

УДК 551.435.627

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ ГИС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕЙ В РАЙОНЕ ШАПА, ВЬЕТНАМ

Зыюнг Ван Бинь^{1,2},
duongvanbinh@hmg.edu.vn

Фоменко Игорь Константинович²,
ifolga@gmail.com

Нгуен Чунг Киен³,
kien.mgri@gmail.com

Ви Тхи Хонг Лиен³,
vyhonglien2003@yahoo.com

Зеркаль Олег Владимирович⁴,
igzov@mail.ru

Ву Хонг Данг⁵,
hongdangbg@gmail.com

¹ Ханойский горно-геологический университет,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Вьен, 18.

² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

³ Вьетнамская академия наук и технологий,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Чуаланг, 84.

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1.

⁵ Вьетнамский институт геонаук и минеральных ресурсов,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Тьентханг, 67.

Актуальность. Прогнозирование и минимизация последствий стихийных бедствий являются важнейшими задачами для правительств во всем мире, включая Вьетнам. Оползни являются одним из наиболее распространенных видов стихийных бедствий во Вьетнаме, особенно в северных горных провинциях, что приводит к значительным человеческим жертвам и материальному ущербу. В этом исследовании для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, провинция Лаокай, применялись статистические методы, с использованием геоинформационных систем (ГИС). Для решения поставленной задачи было отобрано девять факторов, определяющих оползневую восприимчивость на рассматриваемой территории: высота над уровнем моря, расстояние до дорог, крутизна склонов, расстояние от разломов, среднеемесячное количество осадков, вертикальное расчленение рельефа, землепользование, тип коры выветривания и расстояние до эрозионной сети.

Основная цель исследования заключается в подготовке карт потенциального развития оползней для района Шапа. Кроме того, выполненные работы продемонстрировали эффективность использованных статистических методов при оценке восприимчивости территории к оползневому процессу.

Объектом исследования является оползневая восприимчивость в районе Шапа провинции Лаокай (Вьетнам).

Методы: статистические методы с использованием ГИС, включая метод соотношения частотностей (англ. Frequency Ratio method – FR), метод анализа оползневой восприимчивости (англ. Landslide Susceptibility Analysis method – LSA) и метод статистического индекса (англ. Statistical Index method – SI).

Результаты. Были построены карты потенциального развития оползней для исследуемой территории, которая была разделена на пять зон: очень низкого потенциала, низкого потенциала, среднего потенциала, высокого потенциала и очень высокого потенциала. Площадь под кривой ошибок была использована для оценки достоверности этих моделей. Проценты успеха моделей для тренировочных данных составляют 74,60 % (FR), 70,82 % (LSA) и 76,36 % (SI). Проценты прогнозирования моделей для данных тестирования составляют 77,01 % (FR), 74,36 % (LSA) и 78,11 % (SI). Оценка эффективности моделей показала, что все три метода являются эффективными для оценки потенциального развития оползневого процесса в районе исследования. Результаты исследований имеют исключительно важное значение для планирования землепользования и экономического развития, а также для минимизации ущерба от оползней.

Ключевые слова:

Оползневая восприимчивость, потенциальное развитие оползней, метод соотношения частотностей, метод анализа оползневой восприимчивости, метод статистического индекса, ГИС, район Шапа, Вьетнам.

Введение

Оползни являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий в мире, приводящих к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам [1–3]. Согласно исследованию [4], выполненному на основе данных из 128 стран за два десятилетия (1995–2014 гг.), в результате 3876 оползней во всем мире погибло 163658 человек и 11689 человек получили ранения. Общее число оползней со смертельным исходом, зарегистрированных в мире в период с 2004 по 2016 гг. (включительно), составило 4862, исключая случаи, вызванные землетрясениями, и большинство оползней произошло в Азии (75 %) [5]. Во Вьетнаме, особенно в северных горных провинциях, оползни часто приводили к значительным человеческим жертвам и материальным потерям [6–8]. На возникновение и активизацию оползней влияют геологические и геоморфологические особенности территории, а также количество осадков и антропогенное воздействие [9]. Для минимизации ущерба от оползней необходимо проведение детального изучения факторов, определяющих развитие оползневых процессов с учетом механизма их развития, а также анализ полученных значений оползневой восприимчивости.

Оползневая восприимчивость, опасность и риск развития оползней являются тремя основными компонентами исследования склоновых процессов [10]. Оползневая восприимчивость – это пространственная вероятность оползней, происходящих в данном районе, в зависимости от локальных топографических условий, указывающая, «где» могут произойти оползни [11, 12]. Следует отметить, что в работах российских исследователей понятие «оползневая восприимчивость» также трактуется как «предрасположенность территории к развитию оползней».

Картирование оползневой восприимчивости (LSM – Landslide Susceptibility Mapping) – это процесс определения пространственного распределения и классификации единиц территории на основе их склонности к образованию оползней. На это влияют топография, геология, характеристики свойств грунтов, климат, растительность и техногенное воздействие [13]. Пространственный анализ с использованием ГИС проясняет связи между различными элементами устойчивости литотехнических систем и развитием оползневых процессов, являясь эффективным методом для оценки оползневой восприимчивости [14–17]. Модели на основе ГИС успешно использовались в различных исследованиях оползневой восприимчивости во Вьетнаме [18–22]. Подходы к оценке оползневой восприимчивости можно разделить на качественные и количественные [23–27]. В последние годы наблюдается значительное увеличение числа количественных оценок оползневой восприимчивости. Это связано с тем, что количественные подходы обеспечивают более точные результаты. Однако качественные подходы все ещё не потеряли своей актуальности при оценке оползневой восприимчивости на больших территориях или в тех случаях, когда количественные подходы неосуществимы из-за отсутствия данных.

Статистические методы широко применяются для оценки оползневой восприимчивости [28–32] благодаря следующим преимуществам [33]:

- 1) Поскольку математические операции фиксированы, результаты повторяемы.
- 2) Благодаря независимому анализу каждой из карт факторов развития оползневых процессов результаты легко объяснить.
- 3) Экспертное мнение может быть включено в анализ, поскольку конкретные комбинации переменных могут быть рассмотрены и оценены на предмет их значимости в возникновении оползней.
- 4) Точность полученных карт может быть проверена с использованием данных о пространственном распределении оползней, особенно когда оценка основана на распределении исторических оползней и сравнивается с пространственным распределением проявлений современных оползневых процессов.

В этом исследовании для оценки оползневой восприимчивости и создания карт потенциального развития оползней в районе Шапа провинции Лаокай (Вьетнам) были использованы три статистических метода: метод соотношения частотностей (англ. Frequency Ratio method – FR), метод анализа оползневой восприимчивости (англ. Landslide Susceptibility Analysis method – LSA) и метод статистического индекса (англ. Statistical Index method – SI). В результате выполненного анализа исследуемая территория была разделена на пять зон по степени потенциального развития оползневого процесса – очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

Достоверность полученных моделей была оценена с применением AUCROC (площадь под кривой ошибок) анализа.

ROC-кривая, или кривая ошибок (англ. Receiver Operating Characteristic), – график, позволяющий оценить качество бинарной классификации, показывает зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от неверно классифицированных отрицательных примеров.

Площадь под ROC-кривой AUC (Area Under Curve) является агрегированной характеристикой качества классификации, не зависящей от соотношения величин ошибок. Чем больше значение AUC, тем качественнее полученная модель классификации.

Важные характеристики района исследования

Лаокай – одна из северных провинций Вьетнама, наиболее подверженная оползневым процессам из-за горной местности, сложной геологии и тропического муссонного климата с высоким среднегодовым количеством осадков [34]. Расположенный на ее северо-западе район Шапа находится примерно в 38 км от центра города Лаокай и в 376 км от Ханоя (рис. 1). Район исследования покрывает площадь 675,8 км² и имеет высоту над уровнем моря от 150 м до более чем 3000 м. В геологическом строении района исследования принимают участие осадочные, метаморфические и магматические породы различных возрастов.

