



Научная статья

Оценка оползневой опасности с использованием метода соотношения частот и комбинированного фрактально-частотного метода на примере города Тиньтук провинции Каобанг (Вьетнам)

Зыонг Ван Бинь^{1,2}, И.К.Фоменко¹✉, Нгуен Чунг Киен³, О.В.Зеркаль⁴, О.Н.Сироткина⁴, Ву Хонг Данг⁵¹ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия² Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам³ Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам⁴ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия⁵ Вьетнамский институт геонаук и минеральных ресурсов, Ханой, Вьетнам

Как цитировать эту статью: Зыонг Ван Бинь, Фоменко И.К., Нгуен Чунг Киен, Зеркаль О.В., Сироткина О.Н., Ву Хонг Данг. Оценка оползневой опасности с использованием метода соотношения частот и комбинированного фрактально-частотного метода на примере города Тиньтук провинции Каобанг (Вьетнам) // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 613-624. EDN HTDPXJ

Аннотация. Во Вьетнаме, 3/4 территории которого занимают горные регионы, оползни являются одним из наиболее распространенных стихийных бедствий, приводящих к значительному материальному ущербу. Более 500 коммун в 17 горных провинциях на севере страны подвержены высокой и очень высокой опасности в результате развития оползней. Основной целью исследования было составление карт оползневой опасности и сравнительный анализ эффективности применяемых методов для района города Тиньтук, расположенного в провинции Каобанг. Оценка оползневой опасности выполнена с использованием метода соотношения частот (FR) и комбинированного фрактально-частотного метода (FFR). В основе метода FR заложен принцип актуализма, который предполагает, что факторы, приводящие к разрушениям склонов в прошлом и настоящем, могут вызвать оползни в будущем. Метод FFR базируется на определении фрактальной размерности, которая является мерой плотности заполнения оползнями участка исследований. В качестве исходных данных выбраны восемь факторов – высота над уровнем моря, расстояние до дорог, крутизна склонов, геологическое строение, расстояние от разломов, землепользование, экспозиция склона и расстояние до эрозионной сети, представленных в картографическом виде. Достоверность полученных карт оценивалась по площади под кривой ошибок (ROC-AUC), а оценка эффективности модели – с использованием индекса подтверждения (LR_{class}). Для исследуемой области было выделено пять зон: с очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой оползневой опасностью. Анализ достоверности полученных карт с использованием индексов AUC и LR_{class} показал, что модель FFR обладает более высокой степенью достоверности и эффективности (AUC = 86 %, LR_{class} = 86 %) в сравнении с моделью FR (AUC = 72 %, LR_{class} = 73 %) и ее использование является более предпочтительным.

Ключевые слова: фрактально-частотный метод; факторы оползнеобразования; оползневая опасность; геоинформационная система; ROC-AUC; Тиньтук; Вьетнам

Финансирование. Исследование выполнено в рамках национального научно-технического проекта № ĐTĐL.CN-81/21.

Поступила: 07.07.2023

Принята: 27.12.2023

Онлайн: 09.04.2024

Опубликована: 26.08.2024

Введение. Расположенный на восточной окраине материковой части Юго-Восточной Азии Вьетнам считается одной из наиболее динамично развивающихся стран в мире. Из-за тропического муссонного климата количество выпадающих во Вьетнаме осадков чрезвычайно велико и составляет от 3500 до 4500 мм в год. Такие условия способствуют развитию многочисленных оползней. Согласно данным Управления по борьбе со стихийными бедствиями (Ханой, октябрь 2019 г.), в период с 1953 по 2006 г. во Вьетнаме произошло 448 (в среднем по семь событий в год), а в период с 2000 по 2015 г. – 250 ливневых паводков и оползней (в среднем 15-16 событий в год),



т.е. наблюдается увеличение интенсивности развития оползневой процесса. Эти события стали причиной значительного социально-экономического ущерба [1-3]. Для содействия устойчивому развитию горных районов правительство Вьетнама разрабатывает стратегию предотвращения стихийных бедствий и смягчения их последствий, одной из основных целей которой является составление карт оползневой восприимчивости и опасности. Выполнено большое количество исследований, направленных на изучение развития оползневых процессов. Например, по результатам изучения 10266 оползневых участков в горных провинциях на севере Вьетнама, проведенного с 2012 по 2017 г., было выделено более 500 коммун в 17 горных провинциях, для которых характерна высокая и очень высокая оползневая опасность.

Каобанг – одна из северных провинций Вьетнама площадью 6690 км² (рис.1). Горный рельеф, сложные инженерно-геологические условия и тропический муссонный климат с высоким среднегодовым количеством осадков способствуют широкому развитию оползневой процесса, а расположенный в южной части провинции район Нгуенбинь считается одним из регионов с очень высокой оползневой опасностью [4]. Область исследований охватывает площадь 66,76 км², включая г. Тиньтук, который находится в 18 км от центра района Нгуенбинь, и его окрестности. Отметки рельефа колеблются от 434 м в долине до 1932 м (пик Фиа Оак) в горной местности над уровнем моря [5].

Для достижения основной цели – построения карты оползневой опасности г. Тиньтук провинции Каобанг (Вьетнам) были использованы два метода: статистический метод соотношения частот (Frequency ratio – FR) и комбинированный фрактально-частотный метод (Fractal-frequency ratio – FFR). В результате построены карты оползневой опасности исследуемой территории. Дополнительно подтверждена более высокая эффективность комбинированного FFR в сравнении с обычным методом FR.

