На правах рукописи

ЗЫОНГ МАНЬ ХУНГ

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ХА ЛОНГ – КАМ ФА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ВЬЕТНАМА)

Специальность 25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ) на кафедре инженерной геологии.

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, профессор **Пендин Вадим Владимирович**

Научный консультант: кандидат геолого-минералогических наук, **Фоменко Игорь Константинович**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, профессор **Экзарьян Владимир Нишанович**, МГРИ-РГГРУ, заведующий кафедрой экологии и природопользования, декан экологического факультета

кандидат геолого-минералогических наук, **Осика Ирина Викторовна,** научно- исследовательский институт энергетических сооружений (ОАО НИИЭС), ведущий научной сотрудник

Ведущая организация: **Институт геоэкологии Российской академии наук (ИГЭ РАН)**

Защита диссертации состоится 03 октября 2013г. в 15 часов в ауд.4-73 на заседании диссертационного совета Д 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: 117997, г.Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 117997, г.Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д.23, Российский государственный геологоразведочный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.121.01.

Автореферат разослан 13 августа 2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент О.Е. Вязкова

Общая характеристика работы

Регион Ха Лонг – Кам Фа в силу своего географического расположения на северо-востоке Вьетнама является чрезвычайно выгодной в экономическом плане территорией: с одной стороны, это давно известный туристический район; с другой - центр угольной промышленности страны. Однако, его успешное освоение ограничивается сложными инженерно-геологическими условиями территории и в первую очередь с активным проявлением оползневых процессов. По этой причине, достоверный прогноз оползневой опасности чрезвычайно важен для устойчивого развития региона.

Оценка степени риска активизации оползней – одна из важнейших задач инженерно-геологических исследований. Существующие методики этой оценки (А.П. Павлова, Ф.П. Саваренского, Н.Н. Маслова, А.М. Дранникова, И.В. Попова, Г.П. Постоева, Г.С. Золотарева, Г.Л. Фисенко, М.К. Рзаевой, К.А. Гулакяна, В.В. Кюнтцеля, Е.П. Емельяновой, Г.И. Тер-Степаняна, Н.Л. Шешени, К. Терцаги, С. Шарпа, Д. Варнеса и др.) можно разделить на качественные и количественные.

При разработке планов комплексного развития территории особое значение приобретает количественный региональный прогноз оползневой опасности.

Региональная количественная оценка устойчивости склонов выполняется на основе разделения изучаемой территории на группы участков (зон), отличающихся между собой по природным условиям формирования оползней, а также по интенсивности и характеру влияния инженерно-хозяйственной деятельности. При этом в обязательном порядке должны учитываться: основные литолого-генетические комплексы пород, слагающих склоны; интенсивность основных природных оползнеобразующих процессов; степень обводненности и крутизна склонов.

При классическом подходе, региональная оценка устойчивости склонов выполняется путем определения показателей степени развития оползней по результатам инженерно-геологической съемки.

Настоящая диссертационная работа посвящена решению важной научной проблемы -разработке научно-методических основ количественного регионального прогноза оползневой опасности.

В качестве исходных данных для оценки оползневой опасности были использованы данные дистанционного зондирования региона Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама в сочетании с материалами традиционных полевых исследований.

Работа выполнялась автором под руководством профессора В.В.Пендина и кандидата наук И.К.Фоменко, начиная с 2010 года, на кафедре инженерной геологии Гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета (МГРИ-РГГРУ).

Актуальность работы:

Актуальность выбора темы диссертационной работы объясняется, прежде всего, недостаточным количеством исследований, базирующихся на комплексной количественной оценке инженерно-геологических условий. Особенно это касается регионов со специфическими инженерно-геологическими и климатическими условиями (территория северо-востока Вьетнама). Для экономики Вьетнама грамотное планирование хозяйственного освоения территории, объемов инженерно-геологических исследований, рационального использования окружающей среды – задача первостепенной важности, решить которую можно только на основе современных методов, в частности метода комплексной количественной оценки инженерно-геологических условий. С другой стороны, это исследование уточнит возможности и преимущества дистанционного зондирования и ГИС в изучении оползневого процесса.

Работа выполнена в рамках национальной программы по изучению экзогенных геологических процессов для планирования хозяйственного освоение территорий, ориентированного на рациональное использование и охрану геологической среды на территории Вьетнама.

Цель и задачи:

Главная цель работы – разработка основных теоретических и методологических положений комплексного количественного анализа информации в инженерной геологии и комплексной количественной оценки инженерно-геологических условий применительно к решению задач картирования, районирования и прогноза оползневой опасности, выявление закономерностей развития оползневого процесса в условиях тропического климата на основе ГИС технологий.

Основные задачи исследований:

- анализ условий и факторов развития оползневого процесса для региона Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама;

- разработка региональной классификации оползней по масштабам их проявления;

- прогнозирование оползневой опасности, базирующееся на комплексном использовании статистических и детерминистических методов оценки: по восприимчивости территории к оползневому процессу; по индексу стабильности склона (SINMAP); и основанное на морфометрических критериях склонов (SMORPH).

- оценка влияния сейсмических процессов на устойчивость оползневых склонов;

- выработка рекомендаций по практическому использованию полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обосновано применение методов оценки и прогноза развития оползневых процессов в условиях тропического климата, с использованием ГИС технологий.

2. Выявлены основные факторы оползнеобразования на исследуемой территории.

3. Разработана методика прогноза оползневой опасности по восприимчивости территории к оползневому процессу, базирующаяся на комплексном количественном анализе информации.

4. Проведено инженерно-геологическое районирование территории Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама на основе прогнозного моделирования оползневой опасности по индексу стабильности (SINMAP).

5. Впервые проведен комплексный количественный анализ информации для прогнозного моделирования оползневой опасности по топографическим факторам, основанный на морфометрических критериях склонов (SMORPH), с учётом сейсмического воздействия.

Основная идея работы заключается в обосновании научно-методического подхода к изучению геологического процесса с позиции теории систем. Геологический процесс рассматривается как динамическая система изменения свойств литосферы в пространстве признаков. Исследование оползнеобразующих факторов и выявление взаимосвязей между ними дает возможность построить пространственную модель прогнозирования оползневого процесса.

Научно-практическая значимость работы:

В работе, с использованием ГИС технологий, приводится региональная инженерно-геологическая оценка оползнеопасных территорий, прогнозируется пространственное развитие оползней, рассматриваются методы их локализации.

Методика моделирования оползневой опасности в среде ГИС может быть использована в учебных и научно-исследовательских целях, применяться для прогнозирования оползневых процессов при разработке планов комплексного освоения территории.

Методы исследования:

В развитие существующих методик оценки региональной оползневой опасности, автором данной диссертационной работы были использованы современные подходы, базирующийся на ГИС технологиях - метод регионального прогноза по восприимчивости территории к оползневому процессу, метод регионального прогноза оползневой опасности по индексу стабильности и метод основанный на морфометрических критериях склонов.

Защищаемые положения:

1. Выявлены основные оползнеобразующие факторы, определяющие региональное развитие оползней региона Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама. К ним относятся: геологическое строение; свойства грунтов, мощность потенциально оползнеопасных отложений (для скальных и полускальных грунтов - мощность коры выветривания); крутизна склонов; тип ландшафта.