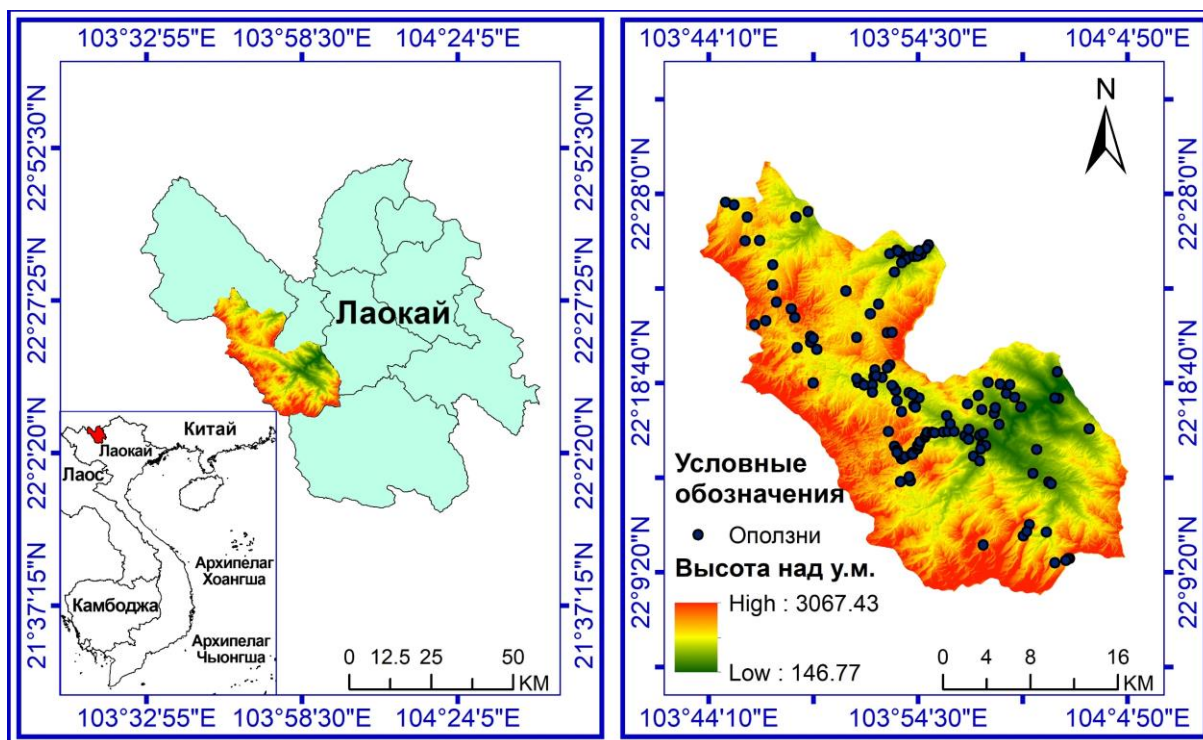


Рис. 1. Расположение района исследования

Fig. 1. Location of study area

Район Шапа, по сравнению с другими районами северного Вьетнама, вследствие сельскохозяйственного освоения и развития туризма, столкнулся с проблемой активизации оползневых и эрозионных процессов [35].

В последние годы в Шапе наблюдается увеличение количества оползней. Оползни наиболее часты в

сезон дождей и являются причиной значительного социального и экономического ущерба. Оползень Монгсен (рис. 2, а), активизировавшийся в 1998, 2000, 2002, 2009 гг., является наиболее известным оползнем в районе исследования. Он расположен на национальной дороге 4D, соединяющей город Лаокай и район Шапа.

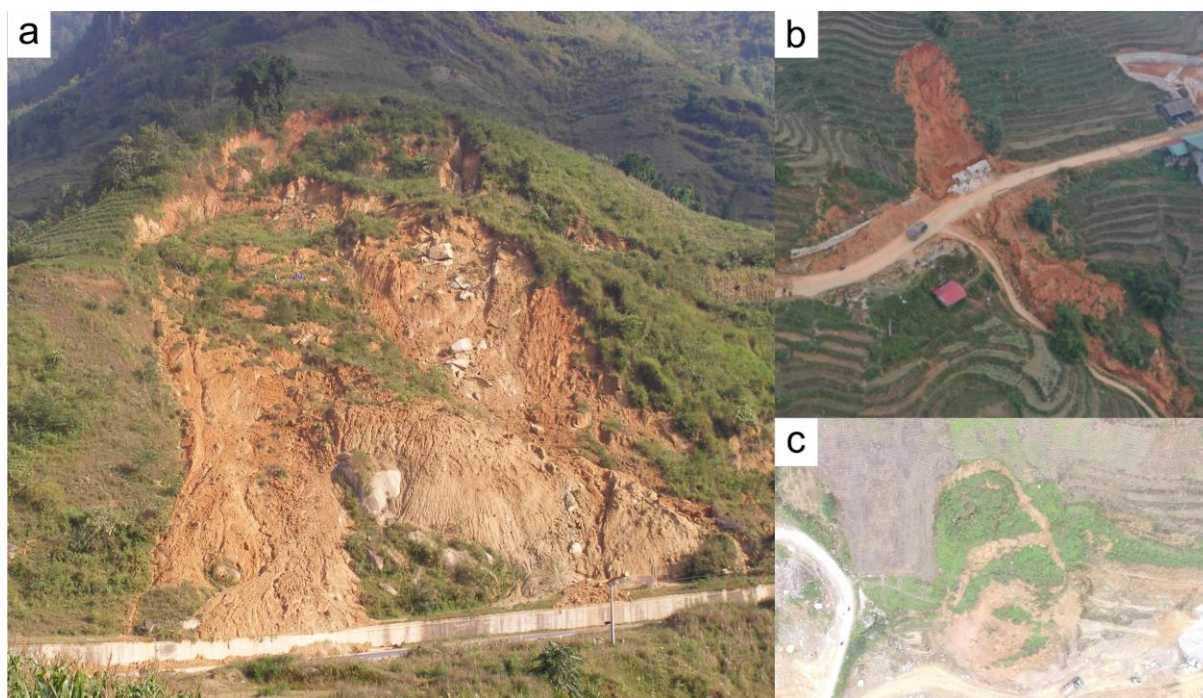


Рис. 2. Активизация оползневых процессов в коммунах: Монгсен (а), Хаутхао (b) и оползня Чунгчай (с)

Fig. 2. Photo of the Mong Sen landslide (a), the landslide site in Hau Thao commune (b) and the landslide site in Trung Chai commune (c)

5 августа 2019 г. на км 9+100 провинциальной дороги 152, соединяющей районный центр Шапа с коммуной Хаутхао, произошел оползень, в результате которого погиб один человек (рис. 2, *b*). 19 августа 2020 г. в результате оползня в деревне Тачунгхо коммуны Банхо также погиб один человек.

Наряду с осадками техногенная деятельность (перенаправление систем поверхностного дренажа, земляные работы на склонах в процессе дорожного строительства) способствует активизации оползней в районе исследования. Примером является оползневой массив вдоль провинциальной дороги 152, на км 12+600–км 12+900, в районе коммуны Чунгчай (рис. 2, *c*). На момент обследования в пределах оползневого массива наблюдались трещины и смещения.

Материалы и методы исследования

Метод соотношения частотностей

При прогнозировании оползней целесообразно предположить, что их возникновение определяется причинными факторами и что будущие оползни могут происходить в тех же условиях, что и предыдущие [36]. Исходя из этого предположения, можно установить взаимосвязь между районами, где произошли оползни, и факторами активизации оползней, которая может быть определена на основе метода соотношения частотностей, согласно которому каждый причинный фактор подразделяется на несколько классов, и значение частоты (*FR*) для каждого класса факторов (табл. 1) определяется с использованием следующего уравнения (1) [37]:

$$FR = \frac{\left(\frac{N_i}{N}\right)}{\left(\frac{P_i}{P}\right)}, \quad (1)$$

где N_i – количество точек (пикселей) оползней в классе факторов i ; N – общее количество точек (пикселей) оползней на карте района исследования; P_i – количество точек (пикселей) в классе факторов i ; P – общее количество точек (пикселей) на карте района исследования.

Индекс оползневой восприимчивости (*LSI*) при данном подходе рассчитывается по следующему уравнению (2):

$$LSI = \sum FR_i, \quad (2)$$

где *LSI* – индекс оползневой восприимчивости; FR_i – значение *FR* класса фактора i .

Среднее значение *FR* равно 1,0. Когда значение *FR* превышает 1,0, наблюдается более сильная корреляция между частотностью оползней и факторами оползневой восприимчивости. Когда значение *FR* меньше 1,0, это подразумевает более слабую связь между частотностью оползней и оползневыми факторами [38].

Метод анализа оползневой восприимчивости

Анализ оползневой восприимчивости – это простой и эффективный метод для оценки влияния различных факторов на возникновение оползней. В рамках этого метода для анализа влияния каждого фактора используются весовые коэффициенты, ко-

торые сравнивают оценочную плотность с общей плотностью в рассматриваемом районе [39]. Для определения значения веса класса факторов в методе *LSA* (табл. 1) используется следующее уравнение [3, 29, 39] (3):

$$W_{LSA} = 1000(D_{ij} - D) = 1000\left(\frac{N_i}{P_i} - \frac{N}{P}\right), \quad (3)$$

где D_{ij} – плотность оползней в классе i фактора j ; D – плотность оползней на карте района исследования; N_i – количество точек (пикселей) оползней в классе фактора i ; N – общее количество точек (пикселей) оползней на карте района исследования; P_i – количество точек (пикселей) в классе фактора i ; P – общее количество точек (пикселей).

Индекс оползневой восприимчивости (*LSI*) при этом подходе рассчитывается по следующему уравнению (4):

$$LSI = \sum W_i, \quad (4)$$

где *LSI* – индекс оползневой восприимчивости; W_i – значение W_{LSA} класса фактора i .

Метод статистического индекса

Метод статистического индекса, или метод оползневого индекса, был впервые предложен Ван Вестеном (Van Westen) в [40] и применялся во многих исследованиях для картирования оползневой восприимчивости [29, 31, 41]. В рамках рассматриваемого метода значение веса каждого класса (табл. 1) рассчитывается по натуральному логарифму плотности оползней в классе, деленному на общую плотность оползней в районе исследования (5) [40]:

$$W_{SI} = \ln \frac{D_{ij}}{D} = \ln \left(\frac{N_i}{P_i} \times \frac{P}{N}\right), \quad (5)$$

где D_{ij} – плотность оползня в классе i фактора j ; D – плотность оползня на карте района исследования; N_i – количество точек (пикселей) оползня в классе фактора i ; N – общее количество точек (пикселей) оползня на карте района исследования; P_i – количество точек (пикселей) в классе фактора i ; P – общее количество точек (пикселей) на карте района исследования.

Индекс оползневой восприимчивости (*LSI*) при этом подходе рассчитывается по следующему уравнению (6):

$$LSI = \sum W_i, \quad (6)$$

где *LSI* – индекс оползневой восприимчивости; W_i – значение W_{SI} класса фактора i .