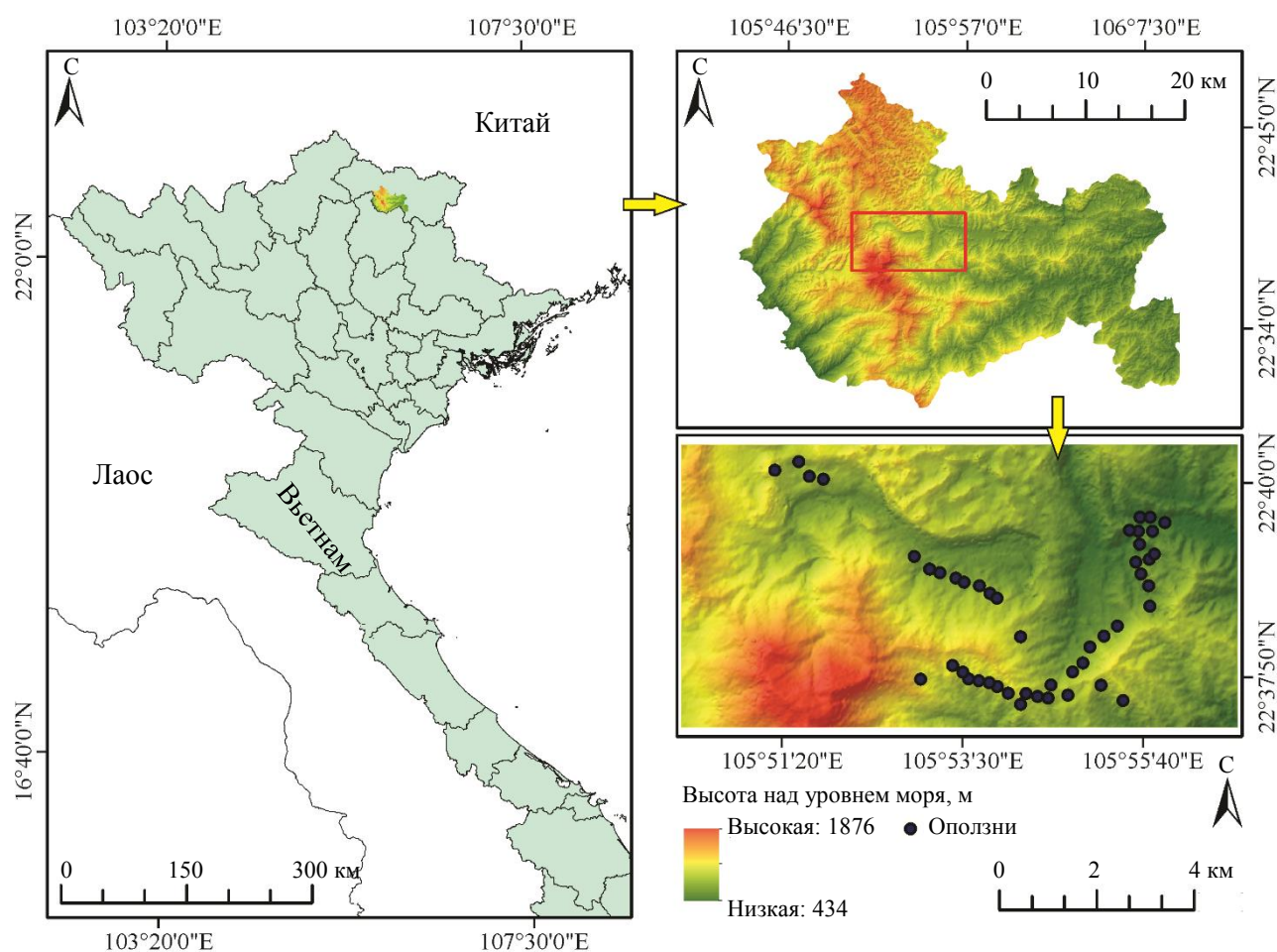


Рис.1. Расположение района исследования



Методы. Разработка карт оползневой восприимчивости территорий зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и факторами оползнеобразования, которые должны быть учтены при выполнении анализа. Главной задачей при их построении является прогноз пространственного распределения оползней. Результаты оценки оползневой восприимчивости являются основой для типизации территории по оползневой опасности. Такая оценка требует комплексного анализа значительных массивов данных, поэтому все большее применение находят методики, основанные на использовании геоинформационных систем (ГИС) [2, 6, 7]. Развитие методов геоинформационного анализа и математической статистики сделали моделирование оползневой восприимчивости доступным, удобным и возможным как при научном анализе, так и экономической оценке прогнозного освоения территорий [8]. Благодаря своей простоте и эффективности, статистические методы занимают особое место среди этих работ [9, 10]. Их основное преимущество заключается в том, что оценка значимости для различных классов факторов может быть получена статистически из данных об оползнях, произошедших на исследуемой территории в прошлом. В последние годы с целью повышения достоверности статистические методы были модифицированы [11, 12] или было проведено их комбинирование с другими методами [13, 14].

Метод соотношения частот. Благодаря простоте использования и высокому уровню достоверности получаемых результатов метод FR, основанный на анализе соотношения частот событий, является мощным инструментом для оценки оползневой восприимчивости [15]. В его основе заложен принцип актуализма, и он предполагает, что факторы, которые приводили к разрушениям склонов в прошлом и настоящем, могут вызвать оползни в будущем. Таким образом, знание исторических оползневых событий играет важную роль в прогнозировании оползневой опасности. Количественно связь между участками оползней и факторами, способствующими их развитию, можно определить на основе метода соотношения частот [16]. После разделения факторов оползнеобразования на классы значение частоты определяется с использованием уравнения [3]

$$FR = \frac{P_{LS}}{P_C} = \frac{L_i / \sum L_i}{A_i / \sum A_i}, \quad (1)$$

где P_{LS} – процент оползней в пределах каждого класса факторов; P_C – процент площади каждого класса факторов; L_i – количество оползней в классе факторов i ; $\sum L_i$ – общее количество оползней в районе исследования; A_i – площадь класса фактора i ; $\sum A_i$ – площадь района исследования.

Использовалась нормированная частота

$$NFR = \frac{FR_i}{\sum_{i=1}^n FR_i}, \quad (2)$$

где FR_i – значение FR класса фактора i .

Индекс оползневой восприимчивости при данном подходе рассчитывается так:

$$LSI = \sum_{i=1}^n NFR_i. \quad (3)$$

Фрактально-частотный метод. В геологическую практику активно внедряются подходы, основанные на теории фракталов [17, 18]. Опубликовано большое количество работ, посвященных применению фрактального анализа при решении геологических задач. В значительной степени в них просто фиксируются свойства самоподобия для разных объектов и процессов. В то же время на основании результатов такого анализа можно делать важные заключения о типе рассматриваемых систем с точки зрения регулярности и прогнозируемости их динамики [19]. Общепринятого строгого определения фрактала нет. В исследовании [20] Бенуа Мандельброт определил фрактал как «множество, размерность Хаусдорфа – Безиковича (фрактальная размерность) для которого



строго больше его топологической размерности». Он же выделил три основных качества фракталов: самоподобная форма (масштабная инвариантность), наличие элементов случайности и необычная размерность.

В последние годы подходы, основанные на теории фракталов, широко использовались для пространственного анализа, включая планирование и развитие городов [21], изменение длины береговой линии [22], анализа эволюции растительного покрова [23], а также при оценке оползневой опасности территорий [24, 25]. Наибольшую эффективность показали гибридные методы, такие как метод фрактально-информационной связи [26] и фрактально-частотный метод [27].