2. В результате регионального прогнозирования оползневой опасности в регионе Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама с использованием методов прогноза по восприимчивости территории к оползневым процессам и по индексу стабильности (метод SINMAP) выявлены наиболее опасные области. Использованные методы регионального прогноза оползневой опасности взаимно дополняют друг друга, а получаемые в результате их сочетания прогнозные оценки имеют повышенную точность.

3. Важнейшим морфометрическим оползнеопределяющим фактором в исследуемом регионе, наряду с градиентом наклона поверхности склона, является его форма. Использование метода регионального прогноза оползневой опасности, основанного на морфометрических критериях (SMORPH) позволило выделить зоны с различной степенью оползневой опасности: крайне-нестабильные; умеренно-неустойчивые; стабильные.

4. Регион Ха Лонг – Кам Фа является активным в сейсмическом отношении. Землетрясения оказывают огромное влияние на устойчивость склонов. Региональное прогнозирование оползневой опасности в регионе Ха Лонг – Кам Фа проведено с учётом сейсмического воздействия в 8 баллов по шкале MSK 64. Сравнительный анализ

полученных данных с картой оползневой опасности без учета сейсмического воздействия, показывает, что в результате прогнозного землетрясения в 8 баллов по шкале MSK 64 площадь оползнеопасных участков увеличивается более чем в пять раз, при этом площадь крайне-нестабильных участков увеличивается почти в три раза.

Фактический материал:

В основу диссертационной работы положены результаты исследований автора - непосредственного исполнителя и руководителя геологических работ по региональному изучению оползней с 1995 по 2009 гг., а также частично материалы совместных работ с институтом геологических наук и минеральных ресурсов Вьетнама. Автором, на основе полевых работ и экспериментальных лабораторных исследований, изучены физико-механические и фильтрационные свойства горных пород, исследованы факторы оползневого процесса, выполнено инженерно-геологическое картирование оползней изучаемой территории.

Теоретическую основу исследований составили работы вьетнамских ученых Ву Тхань Там, Ле Кань Туан, Фам Ха Туя, Дам Нгок, Нгуен Суан Нам, Нгуен Динь Туан, Фам Вьет Ха, Фам Ван Ти, Нгуен Хуи Фыонг, Зыонг Мань Хунг и других.

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 в среде ГИС.

Апробация работы и публикации:

По теме диссертации опубликовано 3 научных работы в реферируемых ВАК журналах, а также 1 статья в трудах конференций «Горно-геологический университет Ханоя». Ханой. 2008. 1 статья в сборнике трудов к 80-летию кафедры инженерной геологии МГРИ-РГГРУ и 3 тезисов в трудах конференций «НОВЫЕ ИДЕИ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ, МОЛОДЫЕ – НАУКАМ О ЗЕМЛЕ» (Москва 2012 и 2013).

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, она содержит 121 страницы текста, сопровождается 17 таблицами, 31 рисунком, 15 фотографиями, одним приложением и списком литературы из 139 наименований.

Автор считает своим долгом выразить глубокую признательность сотрудникам кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета МГРИ-РГГРУ

проф.д.г.-м.н. Л.А.Ярг, проф.д.г.-м.н. В.В.Дмитриев, проф.д.г.-м.н. Е.М.Пашкин за помощь при выполнении диссертационной работы, к.ф.н. Л.Н.Чальян (кафедра русского языка МГРИ-РГГРУ) за ценные советы и подготовку материалов. Особо хочется поблагодарить научного руководителя проф.,д.г.-м.н. В.В.Пендина, осуществившего непосредственное руководство работой и научного консультанта к.г.-м.н. И.К.Фоменко за неоценимую помощь, доброжелательное отношение, своевременную поддержку и постоянное внимание. Без их участия выполнение работы было бы невозможным.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены защищаемые положения, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1. Современное состояние проблемы регионального прогноза оползневых процессов

Рассмотрены идентификационные признаки проявления оползневого процесса, классификация оползней, количественные показатели, характеризующие основные параметры оползней, влияние сейсмического воздействия на активизацию оползневых процессов, региональное изучение оползней, методы регионального прогноза оползней, и локальное изучение оползней.

Глава 2. Методы адаптированные для регионального прогнозирования оползней на базе ГИС-технологий

В главе сформулированы научно-методические основы регионального прогнозирования оползней, приведены типы количественных моделей регионального прогнозирования оползневых процессов. Рассмотрены существующие программные средства на базе Гис-технологий, возможность их адаптации для целей данной работы и представлены программные средства, разработанные в ходе выполнения проекта для решения некоторых задач районирования территории по оползневой опасности.

Методические приемы, модели, разработанные для изучения оползневых процессов на базе Гис-технологий и собранные данные могут быть использованы при планировании защитных мероприятий заинтересованными органами исполнительной власти и разработке планов территориального развития территории на региональном уровне.

Глава 3. Инженерно-геологические условия района Ха Лонг – Кам Фа с точки зрения прогноза оползневой опасности

Основным содержанием главы является выявление условий и факторов, способствующих развитию оползневых процессов в районе Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама. К ним относятся: климатические условия и растительность; характер инженерно-хозяйственной деятельности; рельеф местности; геологическое строение, степень выветрелости грунтов и их свойства; гидрогеологические условия; тектонические условия и сейсмическая активность; экзогенные геологические процессы, способствующие оползнеобразованию.

Глава 4. Региональный прогноз оползневой опасности района Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама

В развитие существующих методик оценки региональной оползневой опасности, автором данной диссертации были использованы современные подходы, базирующиеся на ГИС технологиях. Оценка оползневой опасности выполнена при помощи трех методов - по восприимчивости территории к оползневому процессу, по индексу стабильности склона, и на основе морфометрических критериях склонов.

Теоретической основой проведенной прогнозной оценки оползневого процесса района Ха Лонг – Кам Фа послужили работы Е.П.Емельяновой /1972/, В.Д.Ломтадзе /1977/, В.В.Кюнтцеля /1980/, Л.А.Ярг /1981;2007/, Г.К.Бондарика /2007;2009/, В.В.Пендина /2007;2009/ и других.

4.1. Региональный прогноз восприимчивости территории к оползневому процессу

4.1.1. Методика исследований по восприимчивости территории к оползневому процессу

Для определения восприимчивости территории к оползневым процессам следует определить основные факторы, обусловливающие их активизацию. Для региона Ха Лонг – Кам Фа на основе данных дистанционного зондирования были выбраны следующие основные факторы: геологическое строение; мощность потенциально оползнеопасных отложений (для скальных и полускальных грунтов – мощность коры выветривания); крутизна склонов; тип ландшафта.

Основным критерием для того, чтобы считать тот или иной фактор оползнеопасным, является форма функции распределения выявленных оползней по информационным классам рассматриваемого фактора. В качестве примера на рисунке 4.1 показаны две

возможные функции такого распределения. Из этого рисунка видно, что фактор 1, имеющий большую дисперсию, является менее оползнеопасным по сравнению с фактором 2.