Карта инвентаризации оползней

Карта инвентаризации оползней – это карта, на которой показано распределение существующих проявлений оползневых процессов [23]. При составлении инвентаризационных карт оползней (*LIM* – *Landslide Inventory Mapping*) внимание фокусируется на определении границы оползней и игнорирует особенности оползневых деформаций. *LIM* является важнейшим элементом в оценке риска оползней [42]. Наряду с изображением пространственного распределения оползней карта инвентаризации оползней может включать другие виды информации, такие как гео-

метрические характеристики оползня (размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневыми деформациями), особенности геологического строения (литология, структура, свойства грунтов) и гидрогеологических условий [43]. Методы, применяемые при создании карты инвентаризации оползней, можно разделить на три группы [43]:

- методы, основанные на визуальной интерпретации;
- полуавтоматические методы;
- автоматические методы, основанные на глубоком обучении.

При выполнении настоящих работ карта инвентаризации оползней была составлена с использованием результатов полевых наблюдений и данных тематической обработки материалов дистанционного зондирования.

В районе исследования было выявлено в общей сложности 130 оползней, при этом наименьшая площадь оползня составила 395,6 м², а самая большая площадь оползня – 70447,4 м². Большинство оползней было зафиксировано в коммуне Чунгчай, в центре района Шапа, в коммунах Лаочай, Таван и Банхо. Для оценки потенциала развития оползней местоположения склоновых деформаций были случайно разделены на две группы: 70 % (91 местоположения оползней) использовались для обучения моделей, а 30 % (39 местоположений оползней) – для проверки достоверности моделей.

Факторы, вызывающие оползни

Разработка карты оползневой восприимчивости зависит от сложной взаимосвязи между образованием оползней и оползневыми причинными факторами. Переменные, которые способствовали составлению карт оползневой восприимчивости, были выбраны на основе обзора литературы и подробных полевых исследований [44]. Характеристики геоморфологических и орографических условий, типы строения верхней части геологического разреза, рассматриваемые либо совместно, либо раздельно, виды землепользования и описание гидрологических условий формируют основные группы входной информации, необходимой для оценки оползневой восприимчивости [45].

В настоящей работе, исходя из имеющихся данных, особенностей оползней и взаимосвязи между образованием склоновых деформаций и факторами, вызывающими оползни, для составления карт оползневой восприимчивости и потенциального развития оползней были выбраны девять факторов, связанных с оползнями, – высота над уровнем моря, расстояние до дорог, крутизна склонов, расстояние от разломов, среднемесячное количество осадков, вертикальное расчленение рельефа, землепользование, тип коры выветривания, расстояние до эрозионной сети. Карты высоты над уровнем моря, крутизны склонов и вертикального расчленения рельефа были составлены с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) с разрешением 10 м. Расстояние от разломов, расстояние до дорог и расстояние до эрозионной сети были оценены с помощью инструмента Евклидово рассто-

яние в ArcGIS. Карта среднемесячного количества осадков была составлена путем интерполяции данных о количестве осадков с метеорологических станций в провинции Лаокай. Остальные данные были собраны в Институте геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий. После этого карты были трансформированы в растровый формат с тем же размером пикселей (разрешение 10×10 м) для расчета весов классов и факторов и создания карт оползневой восприимчивости (рис. 3).

Валидация модели

После подготовки карт оползневой восприимчивости и потенциального развития оползней крайне важно оценить достоверность результатов, полученных по трём моделям. Эта задача выполняется путем сравнения этих карт с картой инвентаризации оползней. С помощью метода ROC [46] точность полученных карт оценивалась по площади под кривой (AUC) рабочей характеристики приемника (ROC). Для данного набора пороговых или предельных значений кривая ROC отображает долю верных положительных результатов (TPR – True Positive Rate), указывающую, что классификатор правильно определяет место оползней, и долю ложно положительных результатов (FPR – False Positive Rate), указывающую, что оползни идентифицируются в местах, где они не существуют. Чувствительность (Se – Sensitivity) и специфичность (Sp – Specificity) обозначаются TPR и 1-FPR, соответственно [47]. Значения AUC для кривых процента успеха и процента прогнозирования были рассчитаны с использованием 70 % (данные обучения) и 30 % (данные проверки) данных от общего количества данных по оползням соответственно.

Результаты исследования и обсуждение

В настоящей работе была проанализирована взаимосвязь между факторами, вызывающими оползни, и фактическим возникновением оползней в районе проводимых исследований. Соотношения частотностей и значения веса были определены с использованием моделей FR, LSA и SI, соответственно (табл. 1). Для рассматриваемой территории значения LSI при подготовке карт индекса оползневой восприимчивости были рассчитаны по уравнениям (2), (4) и (6). Значения LSI варьировали от 11,3 до 98,9 (FR), от –15,2 до 34,9 (LSA) и от –58,7 до 19,4 (SI). После этого были получены карты потенциального развития оползней на основе значений LSI с использованием метода классификации естественных границ в ArcGIS. Район исследования был разделен на пять зон по потенциалу развития оползней: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая.

Результат анализа FR показал, что зоны с очень низким, низким, средним, высоким и очень высоким потенциалом развития оползней составляют: 21,02; 22,26; 20,39; 16,36 и 19,97 % площади изученной территории, соответственно. В результате анализа LSA оценка показала, что 25,01; 20,95; 17,16; 19,52 и 17,37 % площади района исследования находится в зонах очень низкого, низкого, среднего, высокого и

очень высокого потенциала развития оползней, соответственно. По результатам анализа SI зоны очень низкого, низкого, среднего, высокого и очень высоко-

го потенциала развития оползней составляют: 19,26; 18,54; 24,14; 19,33 и 18,73 % площади территории работ (табл. 2).

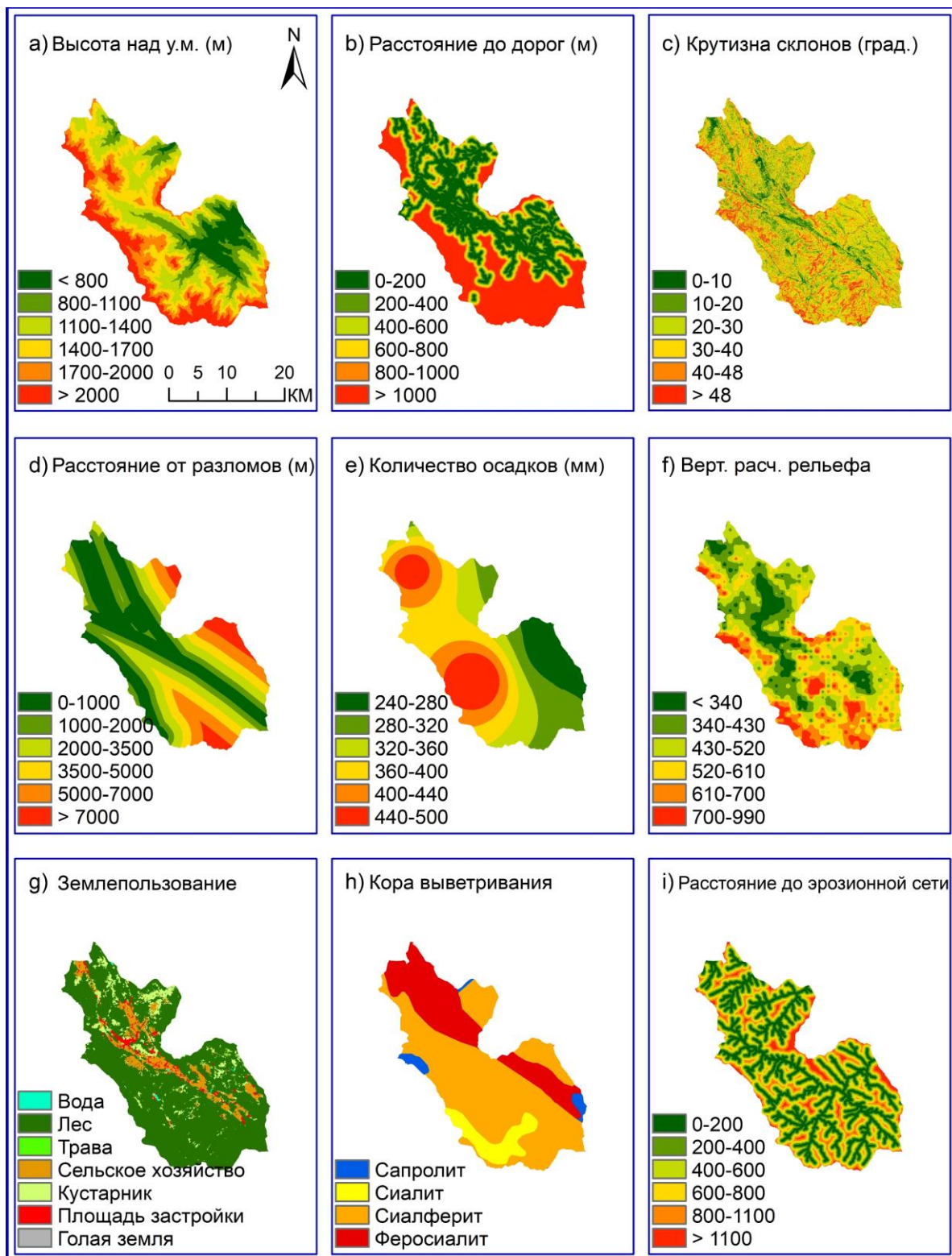


Рис. 3. Карты факторов: а) высоты над уровнем моря; б) расстояния до дорог; с) крутизны склонов; д) расстояния от разломов; е) количества осадков; ф) вертикального расчленения рельефа; г) землепользования; h) типа кор выветривания; i) расстояния до эрозионной сети