В основе фрактального подхода лежит степенной закон

$$p(r) \propto \frac{C}{r^D}, \quad (4)$$

где r – характеристика измеряемой шкалы (масштаб рассмотрения); p – значение, определенное по соответствующей шкале r ; C – постоянный коэффициент; D – фрактальная размерность [28].

Фрактальная размерность является мерой плотности заполнения пространства, а в случае оценки восприимчивости территории к оползневому процессу – мерой плотности заполнения оползнями участка исследований. Таким образом, количественно связь между участками оползней и факторами, способствующими их развитию, можно определить на основе расчета фрактальной размерности – чем она больше, тем выше вес фактора в развитии оползневого процесса [29].

Для оценки веса факторов был использован фрактальный метод переменной размерности (Variable dimension fractal method – VDFM) [28, 30]. Алгоритм использования метода VDFM включает следующие шаги [28]:

- вычисление относительной плотности оползней (P_L);
- ранжирование классов в порядке убывания значения P в соответствии с r ;
- построение фрактальной модели для определения значения размерности D путем линейной подгонки данных, нанесенных на двойные логарифмические координаты S, r . Набор этих значений может быть получен из исходных значений P, r, P_L – относительная плотность оползней в каждом классе факторов; S – кумулятивная сумма значений P_L ; S_{Li} – кумулятивная сумма значений класса фактора i ;

$$\begin{aligned} \{P_L\} &= \{P_{L1}, P_{L2}, \dots, P_{Ln}\}; \\ \{S_1\} &= \{P_{L1}, P_{L1} + P_{L2}, \dots, P_{L1} + P_{L2} + \dots + P_{Ln}\}; \\ \{S_2\} &= \{S_{11}, S_{11} + S_{12}, \dots, S_{11} + S_{12} + \dots + S_{1n}\}. \end{aligned} \quad (5)$$

В качестве критерия для приостановки преобразования кумулятивной суммы использовался коэффициент корреляции линейной подгонки, удовлетворяющий условию $R^2 > 0,999$.

В результате вес каждого фактора может быть рассчитан так:

$$W_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}. \quad (6)$$

Для расчета индекса оползневой восприимчивости в методе FFR используется нормированная частота, которая определяется на основе метода FR, согласно уравнению (2).

Итоговый индекс оползневой восприимчивости рассчитывается по формуле

$$LSI = \sum_{i=1}^n NFR_i W_i, \quad (7)$$

где NFR_i – значение NFR класса фактора i .



Карта инвентаризации оползней. Эффективная модель оползневой опасности должна обеспечивать максимальное соответствие между наблюдаемыми и прогнозируемыми оползнями. Чтобы оценить качество модели, нужно сопоставить прогнозную карту оползневой опасности с существующей картой инвентаризации оползней, поэтому подготовка этих карт имеет важное значение [31].

Карта инвентаризации оползней (Landslide inventory map – LIM) – это карта, на которой показано распределение существующих проявлений оползневых процессов. Она содержит как информацию о количестве, размере и местоположении оползней, так и качественную, описательную информацию о связанных с ними опасностях и морфологических характеристиках [32]. При построении карт инвентаризации оползней используются различные подходы, которые можно разделить на три группы [3, 33]:

- методы, основанные на визуальной интерпретации;
- полуавтоматические методы;
- автоматические методы, построенные на использовании обучающей выборки.

Карта инвентаризации оползней была составлена на основе дешифрирования данных аэрофотосъемки и результатов полевых исследований. Выявлено в общей сложности 47 оползневых участков, при этом наименьший объем оползня составил 60 м^3 , а максимальный – 50000 м^3 . Большинство оползней зафиксировано вдоль дорог в низкогорных районах. Карта инвентаризации оползней приведена на рис.1.

Факторы оползнеобразования. Разработка карты оползневой опасности зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и факторами оползнеобразования. Строгих рекомендаций по их выбору не существует. Для различных территорий набор таких факторов может существенно отличаться [34]. Основываясь на статистическом анализе, Х.Р.Пургасеми [35] показал, что в 94 % опубликованных в период с 2005 по 2016 г. исследований важнейшим фактором, определяющим оползневую опасность, считалась крутизна склона, за которой следовали литология, экспозиция склона, землепользование и высота над уровнем моря (рис.2).

Исходя из имеющихся данных об особенностях проявления оползневого процесса для составления карт оползневой восприимчивости и оползневой опасности были выбраны восемь факторов: высота над уровнем моря, расстояние до дорог, крутизна склонов, геологическое строение, расстояние от разломов, тип землепользования, экспозиция склонов и расстояние до эрозионной сети. Использованная в работе цифровая модель рельефа (DEM) с разрешением 12,5 м была предоставлена Институтом геологических наук Вьетнамской академии науки и технологий. На ее основе созданы тематические карты факторов высоты над уровнем моря (рис.3, а), крутизны склонов