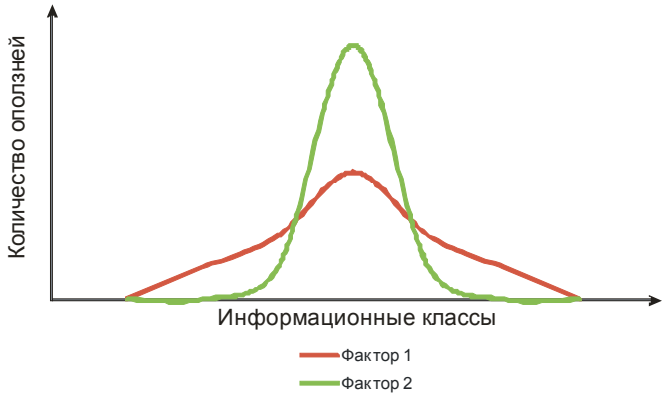

Рис 4.1. Функции распределения выявленных оползней по информационным классам

Стандартное отклонение функции распределения выявленных оползней по информационным классам рассматриваемого фактора является основой для определения его веса w_j (д.ед.), при этом веса всех (n) оцениваемых факторов нормируются таким образом, чтобы их сумма равнялась 1:

$$w_j = 1 - \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^{n} \sigma_j}, \qquad (4.1)$$

где σ_j – стандартное отклонение функции распределения выявленных оползней по информационным классам j-го фактора.

В таблице 4.1 приведены веса w_j оползнеопасных факторов для региона Ха Лонг – Кам Фа.

Таблица 4.1
Веса факторов, существенно влияющих на развитие оползней в регионе Ха Лонг – Кам Фа

Фактор	Вес w_j, д.ед.
Геологическое строение	0,337
Мощность потенциально оползнеопасных отложений (для скальных и полускальных грунтов – мощность коры выветривания)	0,230
Крутизна склонов	0,254
Тип ландшафта	0,180
Сумма	1,000

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

$$x_{ij} = \frac{\text{количество выявленных активных оползней в данном информационном классе}}{\text{количество выявленных активных оползней на всей исследуемой территории}}, \qquad (4.2)$$

Методика районирования территории по восприимчивости к оползневым процессам заключается в следующем. Для каждого элементарного участка рассматриваемой территории рассчитывается интегрированный показатель H по следующей формуле:

$$H = \sum_{i,j=1}^{n} w_j x_{ij} \qquad (4.3)$$

где H – интегрированный показатель восприимчивости к оползневым процессам, безразм.; w_j – вес фактора j, д.ед.; x_{ij} – вес класса i фактора j, д.ед.

4.1.2. Районирование региона Ха Лонг – Кам Фа по восприимчивости к оползневому процессу

Результатом регионального прогноза по восприимчивости территории к оползневым процессам является карта районирования (рис 4.2).

Для оценки степени восприимчивости территории к оползневым процессам автор использовал принцип «светофора», в соответствии с которым регион Ха Лонг – Кам Фа был разделен на три типа зон, в пределах которых восприимчивость геологической среды к оползневым процессам: (1) высокая; (2) средняя; (3) низкая (см. рис 4.2).

Методом подбора были определены приемлемые уровни изменения интегрированного показателя восприимчивости к оползневым процессам для каждой из выделенных зон соответственно: (1) $H = 0{,}6 \div 0{,}8$; (2) $H = 0{,}4 \div 0{,}6$; (3) $H = 0{,}0 \div 0{,}4$. Для районирования региона Ха Лонг – Кам Фа использовался программный модуль Spatial Analyst ГИС ArcMap.

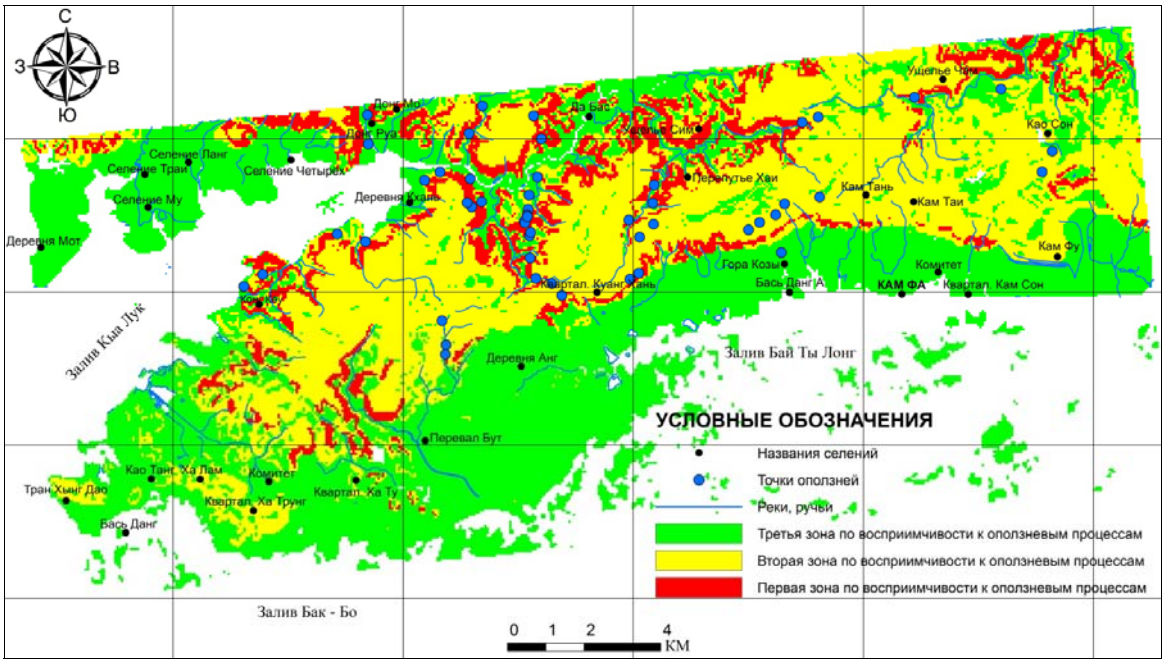

Рис 4.2. Карта районирования территории Ха Лонг – Кам Фа по степени восприимчивости к оползневым процессам

4.2. Моделирование оползневой опасности по индексу стабильности (SINMAP)

Метод регионального прогноза по восприимчивости территории к оползневым процессам позволяет выполнить её районирование на основе факторов оползнеобразования. Однако он не позволяет получить количественную оценку оползнеопасности в виде такого общепризнанного критерия, как коэффициент устойчивости склона (F_S).

С целью регионального прогноза оползнеопасности по параметру близкому по сути к коэффициенту устойчивости автор в своём исследовании использовал метод районирования территории по индексу стабильности.

4.2.1. Методика исследований (SINMAP)

Данный метод, или картирование по индексу стабильности (SINMAP - Stability Index Mapping), был разработан в Университете штата Юта (США) в сотрудничестве с консалтинговой фирмой Terratech Consulting, организациями C.N. Goodwin Fluvial System Consulting, U.S. Forest Service, Rocky Mountain Research Station (США) и Forest Renewal British Columbia (Канада). В его основе лежит расчет устойчивости склона по схеме бесконечного откоса с учётом влияния подземных вод, которая определяет коэффициент устойчивости склона F_s как отношение между удерживающими и сдвигающими силами согласно следующей зависимости [D.G. Tarboton, R.T. Pack, C.N. Goodwin, Ajay Prasad/2005]:

$$F_S = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta\left[\rho g\left(D - D_w\right) + g\left(\rho - \rho_w\right)D_w\right]tg\varphi}{D\rho g \sin\theta\cos\theta} \qquad (4.4)$$

где F_S – коэффициент устойчивости склона, безразм.; C_r – вегетативное сцепление, Н/м^2; C_s – сцепление грунтов, Н/м^2; θ – угол наклона склона, град.; ρ – плотность грунтов, кг/м^3; ρ_w – плотность воды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, $g = 9{,}81$ м/с^2; D –мощность слоя грунта по вертикали, м; D_w – мощность водоносного слоя по вертикали, м; φ – угол внутреннего трения грунтов, град.