Fig. 3. Maps of factors: a) elevation; б) distance to roads; с) slope; д) distance to faults; е) precipitation; ф) relative relief; г) land use; h) crust weathering; i) distance to drainage

Таблица 1. Анализ связи между факторами, вызывающими оползни, и распределением оползней с использованием моделей FR, LSA и SI

Table 1. Analysis of the relation between landslide causative factors and landslide distribution using FR, LSA, and SI models

Фактор Factor	Класс Class	площадь класса class area	площадь оползня landslide area	FR	W _{LSA}	W _{SI}
		%				
Высота над уровнем моря, м Elevation, m	<800	9,69	31,03	3,2	2,45	1,16
	800–1100	13,19	30,92	2,34	1,5	0,85
	1100–1400	22,43	11,86	0,53	–0,52	–0,64
	1400–1700	23,83	15,45	0,65	–0,39	–0,43
	1700–2000	16,61	10,47	0,63	–0,41	–0,46
	>2000	14,26	0,27	0,02	–1,09	–3,98
Расстояние до дорог, м Distance to roads, m	0–200	30,78	74,23	2,41	1,57	0,88
	200–400	14,33	7,3	0,51	–0,55	–0,67
	400–600	9,04	1,78	0,2	–0,89	–1,62
	600–800	6,52	2,77	0,42	–0,64	–0,86
	800–1000	4,95	1,13	0,23	–0,86	–1,48
	> 1000	34,38	12,79	0,37	–0,7	–0,99
Крутизна склонов, град. Slope, deg.	0–10	4,41	11,29	2,56	1,73	0,94
	10–20	14,34	15,61	1,09	0,1	0,09
	20–30	29,01	25,39	0,88	–0,14	–0,13
	30–40	33,37	29,83	0,89	–0,12	–0,11
	40–48	13,19	11,6	0,88	–0,13	–0,13
	>48	5,69	6,28	1,1	0,12	0,1
Расстояние от разломов, м Distance to faults, m	0–1000	32,12	52,8	1,64	0,72	0,5
	1000–2000	20,72	8,88	0,43	–0,64	–0,85
	2000–3500	17,45	9,72	0,56	–0,49	–0,58
	3500–5000	12,12	12,67	1,05	0,05	0,04
	5000–7000	11,91	8,47	0,71	–0,32	–0,34
	>7000	5,68	7,45	1,31	0,35	0,27
Среднемесячное количество осадков, мм Average monthly precipitation, mm	240–280	11,94	8,6	0,72	–0,31	–0,33
	280–320	16,51	7,94	0,48	–0,58	–0,73
	320–360	15,25	20,57	1,35	0,39	0,3
	360–400	24,88	31,75	1,28	0,31	0,24
	400–440	16,16	18,13	1,12	0,14	0,12
	440–500	15,27	13,01	0,85	–0,16	–0,16
Вертикальное расчленение рельефа, м/км ² Relative relief, m/km ²	<340	9,80	18,26	1,86	0,96	0,62
	340–430	19,81	20,87	1,05	0,06	0,05
	430–520	28,93	37,61	1,3	0,33	0,26
	520–610	22,26	15,6	0,7	–0,33	–0,36
	610–700	12,88	3,38	0,26	–0,82	–1,34
	700–990	6,31	4,28	0,68	–0,36	–0,39
Землепользование Land use	Вода/Water	0,24	0	0	–1,11	–2,89
	Лес/Forest	80,72	59,9	0,74	–0,29	–0,3
	Трава/Grass	0,12	0,2	1,67	0,7	0,49
	Сельское хозяйство Agriculture	8,44	5,28	0,63	–0,42	–0,47
	Кустарник Shrub	7,73	24,46	3,16	2,41	1,15
	Площадь застройки Build area	2,7	10,16	3,76	3,07	1,33
	Голая земля Bare land	0,05	0	0	–1,11	–1,22
Кора выветривания Weathering crust	Сапролит Saprolite	2,6	0	0	–1,11	–5,28
	Сиалит/Sialite	8,26	2,42	0,29	–0,79	–1,23
	Сиалферит Sialferite	62,62	86,87	1,39	0,43	0,33
	Феросиалит Ferosialite	26,52	10,71	0,4	–0,66	–0,91
Расстояния до эрозионной сети, м Distance to drainage, m	0–200	28,02	50,7	1,81	0,9	0,59
	200–400	22,99	24,59	1,07	0,08	0,07
	400–600	19,11	14,87	0,78	–0,25	–0,25
	600–800	14,32	5,67	0,4	–0,67	–0,93
	800–1100	11,84	2,85	0,24	–0,85	–1,43
	>1100	3,73	1,33	0,36	–0,72	–1,03

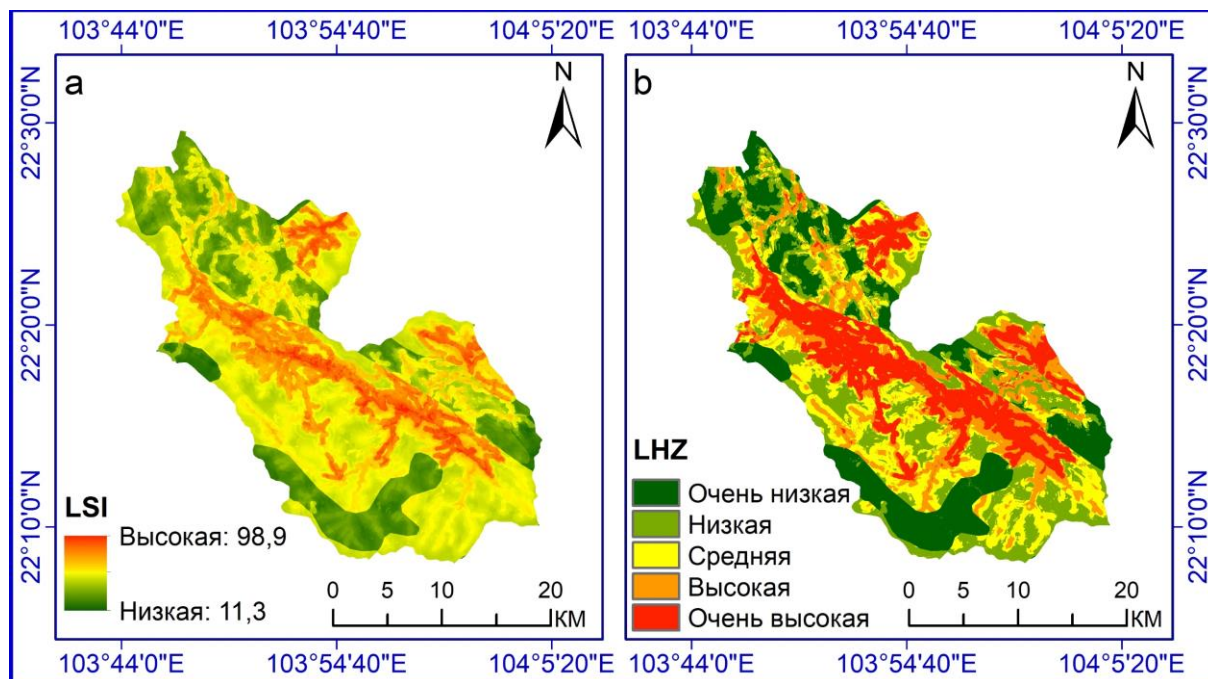


Рис. 4. Карта оползневой восприимчивости (а), карта потенциального развития оползней (б) с применением метода соотношения частотностей

Fig. 4. Landslide susceptibility map (a), landslide potential map (b) using Frequency ratio method

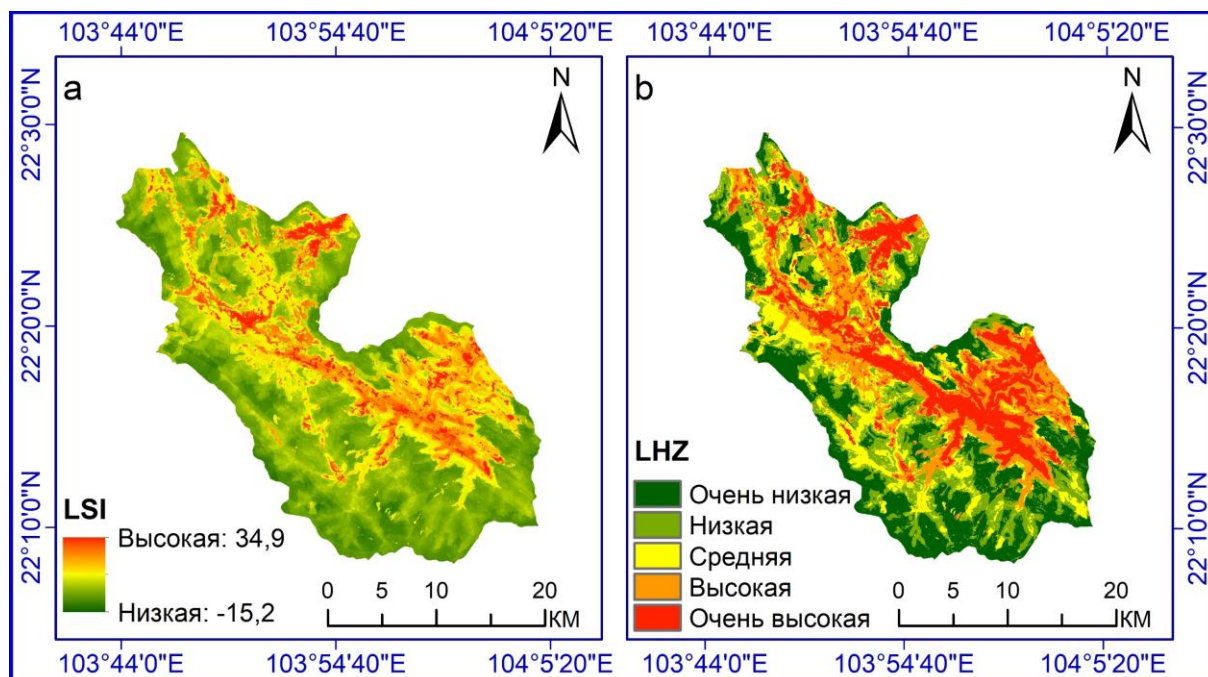


Рис. 5. Карта оползневой восприимчивости (а), карта потенциального развития оползней (б) с применением метода анализа оползневой восприимчивости