Рис.2. Пятнадцать наиболее значимых факторов оползнеобразования

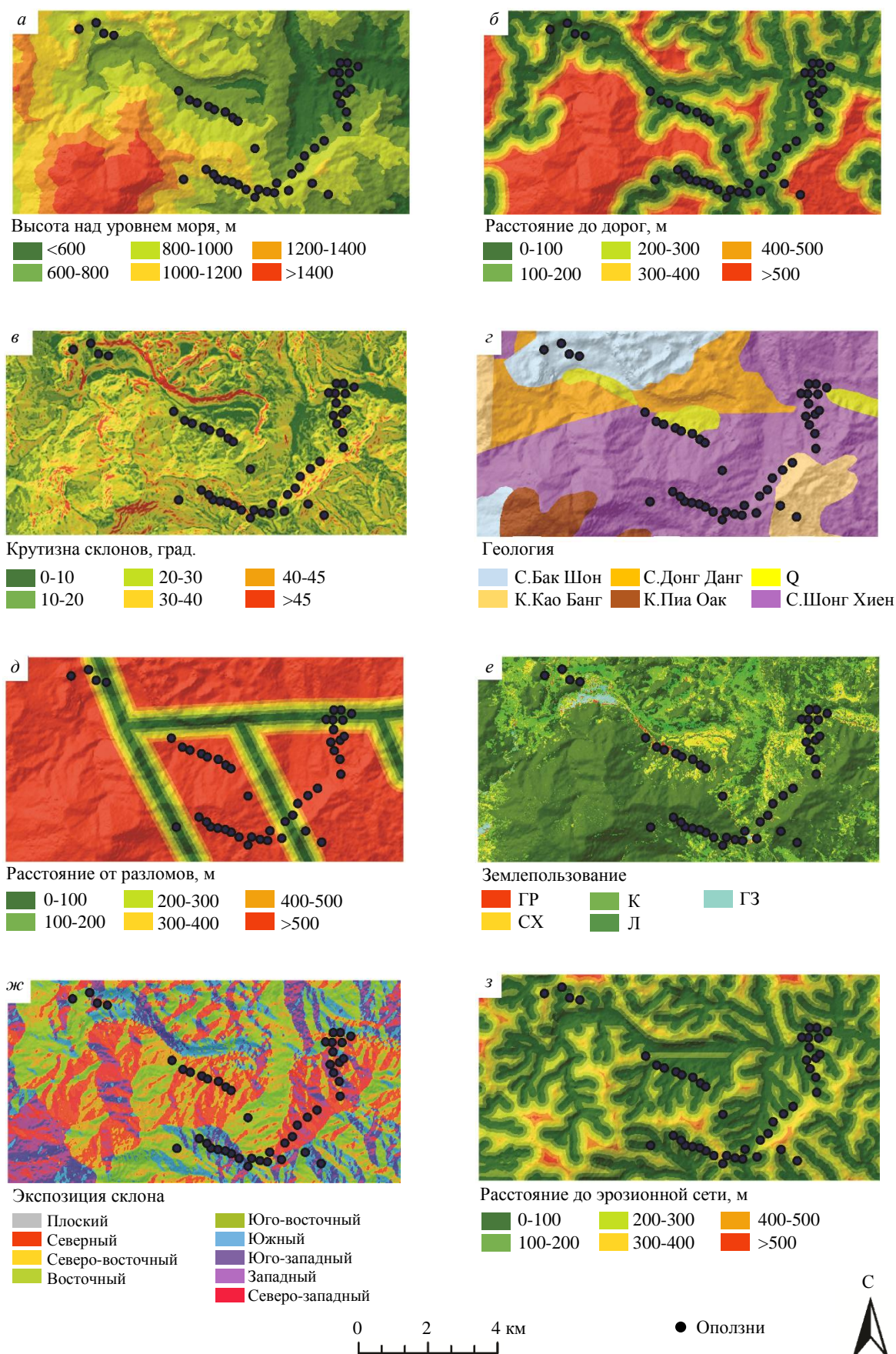


Рис.3. Карты факторов высоты над уровнем моря (а); расстояния до дорог (б); крутизны склонов (в); геологического строения (г); расстояния от разломов (д); землепользования (е); экспозиции склонов (ж); расстояния до эрозионной сети (з)



(рис.3, в), экспозиции склонов (рис.3, ж), расстояния до эрозионной сети (рис.3, з). При их построении каждый фактор был разделен на классы, при этом факторы высоты над уровнем моря и крутизны склонов – на шесть классов, а фактор экспозиции склонов – на девять. Тематические карты расстояния до дорог (рис.3, б), эрозионной сети (рис.3, з) и от разломов (рис.3, д) созданы с использованием инструмента «Euclidean Distance» в геоинформационной системе ArcGIS с разделением на шесть классов. Карта землепользования (рис.3, е) получена в результате дешифрирования и классификации спутниковых изображений Sentinel-2. В результате выделены следующие классы: городской район (ГР), сельскохозяйственные территории (СХ), кустарники (К), леса (Л) и земли, лишенные растительности (ГЗ). Для учета фактора геологического строения (рис.3, з) выделено шесть областей, в которых верхняя часть геологического разреза представлена четвертичными отложениями (Q), отложениями свит Бак Шон, Донг Данг и Шонг Хиен, комплексов Као Банг и Пиа Оак.

Верификация модели. Важным этапом подготовки карт оползневой опасности является определение степени соответствия полученных моделей реальным фактическим данным. Эта задача может быть решена сравнением полученных карт оползневой опасности территории с картой инвентаризации оползней [3]. Когда модель прогноза оползневой опасности может предсказать наибольшее количество оползней в зоне с очень высокой опасностью и ни одного в зоне с очень низкой опасностью, она считается наиболее достоверной. В данной статье верификация осуществлялась с использованием метода анализа кривой ошибок (Receiver operating characteristic – ROC) [36]. ROC-анализ – метод оптимального разграничения двух классов, сформированных с помощью диагностического теста. Кривая ROC представляет собой графическое отображение взаимосвязи между вероятностью истинно положительных значений (правильно предсказанным событием), или чувствительностью по оси Y, и вероятностью ложноположительных значений (неправильно предсказанным событием), или 1 – Специфичностью по оси X. Чем ближе кривая ROC приближается к левому краю графика и верхней его границе, тем достовернее будут результаты выполненного анализа. Мерой адекватности модели может служить площадь под кривой ROC (Area under curve – AUC) – чем больше площадь, тем точнее классификация. Значения AUC могут изменяться от 0,5 для моделей с нулевой точностью прогнозирования до 1,0 для моделей с идеальной точностью. Основываясь на классификации Шимундича [37], достоверность полученных карт может быть оценена в соответствии со значением AUC следующим образом, %: 90-100 – отличная; 80-90 – очень хорошая; 70-80 – хорошая; 60-70 – достаточная; 50-60 – плохая. Предыдущие исследования показали, что подход ROC-AUC сам по себе не может обеспечить объективную оценку достоверности моделей [38, 39], так как его результаты зависят от площади выделяемых в зависимости от опасности зон. Учитывая этот факт, в настоящем исследовании дополнительно к показателю AUC использовался индекс подтверждения – LR_{class} [40, 41]. При этом подходе показатель AUC применялся для определения общей эффективности моделей прогнозирования, а индекс LR_{class} – для оценки эффективности прогнозирования в каждой выделенной зоне оползневой опасности.

Обсуждение результатов. Была проанализирована взаимосвязь между факторами, вызывающими оползни, и фактическим возникновением оползней в районе проводимых исследований. Анализ результатов оценки оползневой восприимчивости территории, полученных с использованием метода FR, показал высокую восприимчивость к оползневому процессу участков с высотами над уровнем моря менее 600 м и крутизной склонов от 30 до 40°. Отмечается повышенная концентрация оползней на расстоянии 100 м от дорог и 200 м от разломов, а также в городских и сельскохозяйственных районах. Наблюдается корреляционная связь между увеличением частоты оползней и уменьшением расстояния до эрозионной сети. В геологическом отношении оползни наиболее часто образуются в грунтах четвертичного генезиса и в отложениях свиты Шонг Хиен.