На рисунке 4.3 показана геометрия склона, предполагаемая в уравнении (4.4).

Зависимость (4.5) может быть приведена к следующему виду:

$$F_S = \frac{C + \cos\theta\left[1 - Wr\right]tg\varphi}{\sin\theta} \qquad (4.5)$$

где C – комбинированное сцепление, безразм., $C = (C_r + C_s) / (h\,\rho\,g)$, где $h = D\cos\theta$, м; W – относительная влажность, $W = D_w/D = h_w/h$, д.ед.; h – истинная мощность слоя, м; h_w – мощность водоносного слоя, м, $h_w = D_w\cos\theta$; r – отношение плотности воды ρ_w к плотности грунтов ρ, безразм., то есть $r = \rho_w / \rho$.

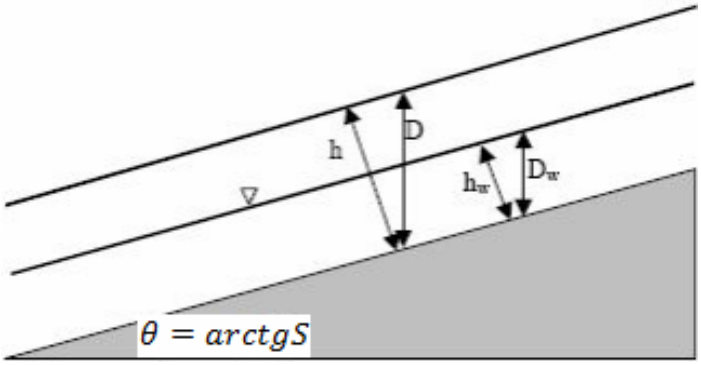

Рис 4.3. Схема модели бесконечной устойчивости склона

D – мощность слоя грунтов по вертикали, м; D_w – глубина залегания уровня грунтовых вод по вертикали, м; h – истинная мощность слоя, м., $h = D \cos\theta$, м; h_w – мощность водоносного слоя, м., $h_w = D_w \cos\theta$, м; θ – угол наклона склона, град.; S – градиент падения склона, д.ед., ∇ – отметка уровня грунтовых вод.

Используя гидрогеологический критерий, авторы метода SINMAP [D.G. Tarboton, R.T. Pack, C.N. Goodwin, Ajay Prasad/2005] предлагают определять относительную влажность *W* (д.ед.) по следующей формуле:

$$W = \min\left(\frac{R}{T}\frac{a}{\sin\theta}, 1\right) \qquad (4.6)$$

где T = Кт – коэффициент водопроводимости грунтов, $м^2$/сут; K – коэффициент фильтрации, м/сут; т – мощность водоносного слоя, м; a = A/b – удельная площадь водосбора, рассчитываемая на единицу длины топографического профиля, м (см. рис 4.4); R – коэффициент эффективного питания подземных вод на единицу площади поверхности, м/сут; рассчитываемый по формуле:

$$R = (I - E_T)K_{sr} \qquad (4.7)$$

где K_{sr} – коэффициент поверхностного стока, безразм., определяемый как отношение объема поверхностного стока на водосборе при выпадении осадков к общему объему выпавших осадков; I – показатель интенсивности осадков, м/сут; E_T – показатель интенсивности испарения, м/сут.

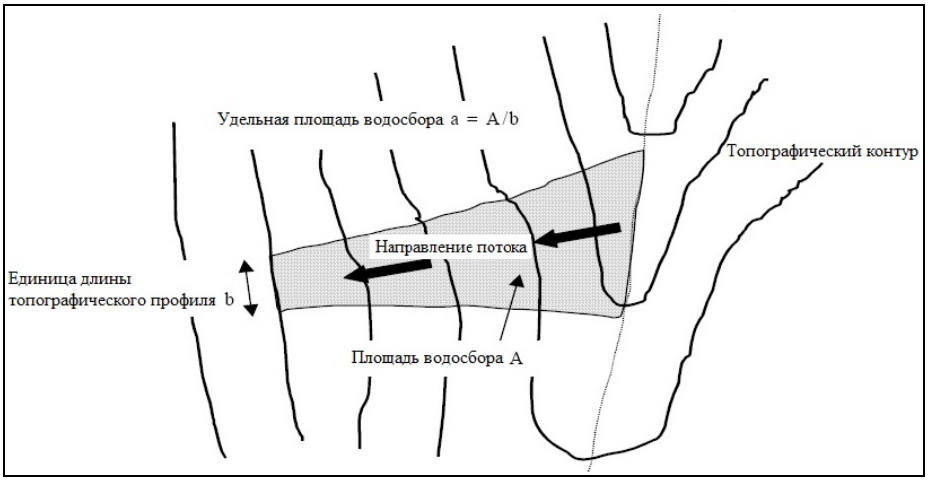

Рис 4.4. Определение удельной площади водосбора

Объединяя расчет устойчивости склона по схеме бесконечного откоса (4.5) с гидрогеологическим подходом (4.6), получим следующую зависимость:

$$F_S = \frac{C + \cos\theta\left[1 - \min\left(\frac{R}{T}\frac{a}{\sin\theta}, 1\right)r\right]tg\varphi}{\sin\theta} \qquad (4.8)$$

Авторы модели SINMAP ввели понятие индекса стабильности склона (S_I) определив его следующим образом: для «неблагоприятного» и «благоприятного» сочетания.

При «неблагоприятном» сочетании параметров (минимальных прочностных характеристиках грунтов, максимальных осадках):

$$S_I = F_{S,\min} = \frac{C_1 + \cos\theta\left(1 - \min\left[\frac{R_1}{T_1}\frac{a}{\sin\theta}, 1\right]r\right)tg\varphi_1}{\sin\theta} \qquad (4.9)$$

где $F_{S,\min}$ – минимальный коэффициент устойчивости склона, безразм.; C_1 – минимальное комбинированное сцепление Н/м^2; θ – угол наклона склона, град.; φ_1 – минимальный угол внутреннего трения грунтов, град., R_1 – максимальный коэффициент эффективного питания подземных вод на единицу площади поверхности, м/сут; T_1 – минимальный коэффициент водопроводимости грунтов, м^2/сут.

При «благоприятном» сочетании параметров (максимальных прочностных характеристиках грунтов, минимальных осадках):

$$S_I = F_{S,\max} = \frac{C_2 + \cos\theta\left(1 - \min\left[\frac{R_2}{T_2}\frac{a}{\sin\theta}, 1\right]r\right)tg\varphi_2}{\sin\theta} \qquad (4.10)$$

где $F_{S,\max}$ – максимальный коэффициент устойчивости склона, безразм.; C_2 – максимальное комбинированное сцепление, Н/м^2; θ – угол наклона склона, град.; φ_2 – максимальный угол внутреннего трения грунтов, град.; R_2 – минимальный коэффициент эффективного питания подземных вод на единицу площади поверхности, м/сут; T_2 – максимальный коэффициент водопроводимости грунтов, м^2/сут.