Fig. 5. Landslide susceptibility map (a), landslide potential map (b) using Landslide susceptibility analysis method

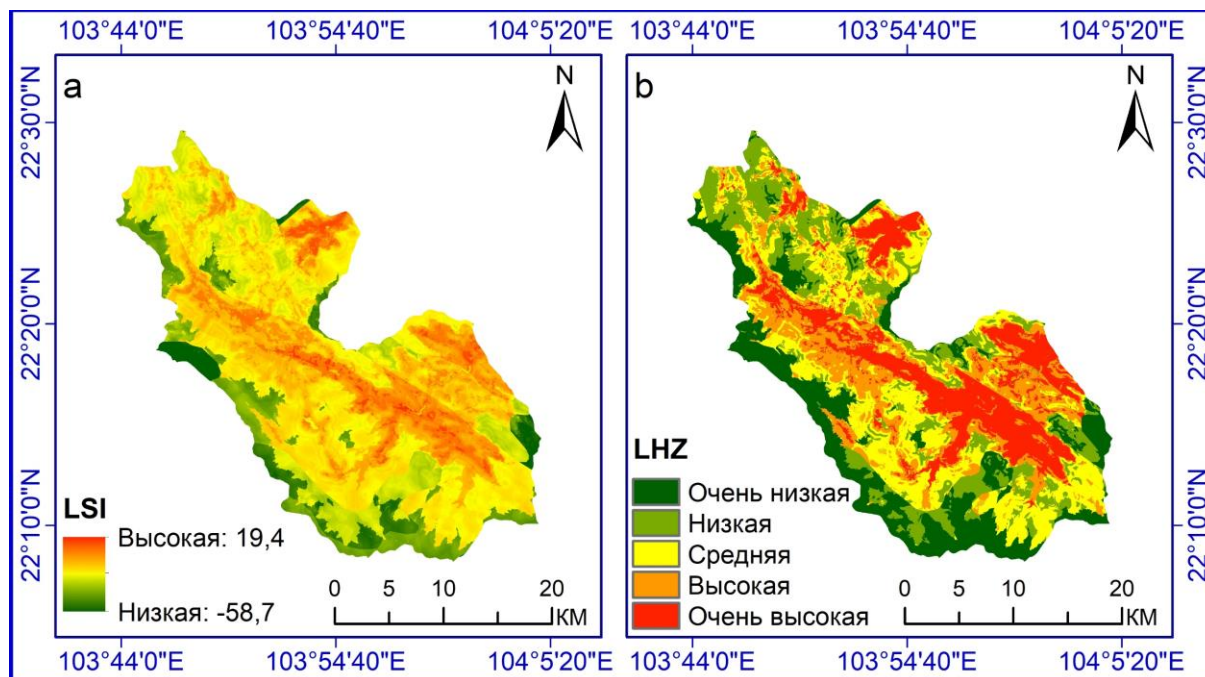


Рис. 6. Карта оползневой восприимчивости (а), карта потенциального развития оползней (б) с применением метода статистического индекса

Fig. 6. Landslide susceptibility map (a), landslide potential map (b) using Statistical index method

Таблица 2. Статистика распределения оползней по классам потенциального развития оползней

Table 2. Statistics of landslide distribution in landslide potential classes

Метод Method	Класс/Class		Очень низкая Very low	Низкая Low	Средняя Moderate	Высокая High	Очень высокая Very high
FR	Площадь класса/Class area, %		21,02	22,26	20,39	16,36	19,97
	Площадь оползня Landslide area, %	Обучение Training	3,17	3,78	13,47	13,02	66,56
		Проверка Testing	0	5,80	10,57	10,39	73,24
LSA	Площадь класса/Class area, %		25,01	20,95	17,16	19,52	17,37
	Площадь оползня Landslide area, %	Обучение Training	2,98	9,07	6,20	13,47	68,28
		Проверка Testing	4,12	5,72	1,82	17,46	70,87
SI	Площадь класса/Class area, %		19,26	18,54	24,14	19,33	18,73
	Площадь оползня Landslide area, %	Обучение Training	0,48	3,36	15,49	13,43	67,23
		Проверка Testing	0	3,06	11,88	12,83	72,22

Зоны с высоким и очень высоким потенциалом развития оползней, определенные методами FR и LSA, в основном распределены в коммунах Чунчай, Хаутхао, г. Шапа, Лаочай, Шупан, Тханьфу, на севере коммун Банхо и Намшай. Северные и южные районы исследования являются зонами с низким и очень низким потенциалом развития оползней. Согласно оценке по методу SI, в пределах территории работ наблюдается увеличение зон высокого и очень высокого потенциала развития оползней. Зоны низкого и очень низкого потенциала развития оползней расположены в коммунах Тазянгфинь, Банхоанг, Таван, Шапа и на юго-западе района исследования. Достоверность моделей для данных обучения составляет: 74,60 % (FR), 70,82 % (LSA) и 76,36 % (SI). Процент прогнозирования моделей для данных проверки составляет: 77,01 % (FR), 74,36 % (LSA) и 78,11 % (SI). Необходимо отме-

тить, что для всех использованных моделей была получена достаточно высокая величина достоверности результатов, превышающая 75 %. Вместе с тем значение AUC показало, что метод SI даёт лучшую точность для картирования оползневой восприимчивости и потенциала развития оползней в районе исследования.

Территории распространения (зоны распределения) кор выветривания сиалферита и феросиалита имеют высокий и очень высокий потенциал развития оползней. Оползни чаще встречаются в сельскохозяйственных районах и жилых районах. Кроме того, развитие дорожной сети в районе исследования приводит к увеличению потенциала их развития. Сочетание земляных работ на склонах и большого количества осадков увеличивает опасность возникновения оползней на рассматриваемой территории.

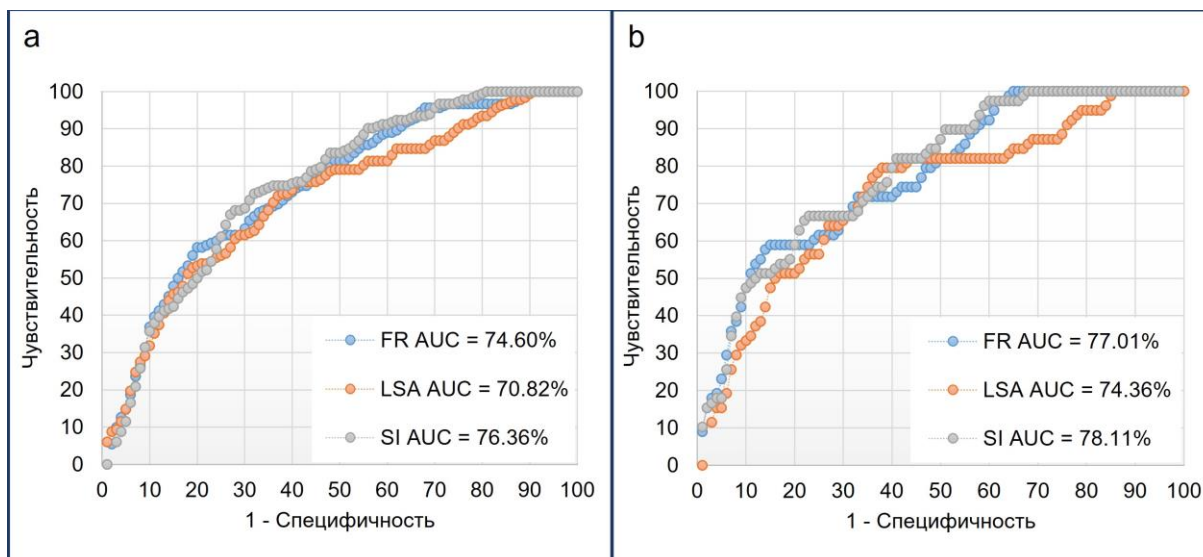


Рис. 7. График, иллюстрирующий достоверность (а) и прогнозирование (б) моделей FR, LSA и SI по ROC

Fig. 7. Success (a) and prediction (b) curve of FR, LSA and SI models by ROC curve

Заключение

Оценка оползневой опасности является важнейшим компонентом национальной стратегии предотвращения и уменьшения последствий стихийных бедствий во Вьетнаме. Районирование территории по потенциалу развития оползневого процесса является основой для оценки оползневой опасности связанных с этим рисков и проектирования систем раннего предупреждения. Исходя из этой идеи, был выполнен анализ потенциала развития оползневого процесса в районе Шапа, на северо-западе Вьетнама. Для составления карт оползневой восприимчивости и карт потенциала развития оползней были использованы три статистические модели (на основе ГИС), позволившие определить значимость каждого параметра, влияющего на развитие оползневых процессов. В дальнейшем оценка восприимчивости и потенциала развития оползней была произведена путем агрегирования результата анализа выбранных факторов с использованием пространственных аналитических уравнений. Район исследования

был разделен на пять зон по степени потенциального развития оползней: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая. Достоверность полученных моделей была оценена с применением AUC ROC (площадь под кривой ошибок) анализа, который показал высокую результативность всех трех используемых моделей, при этом наиболее точные результаты были получены с помощью SI модели. Результаты проведенных исследований крайне важны для оценки оползневой опасности и рисков, планирования устойчивого землепользования и уменьшения ущерба от оползней на рассматриваемой территории. Благодаря высокой производительности использованные модели могут быть применены для оценки потенциала развития оползней в различных регионах Вьетнама.