На рис.4 и в таблице приведены результаты фрактального анализа. Фрактальная размерность использовалась для вычисления веса факторов в соответствии с формулой (6). Рассмотрение полученных результатов показало, что наибольшую роль в возникновении оползней на исследуемой территории играет высота над уровнем моря, за которой в порядке убывания значимости следуют экспозиция склонов, их крутизна, расстояние от разломов, расстояние до эрозионной сети, геологическое строение, землепользование и расстояние до дорог.

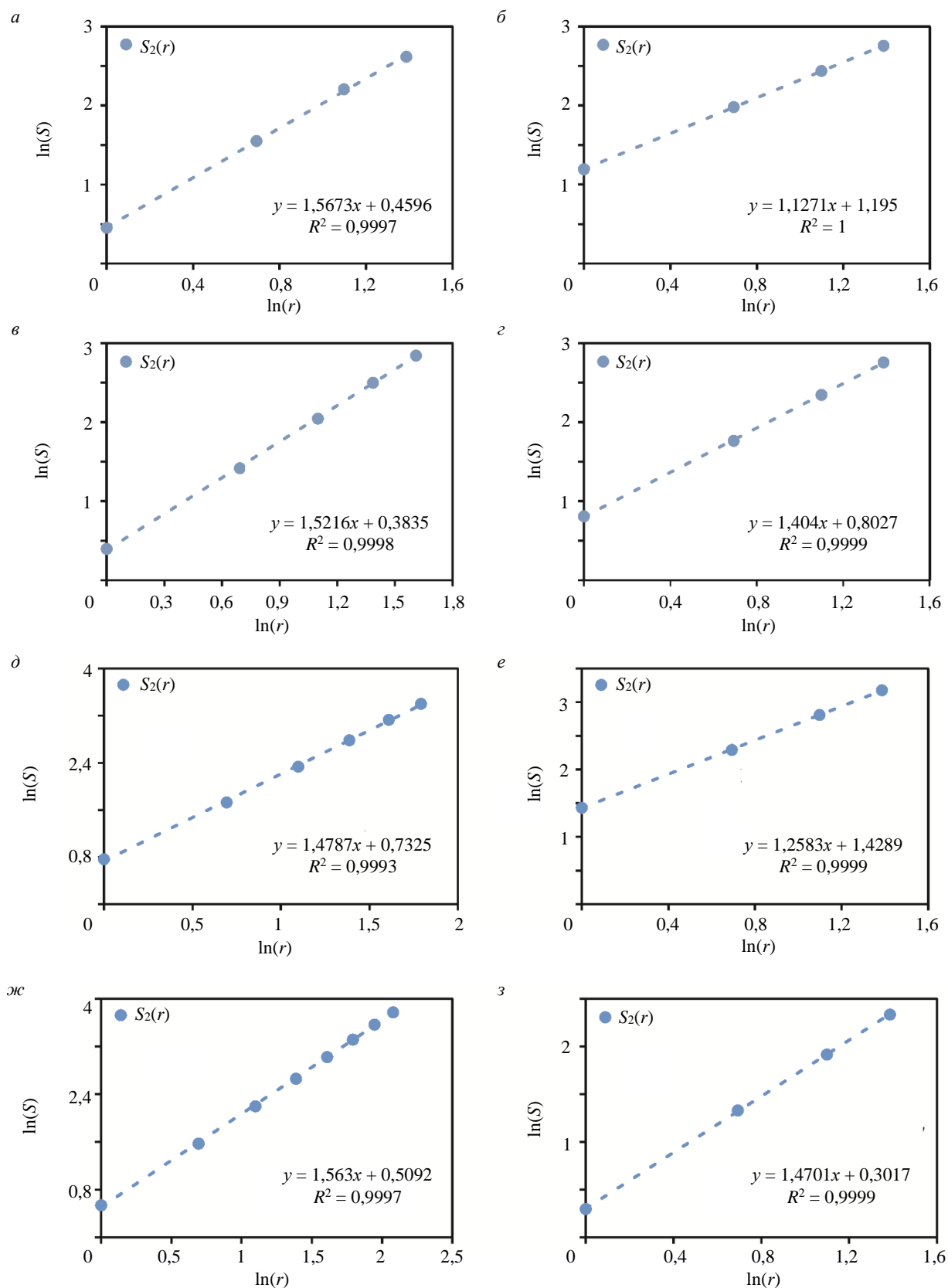


Рис.4. Определение фрактальной размерности факторов оползнеобразования: а – высота над уровнем моря; б – расстояние до дорог; в – крутизна склонов; г – геологическое строение; д – расстояние от разломов; е – землепользование; ж – экспозиция склона; з – расстояние до эрозионной сети



Вес факторов, рассчитанный на основе фрактального анализа

Фактор	Формула линейной регрессии	Коэффициент корреляции R^2	Фрактальная размерность D_i	Вес W_i
Высота над уровнем моря	$y = 1,5673x + 0,4596$	0,9997	1,5673	0,138
Расстояние до дорог	$y = 1,1271x + 1,195$	1	1,1271	0,099
Крутизна склонов	$y = 1,5216x + 0,3835$	0,9998	1,5216	0,134
Геологическое строение	$y = 1,404x + 0,8027$	0,9999	1,4040	0,123
Расстояние от разломов	$y = 1,4787x + 0,7325$	0,9993	1,4787	0,130
Землепользование	$y = 1,2583x + 1,4289$	0,9999	1,2583	0,110
Экспозиция склона	$y = 1,563x + 0,5092$	0,9997	1,5630	0,137
Расстояния до эрозионной сети	$y = 1,4701x + 0,3017$	0,9999	1,4701	0,129