Значения φ, *C* и *R/T* для «благоприятного» и «неблагоприятного» сочетания параметров при расчете индекса стабильности склонов в районе Ха Лонг – Кам Фа приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Значения φ, *C* и *R/T* для «благоприятного» и «неблагоприятного» сочетания параметров при расчете индекса стабильности склонов в регионе Ха Лонг – Кам Фа

Сочетание параметров	Возраст оползнеопасных отложений	g, м/с^2	ρ_w, кг/м^3	ρ, кг/м^3	φ, град	C, безразм	R/T
Благоприятное	T_3n-r *hg*	9,81	1000	1982	15,2÷30,3	0,011÷0,340	0,00190÷0,00040
Неблагоприятное	Q	9,81	1000	1846	6,5÷29,3	0,010÷0,260	0,00083÷0,00036

В широком смысле индекс стабильности – понятие вероятностное, которое связано с коэффициентом устойчивости следующим образом (4.11):

$$S_I = \mathrm{Prob}(F_S > 1) \qquad (4.11)$$

4.2.2. Районирование региона Ха Лонг – Кам Фа по индексу стабильности склона (SINMAP)

Результатом регионального прогноза по индексу стабильности S_I является карта районирования (рис 4.5). Для определения устойчивости склонов на основе S_I авторы SINMAP разработали классификацию, приведенную в таблице 4.3.

Таблица 4.3
Определение устойчивости склонов на основе индекса стабильности S_I

Тип склона по стабильности	Индекс стабильности
Стабильный	$S_I > 1{,}5$
Умеренно стабильный	$1{,}25 < S_I \leq 1{,}5$
Квазистабильный	$1{,}0 < S_I \leq 1{,}25$
Верхний порог стабильности (для потери устойчивости необходимо неблагоприятное сочетание параметров)	$0{,}5 < S_I \leq 1{,}0$
Нижний порог стабильности (для сохранения стабильности необходимо благоприятное сочетание параметров)	$0{,}0 < S_I \leq 0{,}5$
Склон нестабилен (коэффициент устойчивости < 1)	$S_I = 0$

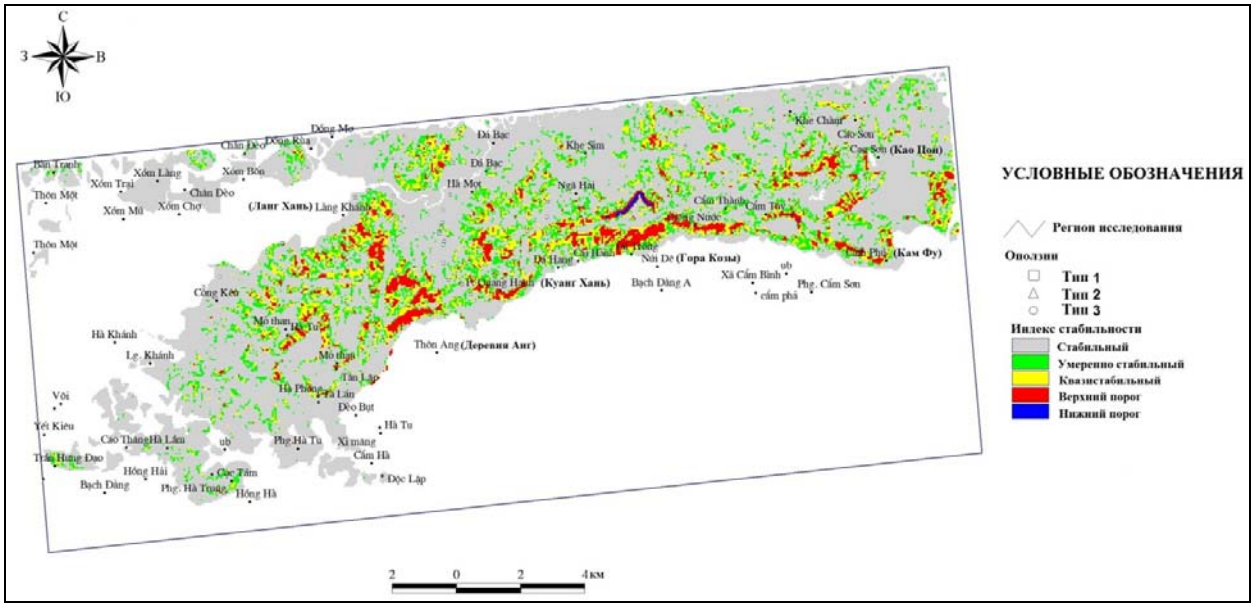

Рис 4.5. Карта районирования региона Ха Лонг – Кам Фа по индексу стабильности склона S_I

Принципиальная схема районирования оползневой опасности на основе SINMAP представлена на рисунке 4.6.