Исследование профинансировано Институтом геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий в рамках национального научно-технического проекта, грант № ĐТĐL.CN-81/21.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tiranti D., Cremonini R. Editorial: landslide hazard in a changing environment // *Frontiers in Earth Science*. – 2019. – V. 7. – Iss. 3. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00003> (дата обращения 15.02.2022).
2. Mandal S., Mondal S. *Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction*. – Switzerland: Springer International Publishing, 2019. – 200 p.
3. 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 / N.T. Kien, T.V. Tran, V.T.H. Lien, P.L.H. Linh, N.Q. Thanh // *Journal of Disaster Research* – 2021. – V. 16. – Iss. 4. – P. 521–528. URL: <https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0521> (дата обращения 15.02.2022).
4. The human cost of global warming: deadly landslides and their triggers (1995–2014) / U. Haque, P.F. da Silva, G. Devoli, J. Pilz, B. Zhao, A. Khaloua, W. Wilopo, P. Andersen, P. Lu, J. Lee, T. Yamamoto, D. Keellings, J.-H. Wu, G.E. Glass // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 682. – P. 673–684. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415> (дата обращения 15.02.2022).
5. Froude M.J., Petley D.N. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016 // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2018. – V. 18. – Iss. 8. – P. 2161–2181. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018> (дата обращения 15.02.2022).
6. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization / D. Tien Bui, T.A. Tuan, N.-D. Hoang, N.Q. Thanh, D.B. Nguyen, N. Van Liem, B. Pradhan // *Landslides*. – 2017. – V. 14. – Iss. 2. – P. 447–458. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9> (дата обращения 15.02.2022).
7. Le T., Kawagoe S. Impact of the landslide for a relationship between rainfall condition and land cover in North Vietnam // *Journal of Geological Resource and Engineering*. – 2018. – V. 6. – P. 239–250. URL: <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2018.06.002> (дата обращения 15.02.2022).
8. Rainfall-induced catastrophic landslide in Quang Tri Province: the deadliest single landslide event in Vietnam in 2020 / P. Van Tien, L.H. Luong, D.M. Duc, P.T. Trinh, D.T. Quynh, N.C. Lan, D.T. Thuy, N.Q. Phi, T.Q. Cuong, K. Dang, D.H. Loi // *Landslides*. – 2021. – V. 18. – Iss. 6. – P. 2323–2327. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01664-y> (дата обращения 15.02.2022).

9. Physical and anthropogenic factors related to landslide activity in the Northern Peloponnese, Greece / H.D. Skilodimou, G.D. Bathrellos, E. Koskeridou, K. Soukis, D. Rozos // *Land*. – 2018. – V. 7. – Iss. 3. URL: <https://doi.org/10.3390/land7030085> (дата обращения 15.02.2022).
10. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques—a review // *Geoenvironmental Disasters*. – 2020. – V. 7. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0> (дата обращения 15.02.2022).
11. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale / F. Guzzetti, P. Reichenbach, M. Cardinali, M. Galli, F. Ardizzone // *Geomorphology*. – 2005. – V. 72. – Iss. 1. – P. 272–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002> (дата обращения 15.02.2022).
12. A review of statistically-based landslide susceptibility models / P. Reichenbach, M. Rossi, B.D. Malamud, M. Mihir, F. Guzzetti // *Earth-Science Reviews*. – 2018. – V. 180. – P. 60–91. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001> (дата обращения 15.02.2022).
13. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning / R. Fell, J. Corominas, C. Bonnard, L. Cascini, E. Leroy, W. Z. Savage // *Engineering Geology*. – 2008. – V. 102. – Iss. 3. – P. 85–98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022> (дата обращения 15.02.2022).
14. McColl S.T. Chapter 2. Landslide causes and triggers // *Landslide hazards, risks and disasters* / Eds. J.F. Shroder, T. Davies. – Boston: Academic Press, 2015. – P. 17–42. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00002-1> (дата обращения 15.02.2022).
15. Nefeslioglu H.A., Duman T.Y., Durmaz S. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey) // *Geomorphology*. – 2008. – V. 94. – Iss. 3. – P. 401–418. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.036> (дата обращения 15.02.2022).
16. GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment / A. Roccati, G. Paliaga, F. Luino, F. Faccini, L. Turconi // *Land*. – 2021. – V. 10. – Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/land10020162> (дата обращения 15.02.2022).
17. Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? // *Bulletin of engineering geology and the environment*. – 2006. – V. 65. – Iss. 2. – P. 167–184. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0> (дата обращения 15.02.2022).
18. Developing a landslide susceptibility map using the analytic hierarchical process in Ta Van and Hau Thao Communes, Sapa, Vietnam / T.T.T. Le, T.V. Tran, V.H. Hoang, V.T. Bui, T.K.T. Bui, H.P. Nguyen // *Journal of Disaster Research*. – 2021. – V. 16. – Iss. 4. – P. 529–538. URL: <https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0529> (дата обращения 15.02.2022).
19. GIS based frequency ratio method for landslide susceptibility mapping at Da Lat City, Lam Dong province, Vietnam / D.Q. Thanh, D.H. Nguyen, I. Prakash, A. Jaafari, V.T. Nguyen, T.V. Phong, B.T. Pham // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. – 2020. – V. 42. – Iss. 1. – P. 55–66. URL: <https://doi.org/10.15625/0866-7187/42/1/14758> (дата обращения 15.02.2022).
20. Landslide susceptibility modeling using different artificial intelligence methods: a case study at Muong Lay district, Vietnam / T.V. Phong, T.T. Phan, I. Prakash, S.K. Singh., A. Shirzadi, K. Chapi, H.-B. Ly, L.S. Ho, N.K. Quoc, B.T. Pham // *Geocarto International*. – 2021. – V. 36. – Iss. 15. – P. 1685–1708. URL: <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1665715> (дата обращения 15.02.2022).
21. Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геoinформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама) / В.Б. Зьонг, И.К. Фоменко, Х.Д. Ву, Т.Х. Нгуен, О.Н. Сироткина // *Инженерная геология*. – 2021. – Т. XVI. – № 2. – С. 6–20. URL: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20> (дата обращения 15.02.2022).
22. Spatial prediction of landslides along National Highway-6, Hoa Binh province, Vietnam using novel hybrid models / H.T. Hang, H. Tung, P.D. Hoa, N.V. Phuong, T.V. Phong, R. Costache, H.D. Nguyen, M. Amiri, H.-A. Le, H.V. Le, I. Prakash, B.T. Pham // *Geocarto International*. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1912195> (дата обращения 15.02.2022).
23. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy / F. Guzzetti, A. Carrara, M. Cardinali, P. Reichenbach // *Geomorphology*. – 1999. – V. 31. – I. 1. – P. 181–216. URL: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1) (дата обращения 15.02.2022).
24. Gaidzik K., Ramirez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping // *Scientific Reports*. – 2021. – V. 11. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y> (дата обращения 15.02.2022).
25. Mersha T., Meten M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia // *Geoenvironmental Disasters*. – 2020. – V. 7. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x> (дата обращения 15.02.2022).
26. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey / A. Yalcin, S. Reis, A.C. Aydinoglu, T. Yomralioglu // *CATENA*. – 2011. – V. 85. – I. 3. – P. 274–287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014> (дата обращения 15.02.2022).
27. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 320 с.
28. Assessment of landslide susceptibility using statistical- and artificial intelligence-based FR–RF integrated model and multiresolution DEMs / A. Arabameri, B. Pradhan, K. Rezaei, C.-W. Lee // *Remote Sensing*. – 2019. – V. 11. – Iss. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11090999> (дата обращения 15.02.2022).
29. Berhane G., Tadesse K. Landslide susceptibility zonation mapping using statistical index and landslide susceptibility analysis methods: a case study from Gindeberet district, Oromia Regional State, Central Ethiopia // *Journal of African Earth Sciences*. – 2021. – V. 180. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104240> (дата обращения 15.02.2022).
30. Landslides susceptibility assessment based on GIS statistical bivariate analysis in the hills surrounding a metropolitan area / P. Sestraş, Ş. Bilaşco, S. Roşca, S. Naş, M.V. Bondrea, R. Gălgău, I. Vereş, T. Sălăgean, V. Spalević, S.M. Cîmpeanu // *Sustainability*. – 2019. – V. 11. – Iss. 5. URL: <https://doi.org/10.3390/su11051362> (дата обращения 15.02.2022).
31. Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method / L. Nahayo, C. Mupenzi, G. Habyaremwe, E. Kalisa, M. Udhogora, V. Nzabarinda, L. Li // *Environmental Engineering Science*. – 2019. – V. 36. – Iss. 8. – P. 892–902. URL: <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493> (дата обращения 15.02.2022).
32. Landslide susceptibility zonation mapping using bivariate statistical frequency ratio method and GIS: a case study in part of SH 37 Ghat Road, Nadugani, Panthalur Taluk, The Nilgiris / S.E. Saranaathan, S. Mani, V. Ramesh, S.P. Venkatesh // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. – 2021. – V. 49. – Iss. 2. – P. 275–291. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s12524-020-01207-3> (дата обращения 15.02.2022).
33. Naranjo J., Westen C.J., Soeters R. Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis – a case study in Colombia // *ITC Journal*. – 1994. – Iss. 3. – P. 292–300. URL: https://filetransfer.itc.nl/pub/westen/PDF_files/1994%20ITC%20Journal%20Naranjo%20et%20al.pdf (дата обращения 15.02.2022).
34. Developing recognition and simple mapping by UAV/SfM for local resident in mountain area in Vietnam – a case study in Po Xi Ngai Community, Laocai Province / N.K. Thanh, T. Miyagi, S. Isurugi, D. van Tien, L.H. Luong, D.N. Ha // *Understanding and reducing landslide disaster risk. V. 2. From mapping to hazard and risk zonation* / Eds. F. Guzzetti, A.S. Mihalic et al. WLF 2020. – Cham: Springer International Publ., 2021. – P. 103–109. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_10 (дата обращения 15.02.2022).
35. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam / K.B. Dang, B. Burkhard, F. Müller, V.B. Dang // *Paddy and Water Environment*. – 2018. – V. 16. – Iss. 4. – P. 767–781. URL: <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6> (дата обращения 15.02.2022).
36. Lee S., Pradhan B. Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia // *Journal of Earth System Science*. – 2006. – V. 115. – Iss. 6. – P. 661–672. URL:

