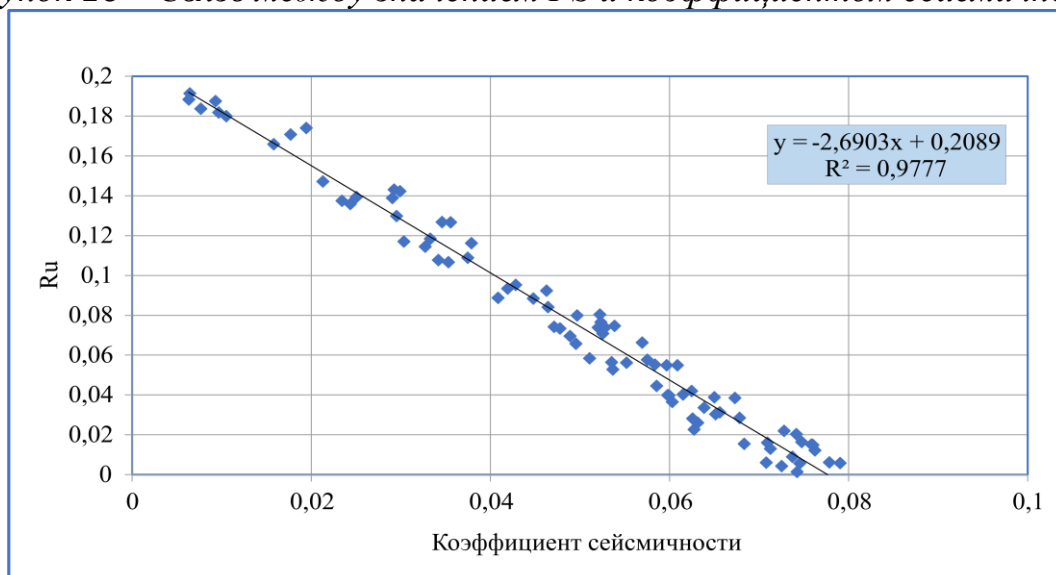


Рисунок 17 – Совместное влияние коэффициента порового давления и коэффициента сейсмичности на устойчивость склона (линия соответствует коэффициенту устойчивости -1)

Анализ полученных графиков показывает, что возрастание коэффициента порового давления R_u вследствие осадков до значения 0,23 (Рисунок 15) или землетрясение со значением коэффициента горизонтального пикового ускорения k_{eq} более 0,08 (Рисунок 16) может привести к развитию оползня на исследуемом склоне. При высоком значении R_u даже незначительное землетрясение может стать причиной активизации оползневого процесса. Для комбинированного прогноза оползневой опасности от совместного влияния обоих триггеров, можно использовать уравнение, представленное на Рисунок 17.

Результаты 3D расчета устойчивости склона методом конечных элементов (МКЭ)

Анализ полученных результатов показал, что в «сухой» период склон является устойчивым, с критическим коэффициентом снижения прочности (SRF) - 1,32 (Рисунок 18а).

В процессе интенсивных ливневых осадков, за счет инфильтрации воды в грунт, будет происходить увеличение порового давления, что, как следствие, приведет к снижению коэффициента устойчивости склона. Выполненный расчет показал, что при увеличении R_u от 0 до 0,286 (на момент времени 15ч 31 мая, 2020г.), SRF уменьшается с 1,32 до 0,96. Кроме того, результаты анализа показали, что склон теряет устойчивость около 14 часов 31 мая (SRF – 0,98) (Рисунок 18б).