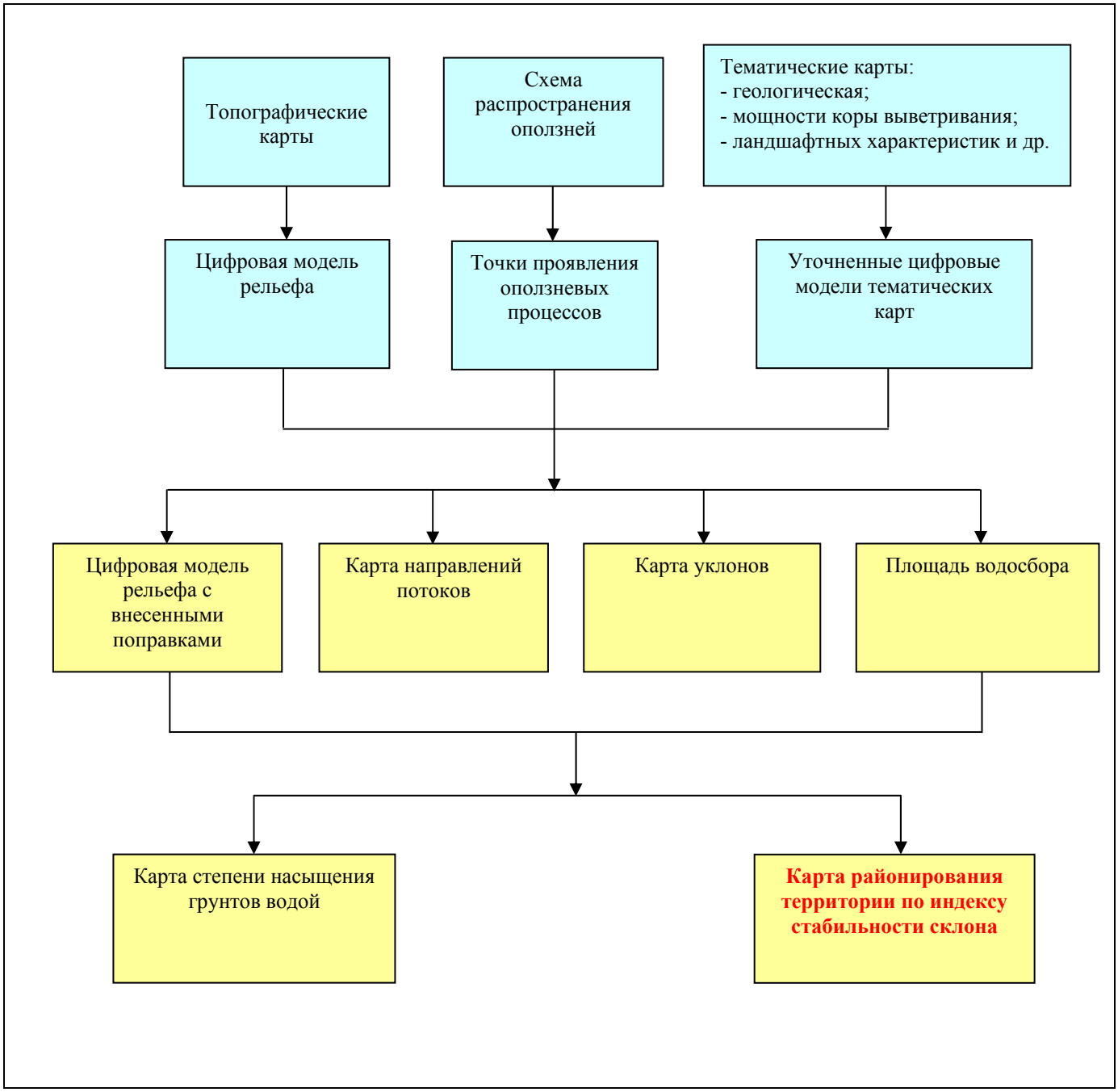

Рис 4.6. Принципиальная схема районирования оползневой опасности на основе SINMAP

Наилучшие результаты использование SINMAP дает при оценке опасности возникновения неглубоких оползней.

Анализ результатов, полученных на основе районирования территории по индексу стабильности, показывает высокий уровень их достоверности: области с крутыми и длинными склонами имеют низкий индекс стабильности ($0{,}0 < S_I \leq 0{,}5$); умеренно крутые

и длинные склоны с большой мощностью коры выветривания и значительной площадью водосбора имеют S_I от нижнего порога нестабильности ($0{,}5 < S_I \leq 1{,}0$) до умеренного и квазистабильного уровня ($1{,}00 < S_I \leq 1{,}25$).

4.3. Моделирование оползневой опасности на основе морфометрических критериев (SMORPH)

4.3.1. Методика исследований (SMORPH)

Вычислительная модель оценки оползневой опасности SMORPH основана на предположении, что морфологические особенности склонов (градиент наклона склона и форма кривизны поверхности склона) являются важнейшими факторами при развитии мелких оползней. При этом, градиент наклона определяет с одной стороны соотношение удерживающих и сдвигающих сил, а с другой - влияет на мощность оползневых отложений и совместно с формой кривизны склона на гидрологические процессы (скорость движения поверхностных вод), что, как следствие, определяет степень водонасыщения грунтов. Таким образом, модель оценки оползневой опасности SMORPH отражает восприимчивость рельефа к оползневому процессу.

Базовой входной информацией является топографическая основа местности, дополненная геологическими данными. Необходимые морфометрические параметры (градиент наклона и форма кривизны поверхности) получают при анализе рельефа. Для получения этой информации обычно используется легкодоступные цифровые модели местности, что, безусловно, является большим преимуществом метода.

На основе совместного анализа градиента наклона поверхности склона и его кривизны (вогнутый, плоский, выпуклый) создается «морфометрическая матрица» оползневой опасности территории.

Градиент наклона поверхности склона (в процентах) легко получить, зная угол склона в градусах. Математически, поверхность склона может быть задана как функция, которая в свою очередь может быть аппроксимирована полиномом четвертого порядка [L. W. Zeverbergen, and C.R. Thorne/1987]:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \qquad (4.12)$$

Кривизну поверхности склона в этом случае можно получить как вторую производную от приведенного выше полинома (4.12), если значение отрицательное, то склон выпуклый, если положительное – вогнутый.

Модель SMORPH хорошо работает при прогнозе оползней неглубокого заложения (менее 10м), формирующихся в элювиально-делювиальных отложениях. Она не предназначена для прогнозирования развития оползней потоков, глубоких и сложнопостроенных оползней.

4.3.2. Прогноз оползневой опасности (SMORPH)

На основе анализа участков проявления оползней была создана «морфометрическая матрица» оползневой опасности региона, приведенная в таблице 4.3.

Таблица 4.3
Матрица оползневой опасности на основе морфометрических критериев модели SMORPH для региона Ха Лонг – Кам Фа

Кривизна поверхности склона	Градиент наклона поверхности склона (в процентах)				
	<15%	**<= 24%**	**<= 47%**	**<= 70%**	**> 70%**
Класс 1 < -0.5 выпуклая форма	Стабильные участки	Умеренно-неустойчивые участки	Крайне-нестабильные участки	Крайне-нестабильные участки	Крайне-нестабильные участки
-0.5 <= Класс 2<= 0.5 плоская форма	Стабильные участки	Стабильные участки	Стабильные участки	Умеренно-неустойчивые участки	Крайне-нестабильные участки
Класс 3 > 0.5 вогнутая форма	Стабильные участки	Стабильные участки	Стабильные участки	Стабильные участки	Умеренно-неустойчивые участки

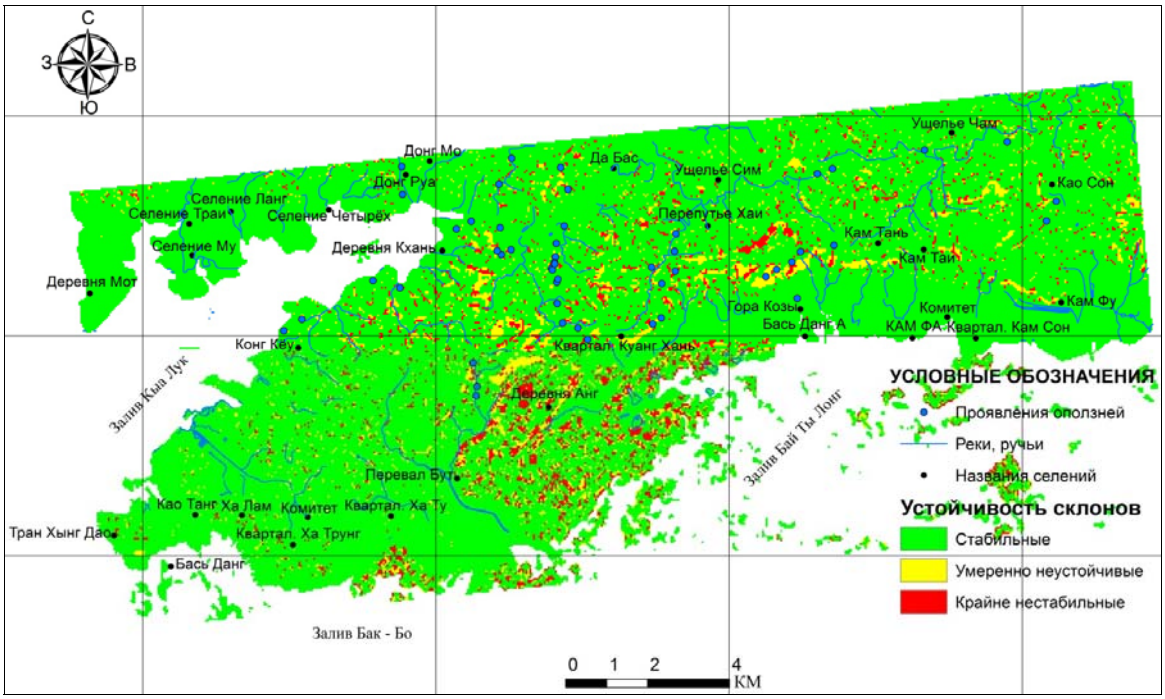

Рис 4.7. Карта регионального прогноза оползневой опасности склонов региона Ха Лонг – Кам Фа

Проведённое районирование территории (см. рис 4.7), показало:

Крайне-нестабильные – данная область занимает 4.5% исследуемой территории.

Умеренно-неустойчивые – 5.5% исследуемой территории.

Стабильные – 90% исследуемой территории.

4.3.3. Прогноз оползневой опасности с учётом сейсмического воздействия

Рассматриваемая территория является активной в сейсмическом отношении. Известные в данном районе землетрясения приурочены к крупным разломам, таким как Ха Лунг – Зыонг Хуи и Перевал Бут – Кам Фа. При построении государственной карты сейсмической активности Вьетнама для региона Ха Лонг – Кам Фа были установлены землетрясения с магнитудой $M_{мах}$ = 6,1 ÷ 6,5 по шкале Рихтера, и глубиной очага H = 15 ÷ 20 км. В 1988 году в южной части рассматриваемого региона произошло землетрясение магнитудой M = 4,8 по шкале Рихтера. Имеющаяся информация позволяет отнести регион к 8 бальной зоне по интенсивности (согласно международной сейсмической шкале MSK-64).

Землетрясения оказывают огромное влияние на устойчивость склонов. При прохождении сейсмической волны возникают инерционные силы, способные увеличить сдвиговые усилия и тем самым создать более благоприятные условия для формирования оползней.

В инженерной практике, при расчетах устойчивости склонов инерционные силы могут быть определены как:

$$F_h = \frac{a_h}{g} \cdot W = k_h \cdot W \qquad (4.13)$$

$$F_v = \frac{a_v}{g} \cdot W = k_v \cdot W \qquad (4.14)$$

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

Учёт дополнительных сил достаточно сложная задача при региональном прогнозе оползневой опасности. Именно поэтому, региональный прогноз оползневой опасности с учётом сейсмического воздействия выполняется крайне редко. Автор работы в пределах выбранной методики - использования модели SMORPH для оценки оползневой опасности с учётом сейсмического воздействия использовали подход, описанный Емельяновой Е.П., при котором действие землетрясения моделируется кратковременным наклоном склона на угол Δβ, величина которого, в зависимости от коэффициента сейсмичности приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4
Увеличение угла склона, в зависимости от интенсивности землетрясений по шкале MSK 64

Интенсивность землетрясений в баллах (по шкале MSK 64)	Коэффициент сейсмичности	Увеличение угла склона Δβ в градусах
6	0,05	3
7	0,1	6
8	0,2	12
9	0,4	24

Применение рассмотренного подхода изменило матрицу оползневой опасности (таблице 4.5), где теперь была учтена и сейсмическая составляющая.

Таблица 4.5
Матрица оползневой опасности для региона Ха Лонг – Кам Фа с учётом сейсмического воздействия 8 баллов

Кривизна поверхности склона	Градиент наклона поверхности склона (в процентах)			
	<= 3%	**<= 26%**	**<= 49%**	**> 49%**
Класс 1 < -0.5 выпуклая форма	Умеренно-неустойчивые участки	Крайне-нестабильные участки	Крайне-нестабильные участки	Крайне-нестабильные участки
-0.5 <= Класс 2<= 0.5 плоская форма	Стабильные участки	Стабильные участки	Умеренно-неустойчивые участки	Крайне-нестабильные участки
Класс 3 > 0.5 вогнутая форма	Стабильные участки	Стабильные участки	Стабильные участки	Умеренно-неустойчивые участки

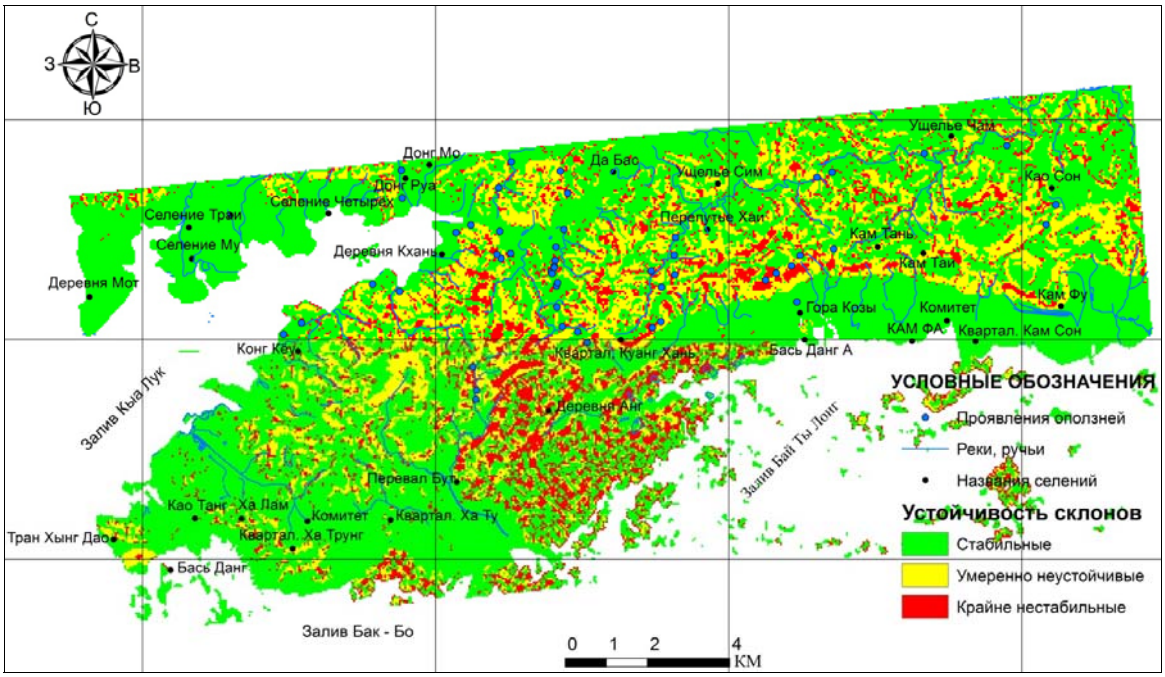

Рис 4.8. Карта регионального прогноза оползневой опасности склонов региона Ха Лонг – Кам Фа с учётом сейсмического воздействия в 8 баллов

В пределах рассматриваемой территории выделяются следующие области:

Крайне-нестабильные – склоны, характеризующиеся выпуклой формой, с уклоном более 3%, а так же плоские склоны с уклоном более 49%. Данная область занимает 11,8% исследуемой территории.