- <https://doi.org/10.1007/s12040-006-0004-0> (дата обращения 15.02.2022).
37. Kose D.D., Turk T. GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods // *Physical Geography*. – 2019. – V. 40. – Iss. 5. – P. 481–501. URL: <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559583> (дата обращения 15.02.2022).
38. Oh H.-J., Lee S., Hong S.-M. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio technique with iterative random sampling // *Journal of Sensors*. – 2017. – V. 2017. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/3730913> (дата обращения 15.02.2022).
39. Sützen M.L., Doyuran V. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate // *Environmental Geology*. – 2004. – V. 45. – Iss. 5. – P. 665–679. URL: <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8> (дата обращения 15.02.2022).
40. Van Westen C.J. Statistical landslide susceptibility analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. – Enschede: ITC Publ., 1997. – P. 73–84.
41. Long N.T., De Smedt F. Analysis and mapping of rainfall-induced landslide susceptibility in a Luoi District, Thua Thien Hue Province, Vietnam // *Water*. – 2019. – V. 11. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.3390/w11010051> (дата обращения 15.02.2022).
42. Landslide inventory mapping from bitemporal images using deep convolutional neural networks / T. Lei, Y. Zhang, Z. Lv, S. Li, S. Liu, A.K. Nandi // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2019. – V. 16. – Iss. 6. – P. 982–986. URL: <http://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2889307> (дата обращения 15.02.2022).
43. Deep convolutional neural network-based pixel-wise landslide inventory mapping / Z. Su, J.K. Chow, P.S. Tan, J. Wu, Y.K. Ho, Y.-H. Wang // *Landslides*. – 2021. – V. 18. – Iss. 4. – P. 1421–1443. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6> (дата обращения 15.02.2022).
44. Getachew N., Meten M. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia // *Geoenvironmental Disasters*. – 2021. – V. 8. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z> (дата обращения 15.02.2022).
45. Soeters R., Van Westen C.J. Slope instability recognition analysis and zonation // *Landslides, investigation and mitigation. Special report (National Research Council (U.S.). Transportation Research Board) /Eds. A.K. Turner, R.L. Schuster*. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. – P. 129–177. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf> (дата обращения 15.02.2022).
46. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems // *Science*. – 1988. – V. 240. – Iss. 4857. – P. 1285–1293. URL: <http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615> (дата обращения 15.02.2022).
47. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps / I. Cantarino, M.A. Carrion, F. Goerlich, V. Martinez Ibañez // *Landslides*. – 2019. – V. 16. – I. 2. – P. 265–282. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4> (дата обращения 15.02.2022).

Поступила 25.03.2022 г.

Информация об авторах

Зыонг Ван Бинь, преподаватель кафедры инженерной геологии факультета наук о Земле и геологической инженерии Ханойского горно-геологического университета; аспирант кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Фоменко И.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Нгуен Чунг Киен, старший научный сотрудник отдела развития технологий и экологической инженерии института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

Ви Тхи Хонг Лиен, старший научный сотрудник отдела развития технологий и экологической инженерии института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

Зеркаль О.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Ву Хонг Данг, научный сотрудник отдела гидрогеологии и инженерной геологии Вьетнамского института геонаук и минеральных ресурсов.

UDC 551.435.627

APPLICATION OF GIS-BASED BIVARIATE STATISTICAL METHODS FOR LANDSLIDE POTENTIAL ASSESSMENT IN SAPA, VIETNAM

Van B. Duong^{1,2},
duongvanbinh@hmg.edu.vn

Igor K. Fomenko²,
ifolga@gmail.com

Trung K. Nguyen³,
kien.mgri@gmail.com

ThiHong L. Vi³,
vyhonglien2003@yahoo.com

Oleg V. Zerkal⁴,
igzov@mail.ru

Hong D. Vu⁵,
hongdangbg@gmail.com

¹ Hanoi University of Mining and Geology,
18, Vien street, Hanoi, 100000, Vietnam.

² Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University,
23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russia.

³ Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology,
84, Chua Lang street, Hanoi, 100000, Vietnam.

⁴ Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.

⁵ Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources,
67, Chien Thang street, Hanoi, 100000, Vietnam.

The relevance. Predicting and minimizing the impact of natural disasters are critical tasks for governments worldwide, including Vietnam. Landslides are one of the most frequent types of natural disasters in Vietnam, especially in the northern mountainous provinces, resulting in significant loss of life and property. In this study, the GIS-based bivariate statistical methods were applied for assessing landslide potential in Sapa district, Laocai province, Vietnam. For assessing landslide susceptibility, nine landslide-related factors were selected, including elevation, distance to roads, slope, distance to faults, average monthly precipitation, relative relief, land use, crust weathering, and distance to drainage.

The main aim of this study is to prepare landslide potential maps for the study area. In addition, the study also demonstrated the effectiveness of bivariate statistical methods for landslide susceptibility assessment.

Object of the study is the landslide susceptibility in Sapa district, Laocai province, Vietnam.

Methods: GIS-based bivariate statistical methods including frequency ratio, landslide susceptibility analysis, and statistical index.

Results. Landslide potential maps were prepared using GIS-based bivariate statistical methods. The study area is divided into five landslide potential zones: very low, low, moderate, high, and very high. The area under the curve of the receiver operating characteristic (AUCROC) was used to evaluate the performance of these models. The success rates of the models for the training data are 74,60 % frequency ratio, 70,82 % landslide susceptibility analysis and 76,36 % statistical index. The prediction rates of the models for the testing data are 77,01 % frequency ratio, 74,36 % landslide susceptibility analysis and 78,11 % statistical index. The performance evaluation of the models revealed that all three techniques are efficient in assessing landslide potential in the study area. Study results are critical for land use planning and economic development, as well as minimizing landslide-related damage.

Key words:

Landslide susceptibility, landslide potential, frequency ratio, landslide susceptibility analysis, statistical index, GIS, Sapa, Vietnam.

The research was financed by the Institute of Geological Sciences of Vietnam Academy of Sciences and Technologies within the national development project, grant no. DTDL.CN-81/21.