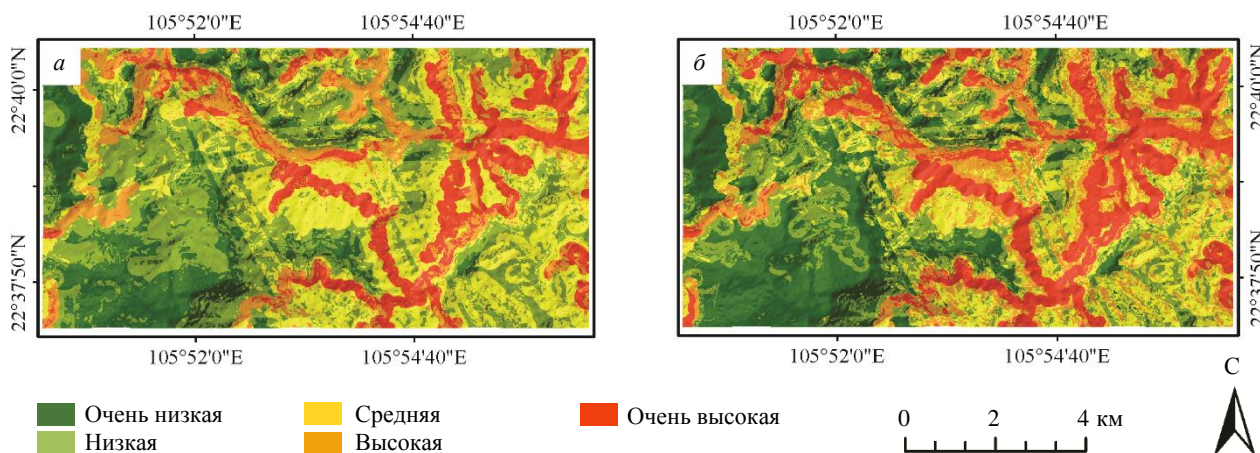


Рис.5. Карта оползневой опасности, полученная методом FR (а); методом FFR (б)

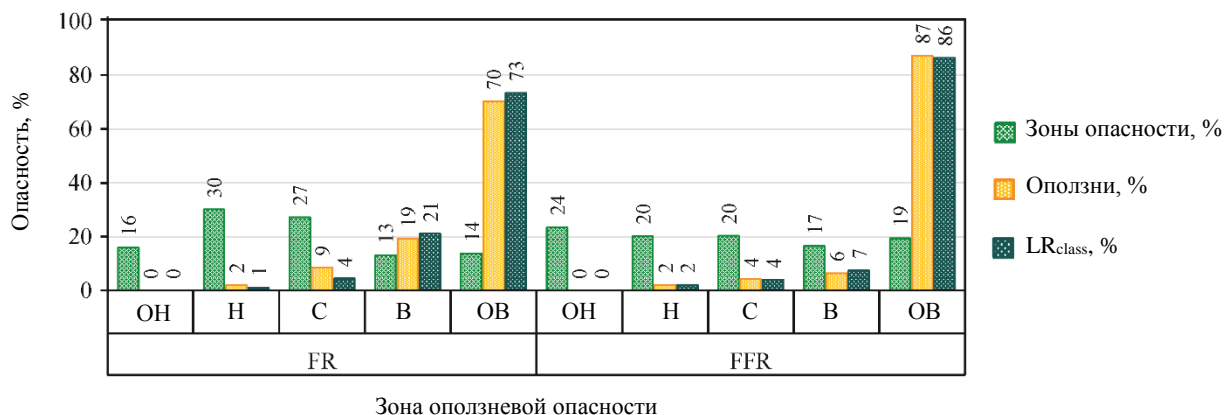


Рис.6. Результаты оценки оползневой опасности и достоверности моделей по анализу LR_{class}

Значения индекса оползневой восприимчивости для метода FR изменяются от 0,446 до 3,149, для метода FFR от 0,057 до 0,375. С использованием метода классификации естественных границ Дженкса (англ. Jenks natural breaks) на основе карт LSI выполнена типизация территории по оползневой опасности. В результате район исследования разделен на пять зон: с очень низкой (ОН), низкой (Н), средней (С), высокой (В) и очень высокой (ОВ) оползневой опасностью (рис.5).

На рис.6 приведены рассчитанные на основе используемых методов площади зон оползневой опасности. Методом FFR, в сравнении с методом FR, получена большая площадь зоны с очень низкой оползневой опасностью. Напротив, методом FR – большая площадь зон низкой и средней оползневой опасности. Зона с очень высокой оползневой опасностью предсказана методом FFR (19 %). На рис.6 приведено распределение оползней по количеству в выделенных зонах оползневой опасности. Обе модели имеют хорошую эффективность. К зоне с очень высокой оползневой опасностью на основе метода FR отнесено 70 %, на основе метода FFR – 87 % оползней.

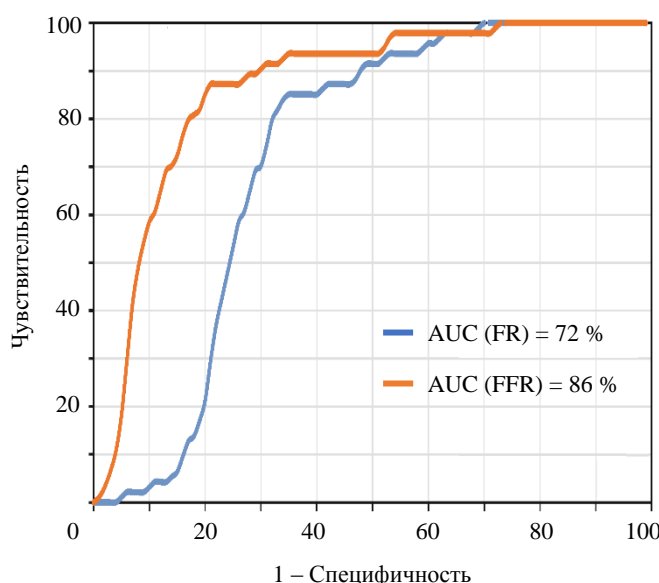


Рис. 7. График, иллюстрирующий достоверность моделей FR и FFR по ROC-анализу

Кривые ROC (рис. 7), характеризующие достоверность полученных результатов, также доказали высокую точность выполненного прогноза оползневой опасности. Метод FR показал «хорошую» достоверность прогноза ($AUC = 72\%$), а метод FFR достиг «очень хорошей» достоверности прогноза ($AUC = 86\%$) [37].

Результаты расчета индекса LR_{class} (см. рис. 6) для моделей FR ($LR_{class} = 73\%$) и FFR ($LR_{class} = 86\%$) согласуются с результатами, полученными на основе анализа кривой ROC. Это также показывает, что хотя метод FFR предсказывал большую площадь зоны с очень высокой опасностью, он не переоценил ее в районе исследований. Таким образом, модель оползневой опасности, полученная на основе метода FFR, обладает большей эффективностью в сравнении с обычным статистическим методом.

Заключение. Достоверность оценки оползневой опасности зависит от множества причин, включая используемые методы прогноза. В данном исследовании применялось два метода – FR и FFR. Для результатов, полученных на основе методов FFR и FR, было проведено сопоставление. Отмечено значительное повышение качества прогноза оползневой опасности. Согласно модели FFR 24 % площади находится в зоне низкой оползневой опасности, в то время как по модели FR к данной зоне было отнесено только 16 % площади исследуемой территории. Полученный результат имеет важное практическое значение при планировании развития территорий, в том числе проектировании устойчивых жилых сообществ, которые не будут подвержены воздействию стихийных бедствий. Значительная разница в достоверности моделей, полученных методами FFR и FR (14 % на основе ROC-анализа и 13 % с использованием индекса LR_{class}), стала для авторов в определенной степени неожиданным результатом. Его проверка является дальнейшим направлением проводимых исследований. Итоговые результаты позволяют сформулировать важное заключение – для повышения достоверности карт оползневой опасности весьма перспективным направлением является использование комбинированных методов, включающих фрактальный анализ.

Авторы выражают благодарность Институту геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий за предоставление исходных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Quynh Duy Bui, Hang Ha, Dong Thanh Khuc et al. Landslide susceptibility prediction mapping with advanced ensemble models: Son La province, Vietnam // *Natural Hazards*. 2023. Vol. 116. Iss. 2. P. 2283-2309. DOI: 10.1007/s11069-022-05764-3
2. Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Ву Х.Д. и др. Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геоинформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама) // *Инженерная геология*. 2021. Т. XVI. № 2. С. 6-20. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20
3. Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Нгуен Ч.К. и др. Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 4. С. 126-140. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3473
4. Nguyen Thi Hoa, Nguyen Quoc Phi, Pham Dinh Manh. Assessment of the current status of geological hazards in Nguyen Binh district, Cao Bang province using open data sources (In Vie) / *Earth sciences and natural resource for sustainable development*. Hanoi, 2022. P. 510-514. URL: <https://ersd.humg.edu.vn/ersd/ersd2022/book5> (дата обращения 06.07.2023).
5. Nguyen Trung Kien, The Viet Tran, Vy Thi Hong Lien et al. Landslide Susceptibility Mapping Based on the Combination of Bivariate Statistics and Modified Analytic Hierarchy Process Methods: A Case Study of Tinh Tuc Town, Nguyen Binh District, Cao Bang Province, Vietnam // *Journal of Disaster Research*. 2021. Vol. 16. № 4. P. 521-528. DOI: 10.20965/jdr.2021.p0521
6. Krivoguz D., Bespalova L. Landslide susceptibility analysis for the Kerch Peninsula using weights of evidence approach and GIS // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 20. № ES1003. DOI: 10.2205/2020ES000682



7. Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 22-33.
8. Нгуен Ч.К., Фоменко И.К., Пендин В.В., Нгуен К.Т. Применение метода анализа иерархий при региональной оценке оползневой опасности (на примере района Северо-Западный Лаокай, Вьетнам) // Геоинформатика. 2017. № 2. С. 53-66.
9. Anis Z., Wissem G., Vali V. *et al.* GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia // Open Geosciences. 2019. Vol. 11. Iss. 1. P. 708-726. DOI: [10.1515/geo-2019-0056](https://doi.org/10.1515/geo-2019-0056)
10. Ram P., Gupta V., Devi M., Vishwakarma N. Landslide susceptibility mapping using bivariate statistical method for the hilly township of Mussoorie and its surrounding areas, Uttarakhand Himalaya // Journal of Earth System Science. 2020. Vol. 129. Iss. 1. № 167. DOI: [10.1007/s12040-020-01428-7](https://doi.org/10.1007/s12040-020-01428-7)
11. Langping Li, Hengxing Lan, Changbao Guo *et al.* A modified frequency ratio method for landslide susceptibility assessment // Landslides. 2017. Vol. 14. Iss. 2. P. 727-741. DOI: [10.1007/s10346-016-0771-x](https://doi.org/10.1007/s10346-016-0771-x)
12. Sifa S.F., Mahmud T., Tarin M.A., Haque D.M.E. Event-based landslide susceptibility mapping using weights of evidence (WoE) and modified frequency ratio (MFR) model: a case study of Rangamati district in Bangladesh // Geology, Ecology, and Landscapes. 2020. Vol. 4. Iss. 3. P. 222-235. DOI: [10.1080/24749508.2019.1619222](https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1619222)
13. Feby B., Achu A.L., Jimnisha K. *et al.* Landslide susceptibility modelling using integrated evidential belief function based logistic regression method: A study from Southern Western Ghats, India // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2020. Vol. 20. № 100411. DOI: [10.1016/j.rsase.2020.100411](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100411)
14. Polykretis C., Grillakis M.G., Argyriou A.V. *et al.* Integrating Multivariate (GeoDetector) and Bivariate (IV) Statistics for Hybrid Landslide Susceptibility Modeling: A Case of the Vicinity of Pinios Artificial Lake, Iliia, Greece // Land. 2021. Vol. 10. Iss. 9. № 973. DOI: [10.3390/land10090973](https://doi.org/10.3390/land10090973)
15. Silalahi F.E.S., Pamela, Arifianti Y., Hidayat F. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia // Geoscience Letters. 2019. Vol. 6. № 10. DOI: [10.1186/s40562-019-0140-4](https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4)
16. Karaman M.O., Çabuk S.N., Pekkan E. Utilization of frequency ratio method for the production of landslide susceptibility maps: Karaburun Peninsula case, Turkey // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Iss. 60. P. 91285-91305. DOI: [10.1007/s11356-022-21931-2](https://doi.org/10.1007/s11356-022-21931-2)
17. Mandelbrot B. How Long is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension // Science. 1967. Vol. 156. Iss. 3775. P. 636-638. DOI: [10.1126/science.156.3775.636](https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636)
18. Mandelbrot B.B. Fractal Analysis and Synthesis of Fracture Surface Roughness and Related Forms of Complexity and Disorder // International Journal of Fracture. 2006. Vol. 138. Iss. 1-4. P. 13-17. DOI: [10.1007/s10704-006-0037-z](https://doi.org/10.1007/s10704-006-0037-z)
19. Захаров В.С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2014. 35 с.
20. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. New York: W.H. Freeman and Company, 1982. 460 p.
21. Xiaoming Man, Yanguang Chen. Fractal-Based Modeling and Spatial Analysis of Urban Form and Growth: A Case Study of Shenzhen in China // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. Iss. 11. № 672. DOI: [10.3390/ijgi9110672](https://doi.org/10.3390/ijgi9110672)
22. Husain A., Reddy J., Bisht D., Sajid M. Fractal dimension of coastline of Australia // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 6304. DOI: [10.1038/s41598-021-85405-0](https://doi.org/10.1038/s41598-021-85405-0)
23. Luxiao Cheng, Ruyi Feng, Lizhe Wang. Fractal Characteristic Analysis of Urban Land-Cover Spatial Patterns with Spatiotemporal Remote Sensing Images in Shenzhen City (1988-2015) // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 22. № 4640. DOI: [10.3390/rs13224640](https://doi.org/10.3390/rs13224640)
24. Lei Gui, Kunlong Yin, Thomas Glade. Landslide displacement analysis based on fractal theory, in Wanzhou District, Three Gorges Reservoir, China // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2016. Vol. 7. Iss. 5. P. 1707-1725. DOI: [10.1080/19475705.2015.1137241](https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1137241)
25. Ting-yu Zhang, Ling Han, Heng Zhang *et al.* GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid integration approaches of fractal dimension with index of entropy and support vector machine // Journal of Mountain Science. 2019. Vol. 16. Iss. 6. P. 1275-1288. DOI: [10.1007/s11629-018-5337-z](https://doi.org/10.1007/s11629-018-5337-z)
26. Wei Feng, Yaming Tang, Bo Hong. Landslide Hazard Assessment Methods along Fault Zones Based on Multiple Working Conditions: A Case Study of the Lixian-Luojiabu Fault Zone in Gansu Province (China) // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 13. № 8098. DOI: [10.3390/su14138098](https://doi.org/10.3390/su14138098)
27. Xiaolong Deng, Guangji Sun, Naiwu He, Yonghua Yu. Landslide susceptibility mapping with the integration of information theory, fractal theory, and statistical analyses at a regional scale: a case study of Altay Prefecture, China // Environmental Earth Sciences. 2022. Vol. 81. Iss. 13. № 346. DOI: [10.1007/s12665-022-10470-1](https://doi.org/10.1007/s12665-022-10470-1)
28. Hu Q., Zhou Y., Wang S.X. *et al.* Fractal-based spatial distribution analysis of geological hazards and measurement of spatial association with hazard-related predisposing factors // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020. Vol. XLII-3/W10. P. 125-131. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-125-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-125-2020)
29. Changjiang Li, Tuhua Ma, Leling Sun *et al.* Application and verification of a fractal approach to landslide susceptibility mapping // Natural Hazards. 2012. Vol. 61. Iss. 1. P. 169-185. DOI: [10.1007/s11069-011-9804-x](https://doi.org/10.1007/s11069-011-9804-x)
30. Ni Zhihui, Wu Lichun, Wang Ming-hui *et al.* The Fractal Dimension of River Length Based on the Observed Data // Journal of Applied Mathematics. 2013. Vol. 2013. № 327297. DOI: [10.1155/2013/327297](https://doi.org/10.1155/2013/327297)
31. Nikhil Prakash, Andrea Manconi, Simon Loew. A new strategy to map landslides with a generalized convolutional neural network // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 9722. DOI: [10.1038/s41598-021-89015-8](https://doi.org/10.1038/s41598-021-89015-8)
32. Gerzsenyi D., Albert G. Landslide inventory validation and susceptibility mapping in the Gerecse Hills, Hungary // Geospatial Information Science. 2021. Vol. 24. Iss. 3. P. 498-508. DOI: [10.1080/10095020.2020.1870872](https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1870872)
33. Su Z., Chow J.K., Tan P.S. *et al.* Deep convolutional neural network-based pixel-wise landslide inventory mapping // Landslides. 2021. Vol. 18. Iss. 4. P. 1421-1443. DOI: [10.1007/s10346-020-01557-6](https://doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6)
34. Pospéhov G.B., Savón Y., Delgado R. *et al.* Inventory of Landslides Triggered by Hurricane Matthews in Guantánamo, Cuba // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. № 1. P. 55-63. DOI: [10.24057/2071-9388-2022-133](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-133)



35. Pourghasemi H.R., Yansari Z.T., Panagos P., Pradhan B. Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005-2016 (periods of 2005-2012 and 2013-2016) // *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11. Iss. 9. № 193. DOI: [10.1007/s12517-018-3531-5](https://doi.org/10.1007/s12517-018-3531-5)
36. Swets J.A. Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems // *Science*. 1988. Vol. 240. Iss. 4857. P. 1285-1293. DOI: [10.1126/science.3287615](https://doi.org/10.1126/science.3287615)
37. Šimundić A.-M. Measures of Diagnostic Accuracy: Basic Definitions // *The Journal of the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*. 2009. Vol. 19. Iss. 4. P. 203-211.
38. Haijun Qiu, Yaru Zhu, Wenqi Zhou et al. Influence of DEM resolution on landslide simulation performance based on the Scoops3D model // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 1663-1681. DOI: [10.1080/19475705.2022.2097451](https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2097451)
39. Sarma C.P., Dey A., Krishna A.M. Influence of digital elevation models on the simulation of rainfall-induced landslides in the hillslopes of Guwahati, India // *Engineering Geology*. 2020. Vol. 268. № 105523. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105523](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105523)
40. Park D.W., Nikhil N.V., Lee S.R. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 13. Iss. 11. P. 2833-2849. DOI: [10.5194/nhess-13-2833-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-2833-2013)
41. Tran T.V., Alvioli M., Lee G., An H.U. Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: a case study // *Landslides*. 2018. Vol. 15. Iss. 6. P. 1071-1084. DOI: [10.1007/s10346-017-0931-7](https://doi.org/10.1007/s10346-017-0931-7)

Авторы: Зыюнг Ван Бинь, канд. геол.-минерал. наук, преподаватель, <https://orcid.org/0000-0002-8612-2943> (Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия; Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам), И.К.Фоменко, д-р геол.-минерал. наук, профессор, ifolga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2318-6015> (Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия), Нгуен Чунг Киен, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0840-5163> (Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам), О.В.Зеркаль, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4775-4091> (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), О.Н.Сироткина, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8171-1960> (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), Ву Хонг Данг, аспирант, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4402-0746> (Вьетнамский институт геонаук и минеральных ресурсов, Ханой, Вьетнам).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.