Умеренно-неустойчивые – пологие склоны выпуклой формы, крутые (более 26%) плоские склоны и очень крутые (более 49%) склоны вогнутой формы. Данная область занимает 19,6% исследуемой территории.

Стабильные – участки с пологими, умеренно крутыми и крутыми (до 49%) склонами вогнутой формы и пологие и умеренно крутые участки (до 26%) плоской формы. Данная область занимает 68,6% исследуемой территории.

Таким образом, сейсмическое воздействие может стать причиной неустойчивости склонов с выпуклой формой поверхности и неустойчивости склонов градиент наклона поверхности которых более 49%.

Выполненное районирование показало, что за счет сейсмического воздействия произойдет увеличение участков, подверженных оползневой опасности (рис 4.8). Так в **крайне-нестабильные** участки перейдет 11,8% исследуемой территории, **умеренно-неустойчивые -** 19,6%.

Заключение

Прогнозирование оползневой опасности базируется на комплексном использовании статистических и детерминистических методов оценки: по восприимчивости территории к оползневому процессу; по индексу стабильности склона (SINMAP) и основанное на морфометрических критериях склонов (SMORPH).

Выполнена оценка влияния сейсмических процессов на устойчивость оползневых склонов.

На основе выполненных исследований сделаны выводы и выработаны рекомендации по практической реализации полученных результатов.

1. Метод районирования территории по восприимчивости к оползневым процессам относительно прост в применении и даёт надежные результаты. В процессе районирования территории по восприимчивости выявлены наиболее опасные области в регионе Ха Лонг – Кам Фа на основе сочетания факторов оползнеобразования. В первую очередь это область распространения континентальных отложений толщи Хон Гайа, характеризующаяся высокими значениями интегрированного показателя Н. Это необходимо учитывать при планировании хозяйственного освоения территории.

2. В работе выполнено гидрогеологическо-математическое моделирование оползневого объекта, как динамической многофакторной системы. Исследовались оползни сдвига и оползни течения. В рамках выполняемой задачи проведен анализ факторов с оценкой инженерно-геологической обстановки на стационарных участках «породы Триасового возраста», «Четвертичными отложения».

На основе районирования территории по индексу стабильности определены потенциально оползнеопасные области с высоким уровнем нестабильности ($0.0 < SI \leq 0.5$) и низкой стабильностью ($0.5 < SI \leq 1.0$). К ним относятся некоторые области в центральной и юго-восточной части региона Ха Лонг – Кам Фа, сложенные породами триасового возраста (толща Хон Гаи) и четвертичными отложениями.

3. На основе использования морфометрическо-математического метода прогноза была разработана система, позволившая количественными методами оценить главные оползнеобразующие факторы с последующим созданием многофакторннх прогнозных моделей оползней, учитывающих режимные данные по сейсмическому воздействию.

Метод районирования территории по оползневой опасности, основанный на

морфометрических критериях склонов (SMORPH) тоже относительно прост в применении и даёт надежные результаты.

В процессе районирования в регионе Ха Лонг – Кам Фа выявлены территории различные по оползневой опасности (зоны): крайне-нестабильные; умеренно-неустойчивые; стабильные.

Самой высокой оползневой опасностью обладают склоны, сложенные элювием пород осадочного комплекса каменноугольно-пермского и триасового возраста.

Регион Ха Лонг – Кам Фа является активным в сейсмическом отношении. Землетрясения оказывают огромное влияние на устойчивость склонов. Региональное прогнозирование оползневой опасности в регионе Ха Лонг – Кам Фа проведено с учётом сейсмического воздействия в 8 баллов по шкале MSK 64. Сравнительный анализ полученных данных с картой оползневой опасности без учета сейсмического воздействия, показывает, что в результате прогнозного землетрясения в 8 баллов по шкале MSK 64 площадь оползнеопасных участков увеличивается более чем в пять раз, при этом площадь крайне-нестабильных участков увеличивается почти в три раза.

Полученные данные по оползневой опасности необходимо учитывать при планировании хозяйственного освоения территории. Рекомендуется ограничить техногенные нагрузки в крайне-нестабильных в оползневом отношении зонах, в умеренно-неустойчивых зонах при разработке планов территориального развития необходимо предусмотреть локальный прогноз оползневой опасности.

4. Сравнение результатов оползневой опасности, полученных различными методами показывает их хорошую сходимость.

Использованые методы регионального прогноза оползневой опасности взаимно дополняют друг друга, а получаемые в результате их сочетания прогнозные оценки имеют повышенную точность.

5. Полученные результаты оценки региональной оползневой опасности для региона Ха Лонг – Кам Фа показали их высокую степень надёжности и могут быть рекомендованы к применению при разработке планов комплексного освоения территории.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

[1]. **Зыонг, М.Х**. Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама / М.Х. Зыонг, И.К. Фоменко, В.В. Пендин // Журнал "Инженерная геология" . — 2013. — № 1/2013. — С. 46-54.

[2]. **Зыонг, М.Х**. Региональный прогноз оползневой опасности на основе морфометрических критериев рельефа (на примере района Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама) / М.Х. Зыонг, И.К. Фоменко, В.В. Пендин // Журнал "Разведка и охрана недр" . — 2013. — № 7/2013. — С. 30-34.

[3]. **Зыонг, М.Х**. Инженерно-геологические условия района Ха Лонг – Кам Фа с точки зрения прогноза оползневой опасности // Журнал "Геология и разведка" . — 2013. — № 4/2013. — С. 43-47.

Статьи и тезисы на российских и международных конференциях:

[1]. **Зыонг, М.Х**. Использование дистанционного зондирования и географической информационной системы (ГИС) для определения оползни в районе Ха Лонг – Кам Фа / М.Х. Зыонг, В.Т. Фам // Сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции. Горно-геологический университет Ханоя. 2008. ТОМ 3 — № 18/11. — С. 20-28 (на вьетнамском языке).

[2]. **Зыонг, М.Х**. Оценка риска развития оползневого процесса в регионе Мыонг Лаи – Вьетнама на основе дистанционного зондирования и ГИС // Доклады ученых к Междунар. конфи МГРИ-РГГРУ. — М., 2012. — С. 159.

[3]. **Зыонг, М.Х**. Метод регионального прогноза оползневой опасности по восприимчивости территории к оползневому процессу района Ха Лонг – Кам Фа Вьетнама на основе ГИС технологиях // Доклады ученых к Междунар. конфи МГРИ-РГГРУ. — М., 2013. ТОМ 2 — С. 361-364.

[4]. **Зыонг, М.Х**. Метод регионального прогноза оползневой опасности района Ха Лонг – Кам Фа Вьетнама, основанный на морфометрических критериях (SMORPH) // Доклады ученых к Междунар. конфи МГРИ-РГГРУ. — М., 2013. ТОМ 2 — С. 368-369.

[5]. **Зыонг, М.Х**. Метод регионального прогноза оползневой опасности района Ха Лонг – Кам Фа Вьетнама по индексу стабильности (SINMAP) // Труды к 80–летию кафедры инженерной геологии МГРИ-РГГРУ. — М., 2013. — С. 178-180.