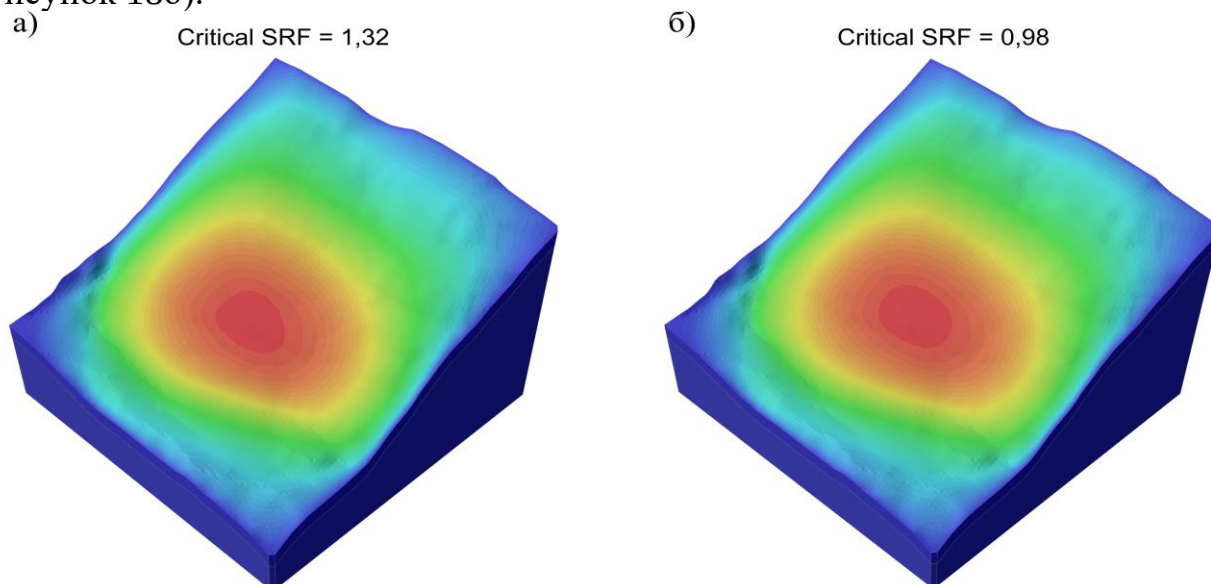


Рисунок 18 – Результаты моделирования устойчивости склона с использованием RS3: а) в «сухой» период; б) в период интенсивных ливневых осадков на момент времени 14ч, 31 мая, 2020 года

Влияние плотности сетки на результаты 2D расчетов устойчивости склона методом конечных элементов (МКЭ)

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

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

На Рисунок 19 приведен обобщенный график влияния плотности сетки на коэффициент устойчивости (SRF). Его анализ показывает, что плотность конечноэлементной сетки является важным фактором, влияющим на результаты моделирования устойчивости склонов и без ее обоснования расчеты МКЭ не могут считаться достоверными.

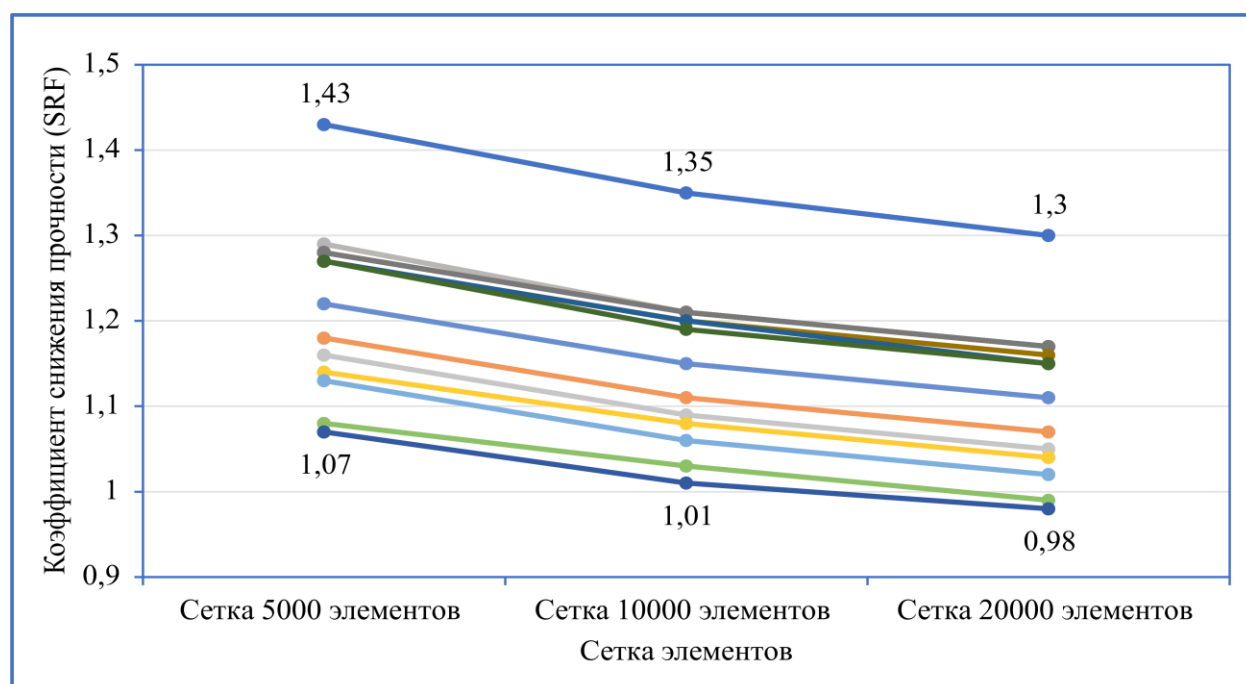


Рисунок 19 – Связь между изменением SRF и плотностью конечноэлементной сетки

Вышеизложенное позволяет сформулировать четвертое защищаемое положение:

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

Заключение

1. При оценке опасности оползневые процессы целесообразно рассматривать как компоненты природно-технических систем с учетом их иерархии.

2. Исследование оползнеобразующих факторов и выявление взаимосвязей между ними дает возможность построить модель оценки оползневой опасности.

3. Эффективный подход к оценке оползневой опасности должен базироваться на комплексном применении современных методов, основанных на разных принципах, с учетом уровня иерархии ПТС.

4. Оптимальным подходом для оценки оползневой опасности ПТС регионального уровня является применение методов с использованием ГИС, базирующихся на совместном анализе результатов комплекса количественных статистических методов с обязательной валидацией моделей путем сравнения полученных карт оползневой опасности с картой инвентаризации оползней.

5. Оптимальным подходом для оценки оползневой опасности на локальном

уровне иерархии ПТС является применение детерминистического подхода, основанного на вычислении коэффициента устойчивости с последующим анализом результатов в геоинформационной системе.

6. Оптимальным подходом для оценки оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС является комплексное применение геотехнических методов (методов предельного равновесия в сочетании с численными методами), дополненных вероятностным анализом.

7. Направлением дальнейших исследований является разработка мер по минимизации ущерба от развития и активизации оползневого процесса для уменьшения последствий стихийных бедствий, а именно «Разработка эффективной системы раннего предупреждения оползневого процесса (СРПОП)», которая должна основываться на иерархии ПТС.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России или** **входящие в международные наукометрические базы «Scopus» и** **«Web of Science»**

1. **Зыонг В.Б.**, Фоменко И.К., Ву Х.Д., Нгуен Т.Х., Сироткина О.Н., 2021. Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геоинформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама). Инженерная геология, Том XVI, № 2, с. 6–20. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20>.
2. **Зыонг Ван Бинь**, И. К. Фоменко, Нгуен Чунг Киен, Ви Тхи Хонг Лиен, О. В. Зеркаль, Ву Хонг Данг. Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, Том 333, № 4, с. 126–140. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473>.
3. **Зыонг В.Б.**, Фоменко И.К., Нгуен З.Ф., Нгуен Ч.К., Ву Х.Д., Зеркаль О.В., 2022. Локальная оценка оползневой опасности с использованием Scoops3D на примере территории коммуны Чунгчай (Шапа, Вьетнам). Инженерная геология, Том XVII, № 1, с. 34–47. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-1-34-47>.
4. Фоменко И.К., **Зыонг В.Б.**, Нгуен Ч.К., Зеркаль О.В., Горобцов Д.Н., Сироткина О.Н., 2022. Оценка оползневой опасности природно-технической системы элементарного уровня на примере оползневого склона в коммуне Чунгчай (Шапа, Вьетнам). ГеоРиск, Том XVI, № 1, с. 55–65. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-1-56-65>.
5. **Binh Van Duong**, Igor K. Fomenko, Lan Chau Nguyen, Kien Trung Nguyen, Tuan-Nghia Do, Denis N. Gorobtsov, Oleg V. Zerkal, Hien The Dinh. Mathematical and numerical modeling of slope stability for the Mong Sen landslide event in the Trung Chai commune, Sapa, Vietnam. In: K. Sassa (ed) "Progress in Landslide Research and Technology", Volume 2 issue 1, 2023 (in press).

6. **Van Duong, B.**, Fomenko, I.K., Nguyen, K.T., Vu, D.H., Sirotkina, O.N., Pham, H.N.T. (2023). Application of Scoops3D and GIS for Assessing Landslide Hazard in Trung Chai Commune, Sapa, Vietnam. In: Thambidurai, P., Singh, T.N. (eds) Landslides: Detection, Prediction and Monitoring. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23859-8_13.

Публикации в иных научных изданиях

1. **Binh Van Duong**, Igor Konstantinovich Fomenko, Ha Viet Nhu, Phuong Huy Nguyen, Olga Nikolaevna Sirotkina, Kien Trung Nguyen and Ha Ngoc Thi Pham, 2022. Landslide hazard assessment for Batxat area of Vietnam using GIS-based spatial prediction models. Journal of Mining and Earth Sciences, Vol. 63, Issue 5a, pp. 70–82. doi: 10.46326/JMES.2022.63(5a).09.
2. **Зыонг В.Б.**, Фоменко И.К., Ву Х.Д., Сироткина О.Н. Анализ влияния изменения порового давления в период ливневых осадков на устойчивость склона (на примере оползня в микрорайоне Као Тханг города Халонг, Вьетнам). Новые идеи в науках о Земле: в 7 т. Материалы XV Международной научно-практической конференции Новые идеи в науках о Земле. Т. 5. Издательство Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, 2021. с. 232–236.
3. **Зыонг В.Б.**, Фоменко И.К., Ву Х.Д., Сироткина О.Н. Оценка оползневой восприимчивости в районе Батсат провинции Лаокай с применением метода соотношения частотностей. Молодые – Наукам о Земле: в 7 т. Материалы X Международной научно-практической конференции Молодые – Наукам о Земле. Т. 5. Издательство Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе, Москва, 2022. с. 133–137.
4. **Зыонг В.Б.**, Фоменко И.К., Нгуен Ч.К., Ву Х.Д., Сироткина О.Н. Анализ устойчивости склона под воздействием осадков с использованием метода конечных элементов: на примере коммуны Чунгчай (Шапа Вьетнам). Инновации в геологии, геофизике и географии-2022. Материалы 7-ой Международной научно-практической конференции (2022), Н. В. Лубнина, ред., М. Издательство Перо Москва, с. 67–68.
5. **Binh Van Duong**, Fomenko I.K., Kien Trung Nguyen, Dang Hong Vu, Zerkal O.V., Ha Ngoc Thi Pham. Earthquake-induced landslide hazard assessment in Trung Chai commune, Sapa, Vietnam using a deterministic method. In Proceeding of the ERSD2022: Earth sciences and natural resources for sustainable development. Hanoi, 2022. pp. 107–112.
6. Фоменко И.К., **Зыонг В.Б.**, Нгуен Ч.К., Сироткина О.Н., Горобцов Д.Н. Влияние разрешения цифровой модели рельефа на оценку оползневой опасности (на примере района Шапа провинции Лаокай, Вьетнам). Геоинфо. 2022. № 12. с. 38–44. doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-38-44