REFERENCES

1. Tiranti D., Cremonini R. Editorial: landslide hazard in a changing environment. *Frontiers in Earth Science*, 2019, vol. 7, Iss. 3. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00003> (accessed 15 February 2022).
2. Mandal S., Mondal S. *Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction*. Switzerland, Springer International Publ., 2019. 200 p.
3. Kien N.T., Tran T.V., Lien V.T.H., Linh P.L.H., Thanh N.Q. 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, Iss. 4, pp. 521–528. Available at: <https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0521> (accessed 15 February 2022).
4. Haque U., Da Silva P.F., Devoli G., Pilz J., Zhao B., Khaloua A., Wilopo W., Andersen P., Lu P., Lee J., Yamamoto T., Keellings D., Wu J.-H., Glass G.E. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 682, pp. 673–684. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415> (accessed 15 February 2022).
 5. Froude M. J., Petley D.N. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, vol. 18, Iss. 8, pp. 2161–2181. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018> (accessed 15 February 2022).
 6. Tien Bui D., Tuan T.A., Hoang N.-D., Thanh N.Q., Nguyen D.B., Van Liem N., Pradhan B. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization. *Landslides*, 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 447–458. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9> (accessed 15 February 2022).
 7. Le T., Kawagoe S. Impact of the landslide for a relationship between rainfall condition and land cover in North Vietnam. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 2018, vol. 6, pp. 239–250. Available at: <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2018.06.002> (accessed 15 February 2022).
 8. Van Tien P., Luong L.H., Duc D.M., Trinh P.T., Quynh D.T., Lan N.C., Thuy D.T., Phi N.Q., Cuong T.Q., Dang K., Loi D.H. Rainfall-induced catastrophic landslide in Quang Tri Province: the deadliest single landslide event in Vietnam in 2020. *Landslides*, 2021, vol. 18, Iss. 6, pp. 2323–2327. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01664-y> (accessed 15 February 2022).
 9. Skilodimou H.D., Bathrellos G.D., Koskeridou E., Soukis K., Rozos D. Physical and anthropogenic factors related to landslide activity in the Northern Peloponnese, Greece. *Land*, 2018, vol. 7, Iss. 3. Available at: <https://doi.org/10.3390/land7030085> (accessed 15 February 2022).
 10. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques—a review. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, vol. 7, Iss. 1, pp. 18. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0> (accessed 15 February 2022).
 11. Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 2005, vol. 72, Iss. 1, pp. 272–299. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002> (accessed 15 February 2022).
 12. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 180, pp. 60–91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001> (accessed 15 February 2022).
 13. Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 2008, vol. 102, Iss. 3, pp. 85–98. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022> (accessed 15 February 2022).
 14. McColl S.T. Chapter 2. Landslide causes and triggers. *Landslide hazards, risks and disasters*. Eds. J.F. Shroder, T. Davies. Boston, Academic Press Publ., 2015. pp. 17–42. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00002-1> (accessed 15 February 2022).
 15. Nefeslioglu H.A., Duman T.Y., Durmaz S. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*, 2008, vol. 94, Iss. 3, pp. 401–418. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.036> (accessed 15 February 2022).
 16. Roccati A., Paliaga G., Luino F., Faccini F., Turconi L. GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. *Land*, 2021, vol. 10, Iss. 2. Available at: <https://doi.org/10.3390/land10020162> (accessed 15 February 2022).
 17. Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2006, vol. 65, Iss. 2, pp. 167–184. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0> (accessed 15 February 2022).
 18. Le T.T.T., Tran T.V., Hoang V.H., Bui V.T., Bui T.K.T., Nguyen H.P. Developing a landslide susceptibility map using the analytic hierarchical process in Ta Van and Hau Thao Communes, Sapa, Vietnam. *Journal of Disaster Research*, 2021, vol. 16, Iss. 4, pp. 529–538. Available at: <https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0529> (accessed 15 February 2022).
 19. Thanh D.Q., Nguyen D.H., Prakash I., Jaafari A., Nguyen V.T., Phong T.V., Pham B.T. GIS based frequency ratio method for landslide susceptibility mapping at Da Lat City, Lam Dong province, Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 42, Iss. 1, pp. 55–66. Available at: <https://doi.org/10.15625/0866-7187/42/1/14758> (accessed 15 February 2022).
 20. Phong T.V., Phan T.T., Prakash I., Singh S.K., Shirzadi A., Chapi K., Ly H.-B., Ho L.S., Quoc N.K., Pham B.T. Landslide susceptibility modeling using different artificial intelligence methods: a case study at Muong Lay district, Vietnam. *Geocarto International*, 2021, vol. 36, Iss. 15, pp. 1685–1708. Available at: <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1665715> (accessed 15 February 2022).
 21. Duong V.B., Fomenko I.K., Vu H.D., Nguyen T.H., Sirotkina O.N. Regional assessment of landslide hazard using modified analytic hierarchies process method in geoinformation system (a study of the Sa Pa District, Lao Cai Province, Vietnam). *Engineering Geology World*, 2021, vol. XVI, no. 2, pp. 6–20. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20> (accessed 15 February 2022).
 22. Hang H.T., Tung H., Hoa P.D., Phuong N.V., Phong T.V., Costache R., Nguyen H.D., Amiri M., Le H.-A., Le H.V., Prakash I., Pham B.T. Spatial prediction of landslides along National Highway-6, Hoa Binh province, Vietnam using novel hybrid models. *Geocarto International*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1912195> (accessed 15 February 2022).
 23. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 1999, vol. 31, Iss. 1, pp. 181–216. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1) (accessed 15 February 2022).
 24. Gaidzik K., Ramirez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y> (accessed 15 February 2022).
 25. Mersha T., Meten M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, vol. 7, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x> (accessed 15 February 2022).
 26. Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A.C., Yomralioglu T. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *CATENA*, 2011, vol. 85, Iss. 3, pp. 274–287. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014> (accessed 15 February 2022).
 27. Pendin V.V., Fomenko I.K. *Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti* [Methodology for landslide hazard assessment and prediction]. Moscow, LENAND Publ., 2015. 320 p.
 28. Arabameri A., Pradhan B., Rezaei K., Lee C.-W. Assessment of landslide susceptibility using statistical- and artificial intelligence-based FR–RF integrated model and multiresolution DEMs. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, Iss. 9. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs11090999> (accessed 15 February 2022).
 29. Berhane G., Tadesse K. Landslide susceptibility zonation mapping using statistical index and landslide susceptibility analysis methods: a case study from Gindeberet district, Oromia Regional State, Central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 180. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104240> (accessed 15 February 2022).
 30. Sestraş P., Bilaşco Ş., Roşca S., Naş S., Bondrea M.V., Gâlgău R., Vereş I., Sălăgean T., Spalević V., Cîmpeanu S.M. Landslides susceptibility assessment based on GIS statistical bivariate analysis in the hills surrounding a metropolitan area. *Sustainability*, 2019, vol. 11, Iss. 5. Available at: <https://doi.org/10.3390/su11051362> (accessed 15 February 2022).

31. Nahayo L., Mupenzi C., Habiyaemye G., Kalisa E., Udahogora M., Nzabarinda V., Li L. Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method. *Environmental Engineering Science*, 2019, vol. 36, Iss. 8, pp. 892–902. Available at: <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493> (accessed 15 February 2022).
32. Saranaathan S.E., Mani S., Ramesh V., Venkatesh S.P. Landslide susceptibility zonation mapping using bivariate statistical frequency ratio method and GIS: a case study in part of SH 37 Ghat Road, Nadugani, Panthalur Taluk, The Nilgiris. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, vol. 49, Iss. 2, pp. 275–291. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s12524-020-01207-3> (accessed 15 February 2022).
33. Naranjo J., Westen C.J., Soeters R. Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis – a case study in Colombia. *ITC Journal*, 1994, Iss. 3, pp. 292–300. Available at: https://filetransfer.itc.nl/pub/westen/PDF_files/1994%20ITC%20Journal%20Naranjo%20et%20al.pdf (accessed 15 February 2022).
34. Thanh N.K., Miyagi T., Isurugi S., Van Tien D., Luong L.H., Ha D.N. Developing recognition and simple mapping by UAV/SfM for local resident in mountainous area in Vietnam – a case study in Po Xi Ngai Community, Laocai Province. *Understanding and reducing landslide disaster risk. Vol. 2. From mapping to hazard and risk zonation*. Eds. F. Guzzetti, S. Mihalic Arbanas. WLF 2020. Cham, Springer International Publ., 2021, pp. 103–109. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_10 (accessed 15 February 2022).
35. Dang K.B., Burkhard B., Müller F., Dang V.B. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, 2018, vol. 16, Iss. 4, pp. 767–781. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6> (accessed 15 February 2022).
36. Lee S., Pradhan B. Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. *Journal of Earth System Science*, 2006, vol. 115, Iss. 6, pp. 661–672. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12040-006-0004-0> (accessed 15 February 2022).
37. Kose D.D., Turk T. GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods. *Physical Geography*, 2019, vol. 40, Iss. 5, pp. 481–501. Available at: <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559583> (accessed 15 February 2022).
38. Oh H.-J., Lee S., Hong S.-M. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio technique with iterative random sampling. *Journal of Sensors*, 2017, vol. 2017. Available at: <https://doi.org/10.1155/2017/3730913> (accessed 15 February 2022).
39. Süzen M.L., Doyuran V. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 2004, vol. 45, Iss. 5, pp. 665–679. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8> (accessed 15 February 2022).
40. Van Westen C.J. Statistical landslide susceptibility analysis. *ILWIS 2.1 for Windows application guide*. Enschede, ITC Publ., 1997, pp. 73–84.
41. Long N.T., De Smedt F. Analysis and mapping of rainfall-induced landslide susceptibility in a Luoi District, Thua Thien Hue Province, Vietnam. *Water*, 2019, vol. 11, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.3390/w11010051> (accessed 15 February 2022).
42. Lei T., Zhang Y., Lv Z., Li S., Liu S., Nandi A.K. Landslide inventory mapping from bitemporal images using deep convolutional neural networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, vol. 16, Iss. 6, pp. 982–986. Available at: <http://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2889307> (accessed 15 February 2022).
43. Su Z., Chow J.K., Tan P.S., Wu J., Ho Y.K., Wang Y.-H. Deep convolutional neural network-based pixel-wise landslide inventory mapping. *Landslides*, 2021, vol. 18, Iss. 4, pp. 1421–1443. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6> (accessed 15 February 2022).
44. Getachew N., Meten M. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 2021, vol. 8, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z> (accessed 15 February 2022).
45. Soeters R., Van Westen C.J. Slope instability recognition analysis and zonation. *Landslides, investigation and mitigation. Special report (National Research Council (U.S.). Transportation Research Board)*. Eds. A.K. Turner, R.L. Schuster. Washington, D.C., National Academy Press Publ., 1996, pp. 129–177. Available at: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf> (accessed 15 February 2022).
46. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, vol. 240, Iss. 4857, pp. 1285–1293. Available at: <http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615> (accessed 15 February 2022).
47. Cantarino I., Carrion M.A., Goerlich F., Martínez Ibañez V. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 265–282. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4> (accessed 15 February 2022).

Received: 25 March 2022.

Information about the authors

Van B. Duong, lecturer, Hanoi University of Mining and Geology; postgraduate student, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Igor K. Fomenko, Dr. Sc., professor, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Trung K. Nguyen, senior researcher, Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology.

Thi Hong L. Vi, senior researcher, Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology.

Oleg V. Zerkal, Cand. Sc., head of the Laboratory of Engineering Geodynamics and Substantiation of Engineering Protection of Territories and Leading Research Scientist, Lomonosov Moscow State University.

Hong D. Vu, research scientist, Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources.