

УДК 551.435.627

ВЛИЯНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА КАРТИРОВАНИЕ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ К РАЗВИТИЮ ОПОЛЗНЕЙ

Зыонг Ван Бинь^{1,2},
duongvanbinh@humg.edu.vn

Фоменко Игорь Константинович²,
ifolga@gmail.com

Та Дык Тнинь^{1,3},
taducthinh@humg.edu.vn

Нгуен Чунг Киен⁴,
kien.mgri@gmail.com

Зеркаль Олег Владимирович⁵,
igzov@mail.ru

Горобцов Денис Николаевич²,
dngorobtsov@mail.ru

Бу Хонг Данг⁶,
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 ассоциация инженерной геологии и окружающей среды,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Фунгхынг, 91.

⁴ Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Чуаланг, 84.

⁵ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1.

⁶ Вьетнамский институт геонаук и минеральных ресурсов,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Тьентханг, 67.

Актуальность. Оползни являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий в мире. Во Вьетнаме оползни также приводили к значительным человеческим жертвам и материальным потерям. Системная оценка оползневой опасности является важнейшим компонентом стратегии Вьетнама по предотвращению стихийных бедствий.

Целью исследования являлась оценка оползневой восприимчивости района Батсат провинции Лаокай (Вьетнам) с использованием четырех разрешений цифровой модели рельефа (10, 30, 40 и 60 м) и девяти факторов оползнеобразования: экспозиция склонов, высота над уровнем моря, крутизна склонов, расстояние до дорог, расстояние от разломов, расстояние до эрозионной сети, среднемесячное количество осадков, землепользование и тип коры выветривания.

Объектом исследования является оползневая восприимчивость в районе Батхат провинции Лаокай Вьетнама. Качество имеющихся исходных данных играет важную роль в достоверности результатов моделирования оползневой восприимчивости территорий к оползневому процессу. Одним из наиболее значимых параметров для выполнения анализа является информация о рельефе местности, на основе которой строятся карты экспозиции и крутизны склонов, горизонтальной и вертикальной расчлененности рельефа и т. д. Качество цифровой модели рельефа может быть оценено на основе ее пространственного разрешения.

Методы: метод фактора достоверности, фрактальный метод.

Результаты. Выполненные исследования показали статистически значимую взаимосвязь между распределением оползней и факторами оползнеобразования в районе изучения. В результате территория была разделена на пять зон по восприимчивости к оползневому процессу: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая. Зона с очень низкой оползневой восприимчивости составляет менее 10 % района исследования, в то время как зона с очень высокой восприимчивостью изменяется от 14,95 до 18,32 % в зависимости от пространственного разрешения цифровой модели рельефа. Анализ кривой ошибок показал, что все модели, вне зависимости от разрешения цифровой модели рельефа обладают хорошей эффективностью прогнозирования, площадь под кривой ошибок – $AUC > 70$ %. Одновременно на основе результатов анализа с использованием метода кривой ошибок и фрактального метода было получено, что модель с пространственным разрешением 60 м имеет наибольшую достоверность. Этот нетривиальный вывод может быть объяснен тем фактом, что надежность результатов оценки оползневой восприимчивости зависит не столько от разрешения цифровой модели рельефа, сколько от соотношения разрешения цифровой модели рельефа и средней площади оползней в районе исследования. Этот вывод доказывает необходимость отображать на картах инвентаризации оползней не только их местоположения, но и подробные морфологические характеристики.

Ключевые слова:

Оползневая восприимчивость территории, разрешение цифровой модели рельефа, метод фактора достоверности, фрактальный метод, ГИС, площадь под кривой ошибок, Батсат, Вьетнам.

Введение

Оползни являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий в мире, приводящих к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам. Согласно исследованию У. Хака (2019), 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 [1]. Общее число оползней со смертельным исходом в период с 2004 по 2016 гг. (включительно) составило 4862 человек, исключая случаи, вызванные землетрясениями, большинство оползней произошло в Азии (75 %) [2]. Во Вьетнаме оползни также приводили к значительным человеческим жертвам, а ежегодный ущерб от оползневых процессов оценивается в 100 миллионов долларов США [3–6]. Согласно данным Управления по борьбе со стихийными бедствиями (Ханой, октябрь 2019 г.), в период с 2000 по 2015 гг. во Вьетнаме произошло 250 ливневых паводков и вызванных ими оползней. Эти события стали причиной значительного социально-экономического ущерба: 779 человек погибли, 426 человек получили ранения, было разрушено 9700 домов, пострадало около 75000 гектаров сельскохозяйственных земель.

Расположенная в северном горном регионе Вьетнама провинция Лаокай особенно подвержена оползням из-за сочетания неблагоприятных факторов, включая обильные осадки, контрастный рельеф и обезлесение [7, 8]. С 2005 по 2015 гг. в этом районе был выявлен 641 активный оползень. На основе исследования Ч.Й. Нгуен [9] с 1965 по 2006 гг. в данном регионе от схода оползней погибло 150 человек и был разрушен 361 дом. Существенные экономические и социальные потери, связанные с активизацией оползневых процессов, привели к пониманию необходимости их систематического изучения. Увеличение ущерба от стихийных бедствий было связано со следующими основными причинами [10]: (1) неточностью прогнозирования; (2) низкой эффективностью мероприятий по их предотвращению. Таким образом, повышение достоверности прогнозирования является одним из важнейших компонентов национальной стратегии предотвращения и уменьшения последствий от стихийных бедствий.

Предрасположенность территории к развитию оползней, или оползневая восприимчивость, – это возможность развития оползневых процессов в исследуемом районе на основе одновременной оценки различных факторов оползнеобразования [11, 12]. Картирование оползневой восприимчивости (Landslide Susceptibility Mapping – LSM) – это процесс определения пространственного распределения оползней и специальная инженерно-геологическая типизация местности на основе оценки ее устойчивости к развитию оползневого процесса [13, 14].

На настоящий момент в инженерной геологии разработано множество подходов для картирования оползневой восприимчивости территорий в различных масштабах. Их можно разделить на три группы: качественные, полуколичественные и количественные [15–17].

Качественные подходы основаны на эвристических методах оценки, анализе карт инвентаризации оползней, анализе геоморфологических условий. Они, как правило, находят применение при региональной оценке оползневой опасности на больших территориях или при недостатке исходных данных.

Количественные подходы включают: статистические методы; методы, основанные на искусственном интеллекте и машинном обучении; методы математического моделирования [18].

Кроме того, сочетание качественного и количественного подходов известно как полуколичественный, или гибридный, подход. К полуколичественным подходам могут быть отнесены методы анализа решений по нескольким критериям.

Количественные подходы рассматриваются как наиболее объективные. Они зависят главным образом от используемых математических моделей и значительно меньше от человеческих суждений и опыта. Качественные подходы более субъективны [17, 19, 20].

Помимо используемых подходов, важную роль в достоверности результатов моделирования оползневой восприимчивости территорий к оползневому процессу играет качество имеющихся исходных данных. Важным условием для получения надёжных результатов является объективность информации по инвентаризации оползней [21]. Разработка карт оползневой восприимчивости зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и факторами оползнеобразования, которые должны быть учтены при выполнении анализа. Одним из наиболее значимых параметров является информация о рельефе местности, на основе которой строятся карты экспозиции и крутизны склонов, горизонтальной и вертикальной расчлененности рельефа и т. д. [22, 23]. Качество цифровой модели рельефа (ЦМР) может быть оценено на основе ее пространственного разрешения. Пространственное разрешение – величина, определяющая количество точек (элементов растрового изображения) на единицу площади (или единицу длины). Разрешение растровой структуры данных может быть охарактеризовано в терминах размера ячеек сетки.

Другим критерием качества ЦМР является детальность исходных данных, использованных для построения цифровой модели рельефа. Очевидно, что ЦМР, построенная с использованием топооснов масштаба 1:100000 (с соответствующим шагом изолиний рельефа), будет менее качественной, чем ЦМР, построенная с использованием топооснов масштаба 1:10000 (с соответствующим шагом изолиний рельефа), даже при условии сходного пространственного разрешения итогового раstra. Те же требования применимы и к данным дистанционного зондирования.

В этом исследовании анализировалось влияние разрешения ЦМР на достоверность оценки оползневой восприимчивости в Батсате, северном горном районе провинции Лаокай (Вьетнам). Для построения статистических количественных моделей (CF10, CF30, CF40 и CF60) на основе ГИС были выбраны четыре значения разрешения ЦМР (10, 30, 40 и 60 м).

Характеристика района исследования

Батсат – район площадью 1050,2 км² (рис. 1), расположенный в зоне поднятия Фансипан, имеющий сложную геологическую структуру со множеством активных разломов [24]. Более 70 % его территории занимают горы. Как следствие, в геоморфологическом отношении он характеризуется высоким вертикальным расчленением рельефа (минимальная отметка рельефа 75 м, максимальная более 3000 м над уровнем моря), а 40 % склонов имеют уклоны порядка 20–30 градусов. В геологическом строении района принимают участие магматические (47 % площади сложено гранодиоритами и гранитами) и метаморфические (53 % площади сложено кварц-биотитовыми и графитовыми сланцами, песчаниками, алевролитами и амфиболитами) породы [25].

Климат в районе Батсат тропический муссонный. Результатом этого является наличие двух сезонов: влажного (май–октябрь) и сухого (ноябрь–апрель). Область исследования находится в центре обильных осадков Хоанг Лиен Шон. Среднегодовое суммарное количество осадков составляет более 2000 мм [8]. Наибольшее количество осадков приходится на летний период, составляя 70–85 % от общего годового количества осадков.

В последние годы вследствие активного хозяйственного освоения район Батсат столкнулся с проблемой активизации оползневых процессов, увеличении их частоты и масштабов проявления.

Сильные дожди являются основным триггером активизации и развития оползней на рассматриваемой территории. На рис. 2 показаны последствия активизации оползней в районе Батсат, которые сопровождались повреждениями жилых домов, разрушениями объектов инфраструктуры, выводом из оборота сельскохозяйственных угодий. 13 сентября 2004 г. в коммуне Финнган произошел оползень, ставший причиной разрушения четырех домов и приведший к гибели 23 человек (Рис. 2, а). В том же году образовался крупный оползень вблизи здания Народного комитета района Батсат (Рис. 2, b). В июле 2013 г. произошел оползень в коммуне Мыонгхум (Рис. 2, c), ставший причиной изменения русла р. Мыонгхум и нанесший ущерб сельскохозяйственным угодьям.

Исходные данные и методы исследования

Карта инвентаризации оползней

Для разработки эффективных прогнозных моделей оценки оползневой восприимчивости, опасности и риска необходимо создать достоверные карты инвентаризации оползней в районе исследований [26, 27]. Наряду с отображением пространственного распределения оползней карта инвентаризации может включать другие виды данных, такие как: геометрические характеристики оползня (размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневыми деформациями), особенности геологического строения (литология, структура, свойства грунтов) и гидрогеологические условия.

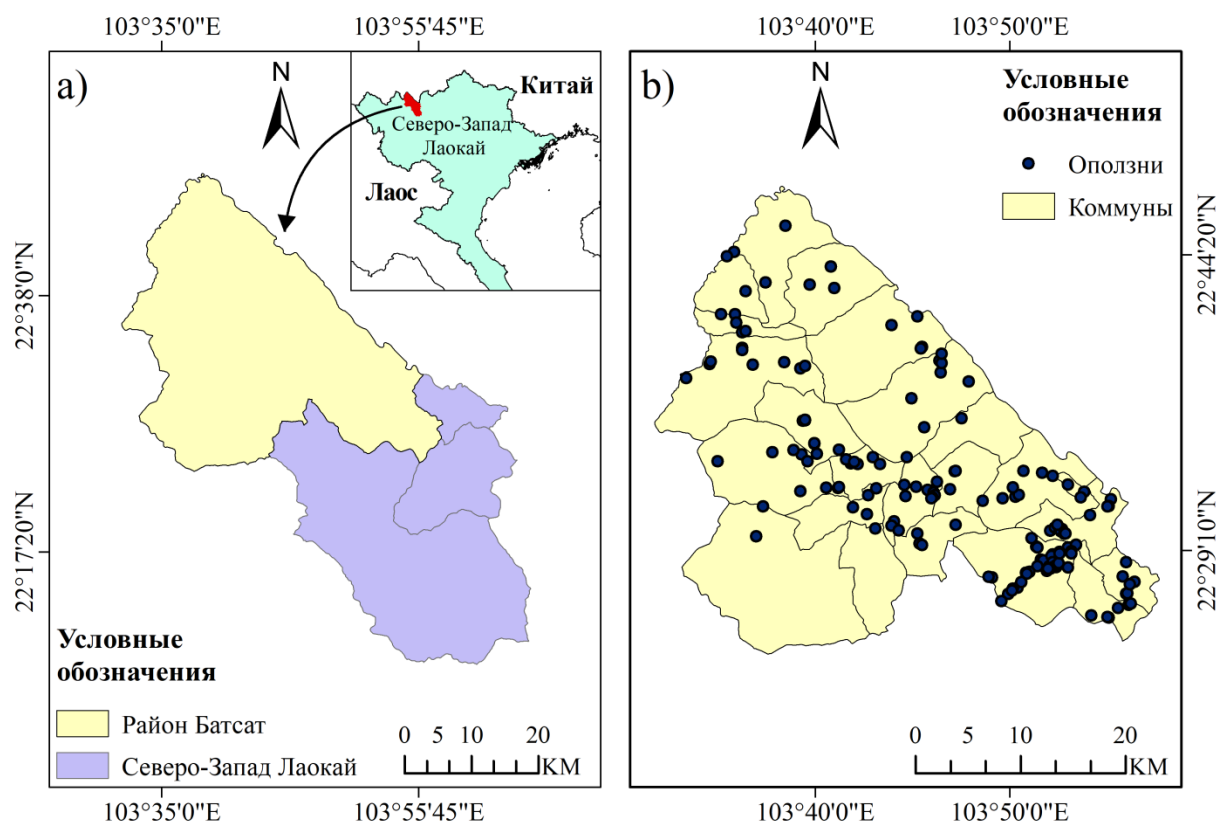


Рис. 1. Расположение района исследования

Fig. 1. Location of study area

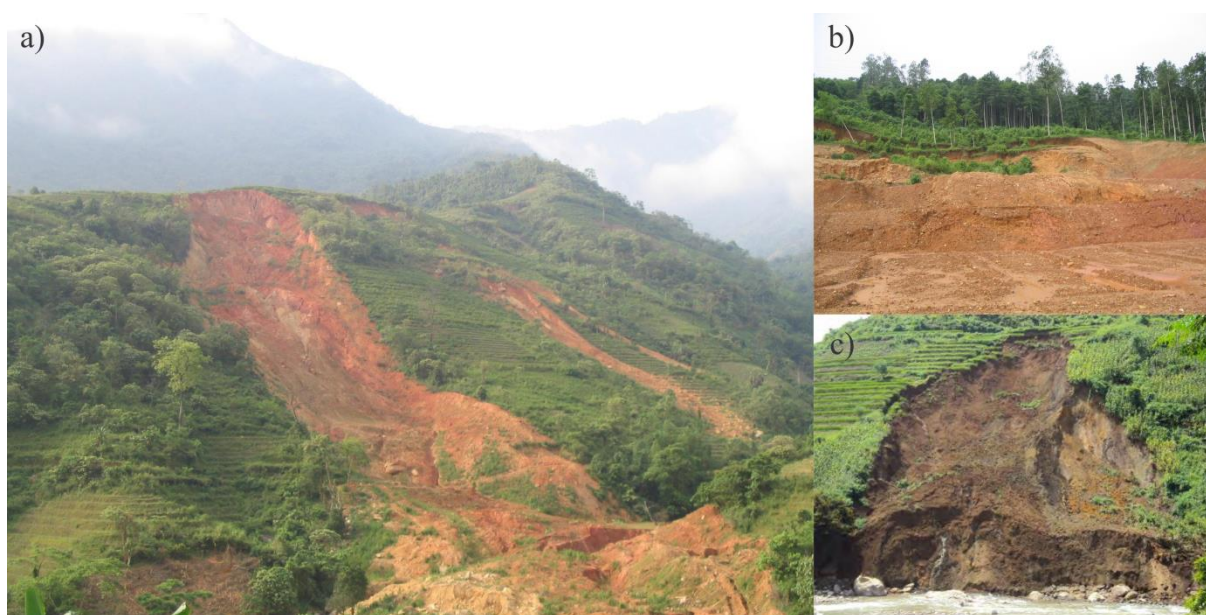


Рис. 2. Фотографии оползней: в коммуне Финнган (а), в центре района Батсат (b), в коммуне Мьонгхум (с). Фото Ч.К. Нгуена

Fig. 2. Photo of landslide sites: in Phin Ngan commune (a), in the center of Bat Xat district (b), in Muong Hum commune (c). Photo by T.K. Nguyen

При построении карт инвентаризации могут быть использованы различные подходы [28], основными из которых являются: сбор исторических данных о появлении оползней; полевые исследования (оползневая съемка); анализ данных дистанционного зондирования, в том числе и путем их сравнения с результатами оползневой съемки. Выбор того или иного подхода определяется целью и масштабом исследований, а также доступностью необходимых исходных данных (масштаба базовых карт, разрешающей способности

данных дистанционного зондирования, детальности оползневой съемки и т. д.). Современные методы картирования основаны на многоспектральной съемке, спутниковых, воздушных и наземных технологиях дистанционного зондирования, в том числе с использованием LIDAR (Light Detection and Ranging) картографирования [29]. Использование геоинформационных систем (ГИС) значительно упрощает составление и обновление карт инвентаризации оползней, а также повышает их достоверность [17].

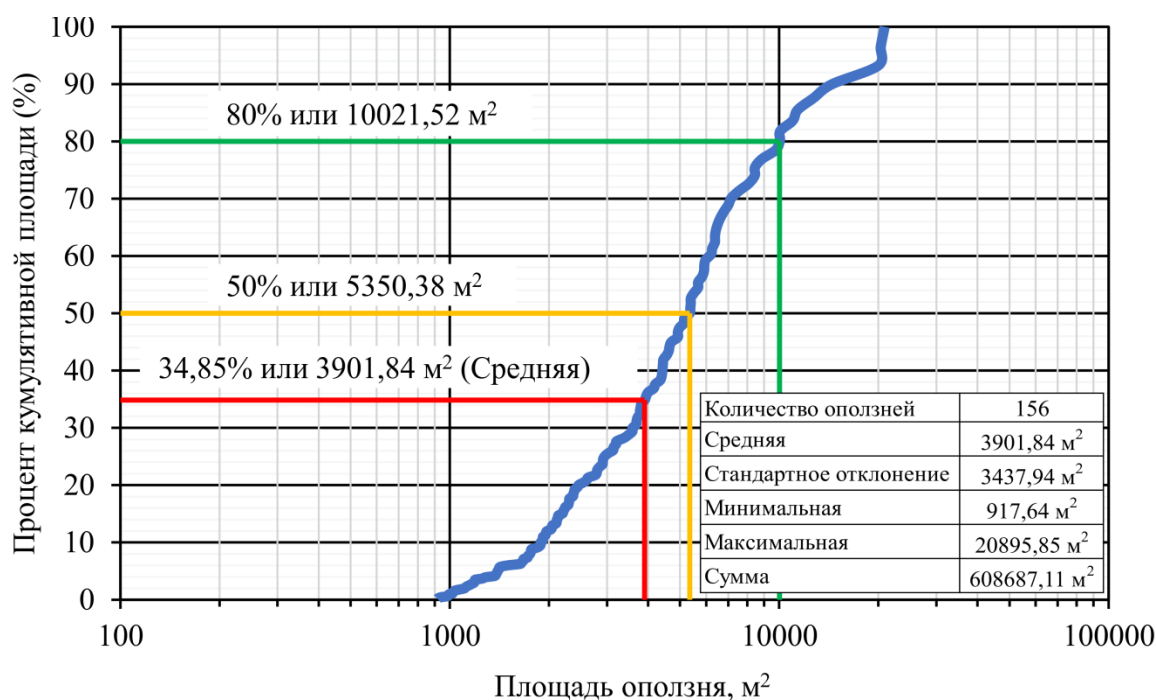


Рис. 3. Статистика оползней в районе исследования

Fig. 3. Landslide statistics in the study area

После создания карта инвентаризации оползней может быть разделена на обучающую выборку и данные для проверки. Обучающая выборка используется для построения модели анализа взаимосвязи между распределением исторических оползней и выбранными факторами оползнеобразования. Данные для проверки используются для оценки достоверности полученной модели предрасположенности территории к развитию оползней.

В данном исследовании карта инвентаризации оползней района Батсат была построена с использованием аэрофотосъемки и результатов полевых работ. В итоге было выявлено в общей сложности 156 оползней. Наименьшая площадь оползня составила 917,64 м², а самый крупный оползень имел размер 20895,85 м².

Несмотря на тот факт, что на итоговой карте инвентаризации оползни отображались в виде точек, указывающих их местоположение (геометрические характеристики оползня не учитывались), выполненный статистический анализ (рис. 3) показал следующее распределение оползней по размерам: 6 оползневых тел имеют площадь менее 1000 м² и суммарно занимают 0,9 % (5748,15 м²) от площади исследования; 112 оползневых тел имеют площадь от 1000 до 5000 м², что составляет 46,5 % (282946,80 м²) от площади исследования; 29 оползневых тел имеют площадь от 5000 до 10000 м², что составляет 31,1 % (189155,35 м²) от площади исследования, и 9 оползневых тел имеют площадь более 10000 м², что составляет 21,5 % (130836,81 м²) от площади исследования. Наибольшее количество оползней зарегистрировано в коммунах: Финнган (35 оползней); Куангким (14 оползней); Бансео (12 оползней).

Для оценки достоверности модели оползневой восприимчивости в районе исследования выявленные в процессе инвентаризации оползни были случайно разделены на две группы: 75 % (117 оползней) использовались для обучающей модели, а 25 % (39 оползней) – для оценки достоверности модели.

Факторы оползнеобразования

Разработка карт оползневой восприимчивости зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и оползневыми факторами. Для каждой территории набор таких факторов может существенно различаться. В качестве «основных» для района Батсат на основе опыта региональных оценок оползневой опасности территории Вьетнама были выбраны следующие девять факторов: высота над уровнем моря, крутизна склонов, экспозиция склонов, расстояние до дорог, расстояние до эрозионной сети, расстояние от разломов, землепользование, количество осадков и тип коры выветривания (рис. 4).

Карта землепользования была подготовлена в рамках специального национального научно-технического проекта (номер гранта ĐТĐL.CN-81/21). Карта количества осадков была подготовлена с использованием данных метеорологических станций в провинции Лаокай.

Для выявления взаимосвязи между факторами и распределением оползней каждый фактор был разделен на классы (Таблица). На пять классов были разделены следующие факторы: высота над уровнем моря, крутизна склонов, расстояние до дорог, расстояние до эрозионной сети, расстояние от разломов и землепользование. Экспозиция склонов была разделена на девять классов, а тип коры выветривания – на четыре класса.

Таблица. Классы факторов оползнеобразования
Table. Landslide causative factor categories

Факторы оползнеобразования Landslide causative factors	Классы Classes
Высота над уровнем моря, м Elevation, m	(1) <500; (2) 500–1000; (3) 1000–1500; (4) 1500–2000; (5) >2000
Крутизна склонов, град. Slope, deg.	(1) 0–10; (2) 10–20; (3) 20–30; (4) 30–40; (5) >40
Экспозиция склона Slope aspect	(1) Плоский/Flat (П); (2) Северный/North (С); (3) Северо-восточный/Northeast (С-В); (4) Восточный/East (В); (5) Юго-восточный/Southeast (Ю-В); (6) Южный/South (Ю); (7) Юго-западный/Southwest (Ю-З); (8) Западный/West (З); (9) Северо-западный/Northwest (С-З)
Расстояние до дорог, м Distance to roads, m	(1) 0–100; (2) 100–200; (3) 200–300; (4) 300–400; (5) >400
Расстояние до эрозионной сети, м Distance to drainage, m	(1) 0–100; (2) 100–200; (3) 200–300; (4) 300–400; (5) >400
Расстояние от разломов, м Distance to faults, m	(1) 0–500; (2) 500–1000; (3) 1000–1500 м; (4) 1500–2000; (5) >2000
Землепользование Land use	(1) Голая земля и скалистые горы Bare land and rock mountain (ГЗ); (2) Естественный лес Natural forest (ЕЛ); (3) Искусственный лес Artificial forest (ИЛ); (4) Сельскохозяйственные угодья Agricultural land (СУ); (5) Городские районы Urban areas (ГР)
Количество осадков, мм Precipitation, mm	(1) 196–240; (2) 240–290; (3) 290–340; (4) 340–390; (5) 390–445
Кора выветривания Weathering crust	(1) Сиалферит/Sialferite (Сф); (2) Сапролит/Saprolite (Са); (3) Сиалит/Sialite (Си); (4) Феросиалит/Ferosialite (Фс)

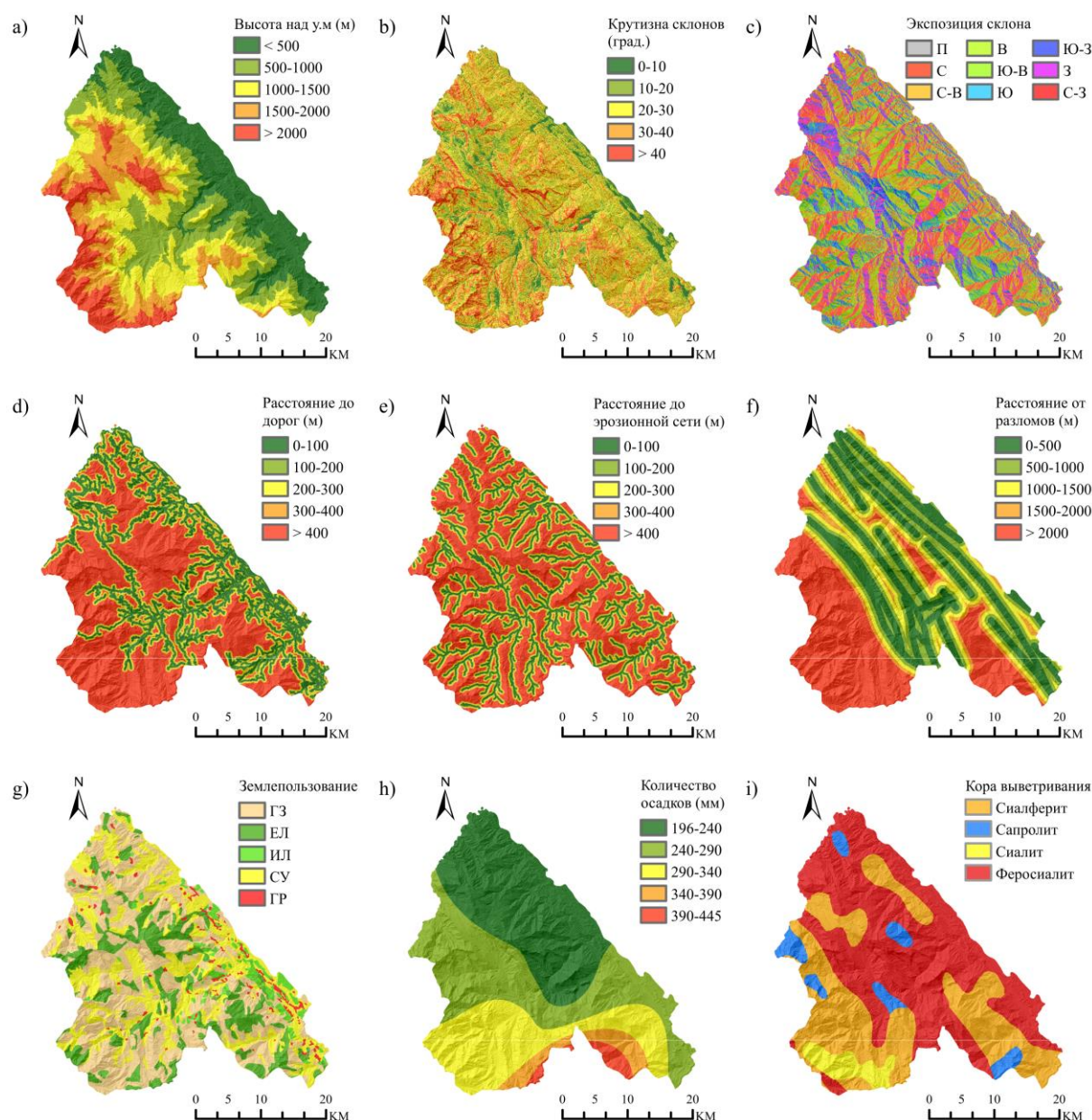


Рис. 4. Карты факторов: а) высота над уровнем моря; б) крутизна склонов; в) экспозиция склонов; д) расстояние до дорог; е) расстояние до эрозионной сети; ф) расстояние от разломов; г) землепользование; г) количество осадков; и) тип коры выветривания.

Fig. 4. Map of factors: a) elevation; b) slope; c) slope aspect; d) distance to roads; e) distance to drainage; f) distance to faults; g) land use; h) precipitation; i) weathering crust

Методы исследования и валидация модели

Метод фактора достоверности (англ. Certainty Factor (CF)), предложенный Е.Х. Шортлиффом в 1975 г. [30], позволяет оценить оползневую восприимчивость путем изучения статистической взаимосвязи между оползневыми факторами и произошедшими оползнями [31–33]. Он основан на байесовской интерпретации условной вероятности, в которой степень доверия к событию основывается на априорных знаниях, таких как результаты предыдущих экспериментов или личное доверие. Байесовский подход позволяет «переставить причину и следствие», т. е. по известному факту события вычислить вероятность того, что оно было вызвано данной причиной. События, отражаю-

щие действие «причин», в данном случае называют гипотезами. Безусловную вероятность справедливости гипотезы называют априорной (изначальная степень уверенности субъекта в её истинности), а условную – с учетом факта произошедшего события – апостериорной (степень уверенности субъекта после получения новых опытных данных). В данном исследовании значения CF, присвоенные классам факторов оползнеобразования, определялись на основе уравнения (1):

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{если } PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & \text{если } PP_s \geq PP_a \end{cases} \quad (1)$$

где PPa – условная вероятность возникновения оползня в классе фактора (например, класс фактора крутизны склонов от 0 до 10 градусов), определяемая отношением площади оползня к площади класса фактора; PPs – априорная вероятность общего количества оползневых событий в районе исследования, определяемая отношением общей площади произошедших оползней к площади исследования. Значение CF могут изменяться от -1 до $+1$, причем отрицательные значения указывают на низкую вероятность, а положительные – на высокую вероятность активации оползневого процесса в каждом классе факторов. Если значение CF близко к нулю, информации недостаточно, чтобы сделать какие-либо выводы о вероятности возникновения оползня [34, 35]. При использовании модели линейной регрессии, значения CF классов факторов в диапазоне от -1 до $+1$ нормируются к весам классов (NCF), которые могут изменяться от 0 до 1 [33] и определяются на основе уравнения (2):

$$NCF = \frac{CF_i + 1}{1 - (-1)} / \sum_{i=1}^n \frac{CF_i + 1}{1 - (-1)}. \quad (2)$$

Наконец, индекс LSI рассчитывается по следующему уравнению (3):

$$LSI = \sum NCF_i \quad (3)$$

где LSI – индекс оползневой восприимчивости, а NCF_i – значение NCF класса фактора i .

Валидация модели

Важным этапом подготовки карт оползневой восприимчивости является определение степени соответствия полученных моделей реальным фактическим данным (валидация моделей). Эта задача может быть решена путем сравнения полученных карт устойчивости территории с картой инвентаризации оползней. В данном исследовании валидация моделей осуществлялась с использованием метода анализа кривой ошибок ROC (англ. Receiver Operating Characteristic) [36, 37] и фрактального метода [38, 39].

ROC-анализ – это метод оптимального разграничения двух классов, сформированных с помощью диагностического теста. Кривая ROC представляет собой графическое отображение взаимосвязи между вероятностью наличия истинно положительных значений, или чувствительности (правильно предсказанного события), на оси X и ложноположительной вероятностью, или специфичностью (неправильно предсказанным событием), по оси Y. Кривая ROC показывает связь между вероятностью истинно положительных идентифицированных оползней и вероятностью ложно положительных идентифицированных оползней по мере изменения вероятности предельного значения. Чем ближе кривая ROC приближается к левому краю графика и верхней его границе, тем точнее будут результаты анализа. Так как чувствительность стремится к 1, а специфичность стремится к 0, то мерой адекватности модели может служить площадь под кривой ошибок [40] – чем больше площадь, тем точнее классификация. Значение AUC могут изменяться от 0,5 для моделей с нулевой точностью прогнозирования до 1 для моделей с идеальной точностью прогнозирования [37]. Значения AUC были рассчитаны с использованием 75 % оползней

(обучающая выборка) и 25 % (данные для проверки) от общего количества оползней соответственно.

Фрактальный метод, впервые предложенный Бенуа Мандельбротом [38, 39], в последние годы эффективно используется в исследованиях по оползневой восприимчивости территорий [41, 42]. Он может быть охарактеризован как степенной закон, описываемый уравнением (4):

$$p(r) = \frac{C}{r^D}, \text{ или } \ln(p(r)) = -D \ln(r) + \ln C, \quad (4)$$

где r – характеристика измеряемой шкалы; p – измеренное значение по соответствующей шкале r ; C – постоянное значение; D – фрактальная размерность [43].

В этом исследовании фрактальная размерность использовалась для сравнения достоверности четырех моделей оползневой восприимчивости (CF_{10} , CF_{30} , CF_{40} и CF_{60}) с различным пространственным разрешением ЦМР (10, 30, 40 и 60 м). Оценка проводилась с использованием обучающей выборки и данных для проверки. Модели с большими значениями D будут более точно прогнозировать оползневую восприимчивость в районе исследования. Фрактальный метод включает в себя следующие шаги [44]:

- 1) вычисление относительной плотности оползней (P);
- 2) ранжирование классов в порядке убывания значения P в соответствии со шкалой характеристик r (пространственное разрешение ЦМР);
- 3) построение фрактальной модели путем линейной подгонки данных, нанесенных на двойные логарифмические координаты (S , r), где (r) – характеристика измеряемой шкалы, а (S) – кумулятивная сумма значений P , определяемая на основе уравнения (5):

$$\begin{aligned} \{P\} &= \{P_1, P_2, \dots, P_n\}, \\ \{S_1\} &= \{P_1, P_1 + P_2, \dots, P_1 + P_2 + \dots + P_n\}, \\ \{S_2\} &= \{S_{11}, S_{11} + S_{12}, \dots, S_{11} + S_{12} + \dots + S_{1n}\}. \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (5)$$

В этом исследовании мы использовали коэффициент корреляции линейной подгонки ($R^2 > 0,999$) в качестве критерия для приостановки преобразования кумулятивной суммы.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе моделей CF была проанализирована взаимосвязь между факторами, вызывающими оползни, и фактическим возникновением оползней в районе проводимых исследований с учетом пространственного разрешения ЦМР.

Интерпретация полученных результатов (рис. 5) показала, что в исследуемом районе оползни преимущественно развиваются на сиаферитовом типе коры выветривания. Наибольшую восприимчивостью к оползневому процессу имеют территории с абсолютными отметками менее 500 м над уровнем моря и крутизной склонов до 30 градусов. Наблюдается повышенная концентрация оползней вблизи городских районов, сельскохозяйственных угодий и «голых земель», а также в радиусе 100 м от дорог. Выполненный анализ доказал наличие корреляции между количеством осадков и проявлениями оползневого процесса.

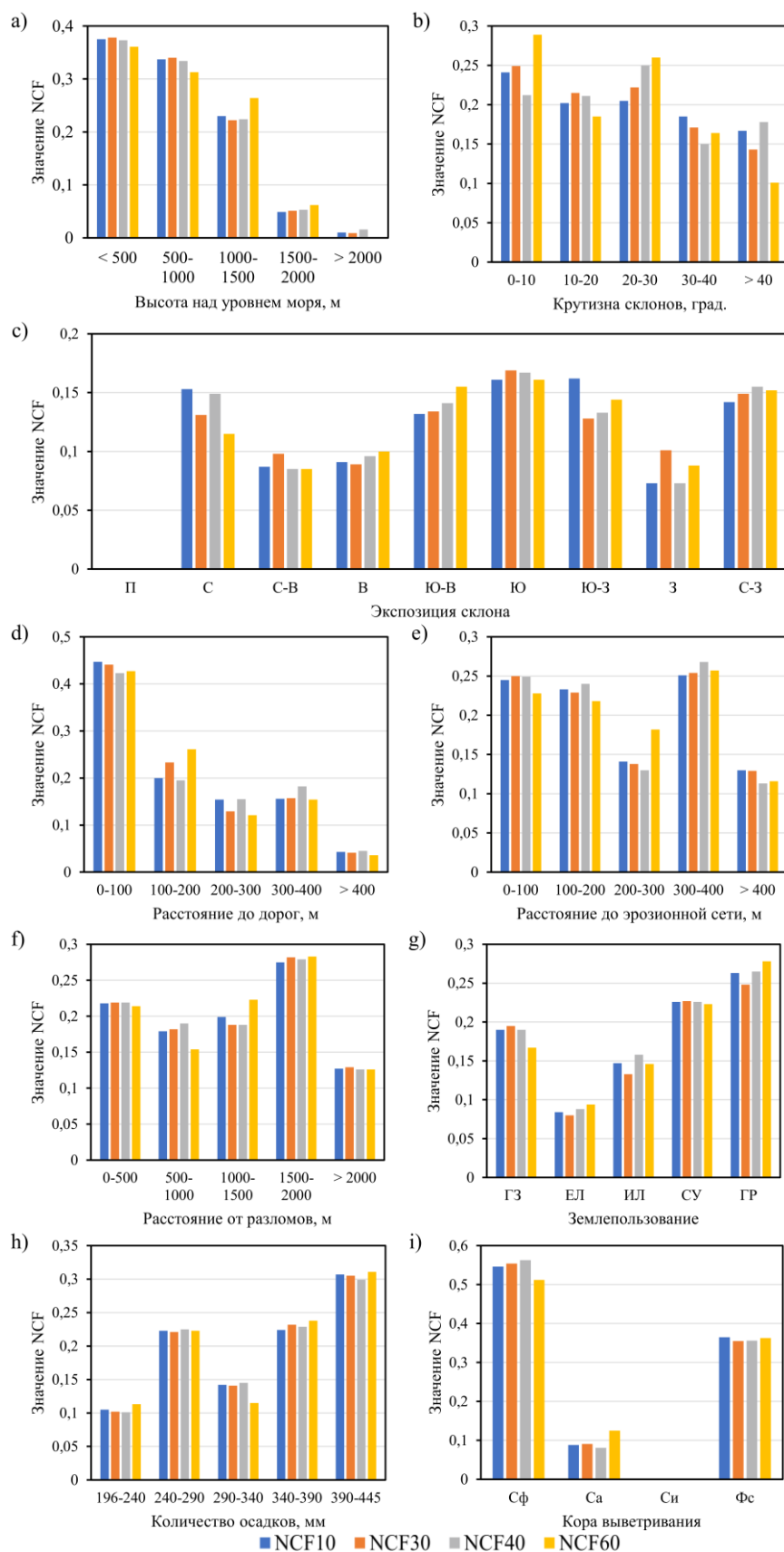


Рис. 5. Статистическая взаимосвязь между историческими оползнями и классами факторов: а) высота над уровнем моря; б) крутизна склонов; в) экспозиция склонов; д) расстояние до дорог; е) расстояние до эрозионной сети; ф) расстояние от разломов; г) землепользование; ж) количество осадков; з) тип коры выветривания

Fig. 5. Statistical relationship between historical landslides and classes of factors, including а) elevation; б) slope; в) slope aspect; д) distance to roads; е) distance to drainage; ф) distance to faults; г) land use; ж) precipitation; з) weathering crust

При составлении карт индекса оползневой восприимчивости его значения были рассчитаны с использованием уравнения (3). Их анализ позволил установить незначительную зависимость LSI от пространственного разрешения ЦМР: для модели CF10 значения LSI изменяются от 0,776 до 2,777 (рис. 6, а); для модели CF30 значения LSI изменяются от 0,761 до 2,792 (рис. 7, а); для модели CF40 значения LSI изменяются от 0,756 до 2,785 (рис. 8, а); для модели CF60 значения LSI изменяются от 0,673 до 2,762 (рис. 9, а).

При использовании метода классификации естественных границ Дженкса в ArcGIS, на основе карт LSI были созданы карты районирования территории по оползневой восприимчивости (LSZ map) с учетом пространственного разрешения ЦМР 10, 30, 40 и 60 м (рис. 6, б; 7, б; 8, б; 9, б соответственно). В результате

область исследования была разделена на пять зон по оползневой восприимчивости: с очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой восприимчивостью.

Влияние пространственного разрешения ЦМР на размеры зон с различной оползневой восприимчивостью приведено на Рис. 10. Размер зоны со средней оползневой восприимчивостью оценивается всеми моделями (CF10, CF30, CF40 и CF60) практически одинаково. Однако размер зоны с очень высокой оползневой восприимчивостью (порядка 15 % от площади территории), спрогнозированный на основе моделей CF10, CF30, CF40, имеет значимое отличие от размера (18,3 % от площади территории), полученного на основе модели CF60. Таким образом, полученные результаты могут привести к потенциальной переоценке оползневой опасности в исследуемом районе.

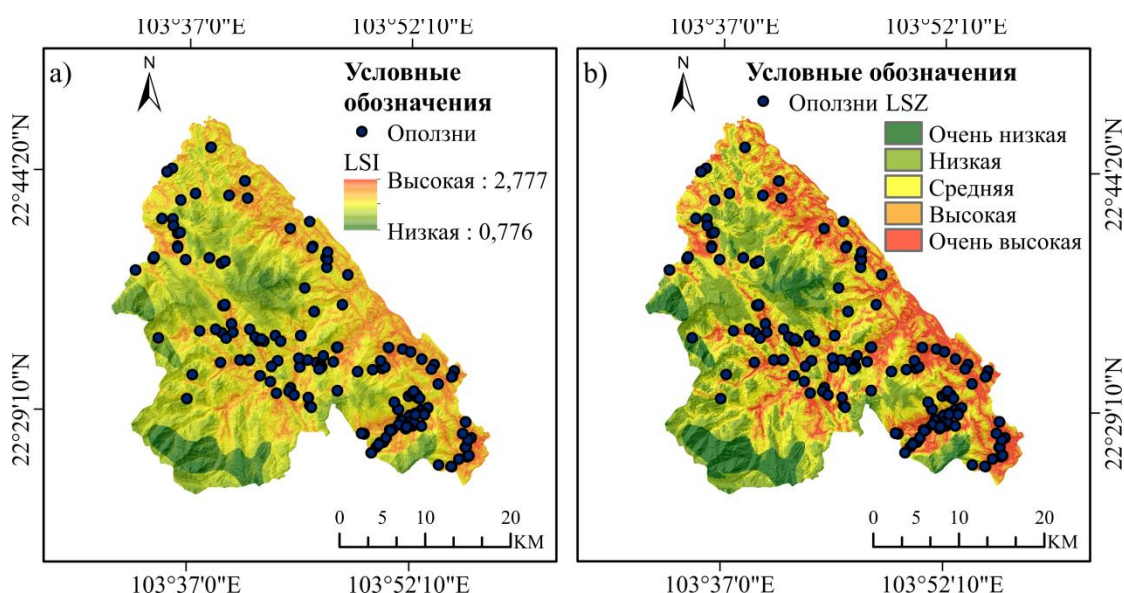


Рис. 6. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования территории по оползневой восприимчивости (б) с применением 10 м ЦМР

Fig. 6. LSI map (a), landslide susceptibility zonation (LSZ) map (b) using 10 m DEM

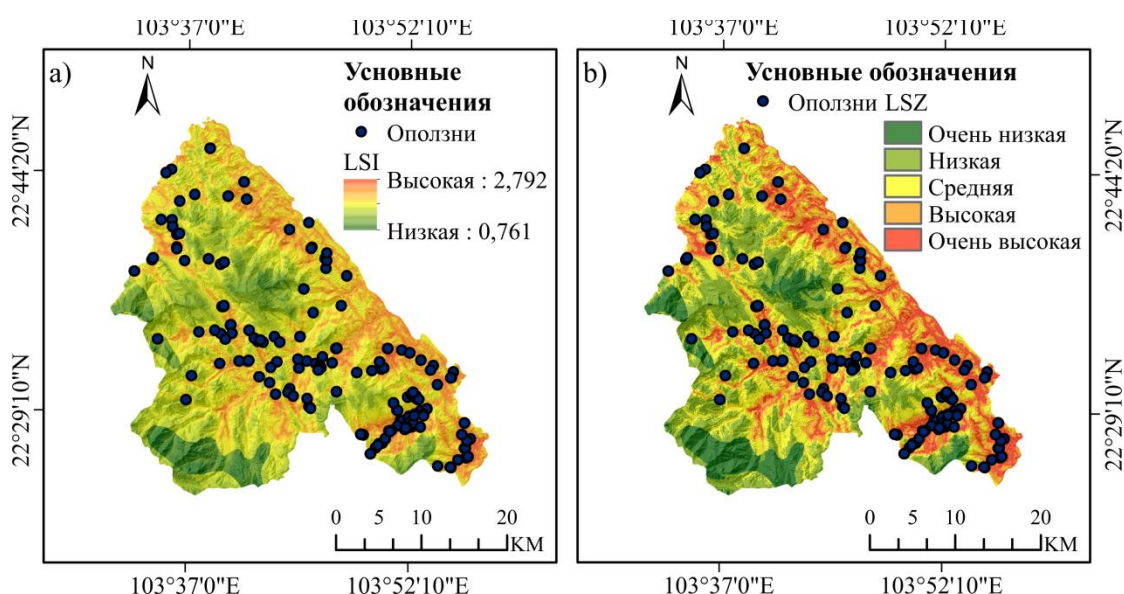


Рис. 7. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования оползневой восприимчивости с применением 30 м ЦМР

Fig. 7. LSI map (a), LSZ map (b) using 30 m DEM

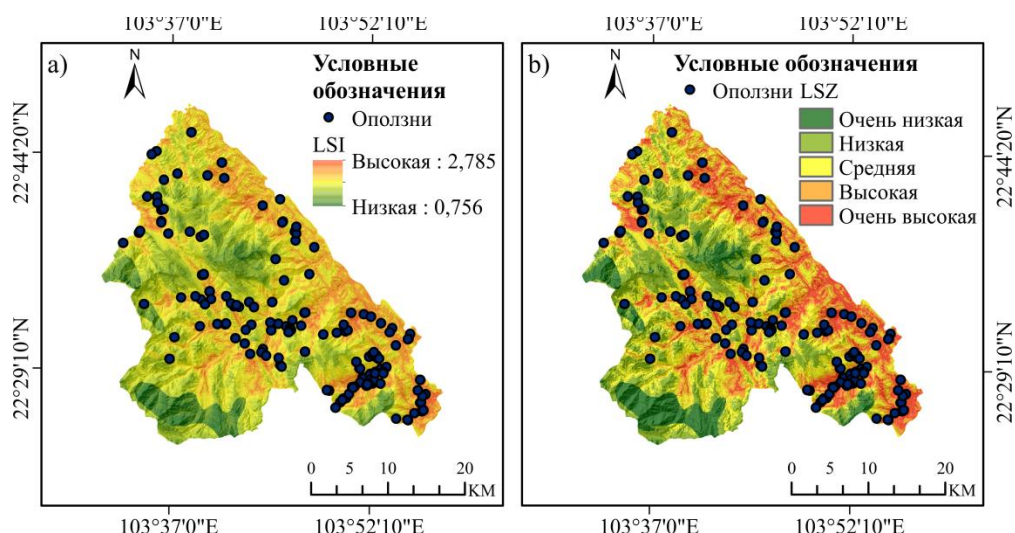


Рис. 8. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования оползневой восприимчивости с применением 40 м ЦМР
Fig. 8. LSI map (a), LSZ map (b) using 40 m DEM

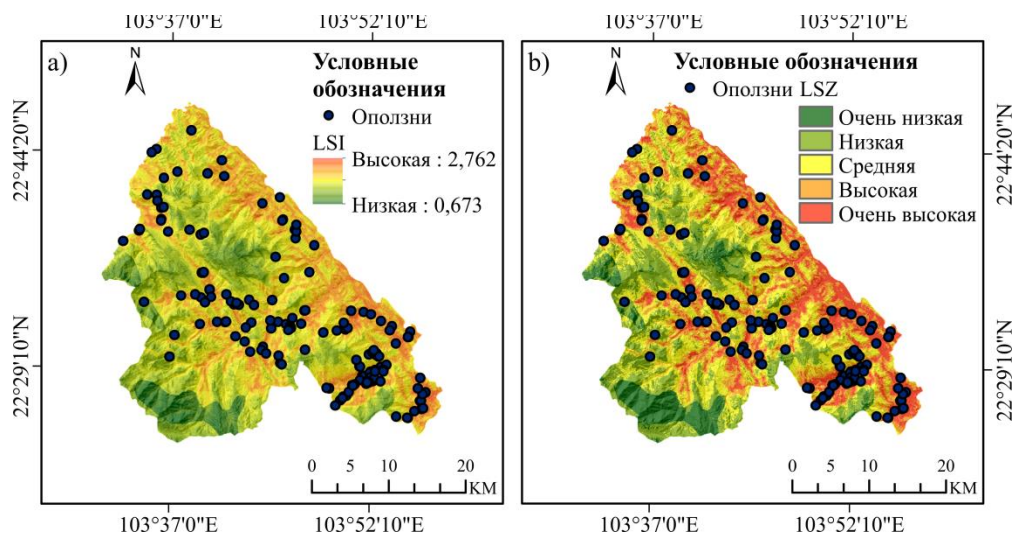


Рис. 9. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования оползневой восприимчивости с применением 60 м ЦМР
Fig. 9. LSI map (a), LSZ map (b) using 60 m DEM

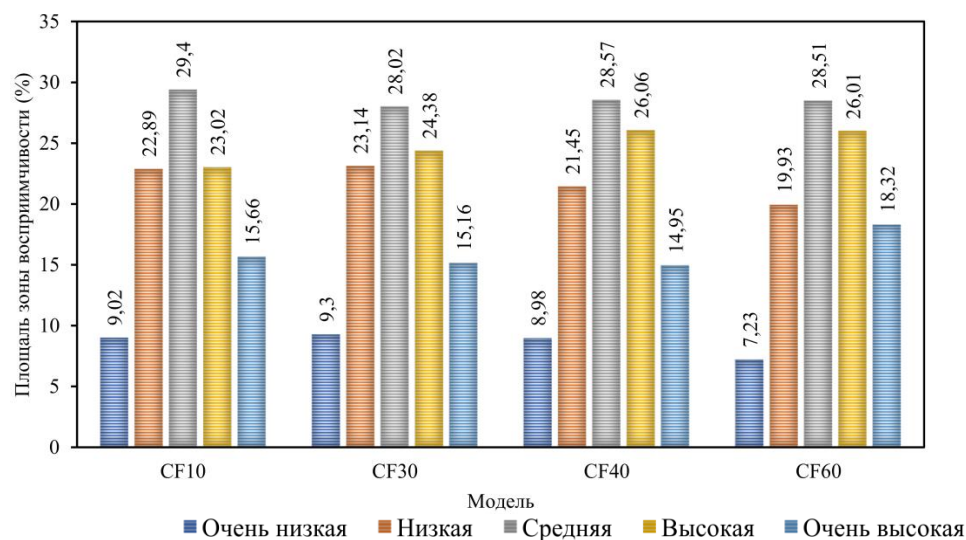


Рис. 10. Размеры зон с различной оползневой восприимчивостью с учетом пространственного разрешения ЦМР 10, 30, 40 и 60 м

Fig. 10. Sizes of zones with varying landslide susceptibility, considering the DEM spatial resolution of 10, 30, 40, and 60 m

Валидация моделей CF10, CF30, CF40 и CF60, полученная на основе ROC анализа (рис. 11), показала их высокую достоверность и точность прогнозирования ($AUC > 70\%$).

Для моделей CF10, CF30 и CF40 практически одинаковая достоверность (для обучающей выборки значение AUC порядка 74%). Максимальное значение AUC – $76,04\%$ – было получено для модели CF60, что доказывает ее наибольшую достоверность (рис. 11, а). Следует отметить, что именно размер пространственного элемента модели CF60 (3600 м^2) сопоставим с площадью наибольшего числа оползней на изучаемой территории (рис. 3).

Аналогичные результаты получены и при оценке точности прогнозирования (рис. 11, б).

Зависимость достоверности моделей и точности прогнозирования от пространственного разрешения моделей показана на рис. 12.

Дополнительно, на основе анализа плотности распределения оползней в выделенных на картах районирования (LSZ) зонах, для моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 была выполнена оценка достоверности и точности прогнозирования с использованием фрактального метода. Полученные модели с целью определения фрактальной размерности D для оценки достоверности (на основе обучающей выборки) приведены на рис. 13, для оценки точности прогнозирования (на основе данных для проверки) – на рис. 14.

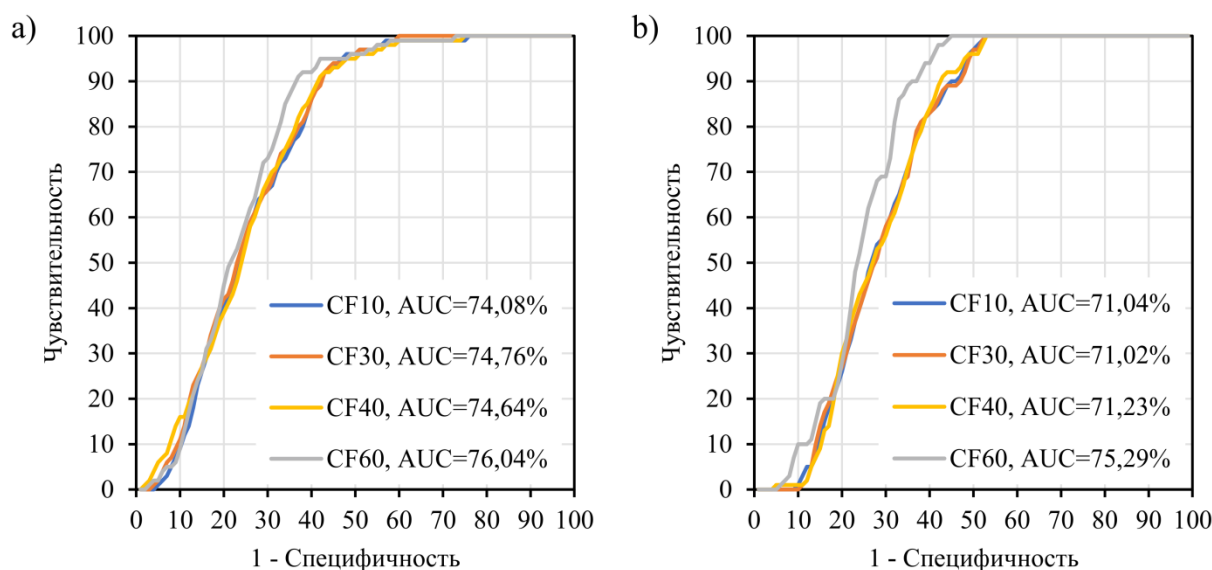


Рис. 11. Результаты валидации моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 на основе ROC анализа: а) оценка достоверности (обучающая выборка); б) оценка точности прогноза (данные для проверки)

Fig. 11. ROC-based validation outcomes for the CF10, CF30, CF40, and CF60 models: а) assessment of accuracy (training data); б) assessment of prediction performance (testing data)

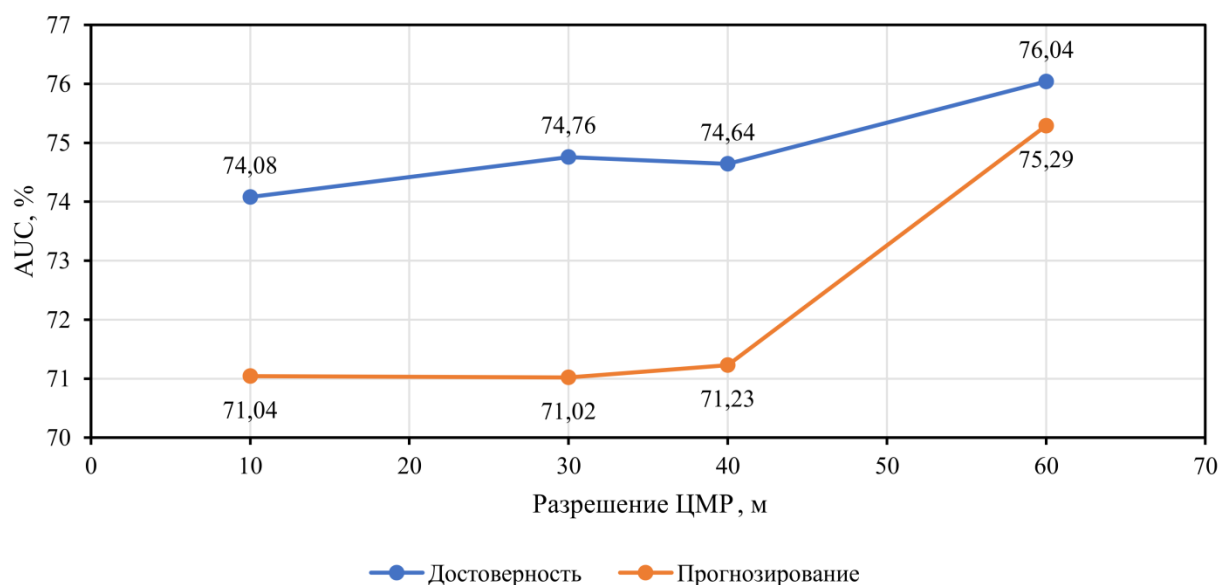


Рис. 12. График зависимости значения AUC от пространственного разрешения ЦМР

Fig. 12. Graph showing the relationship between the AUC value and the DEM spatial resolution

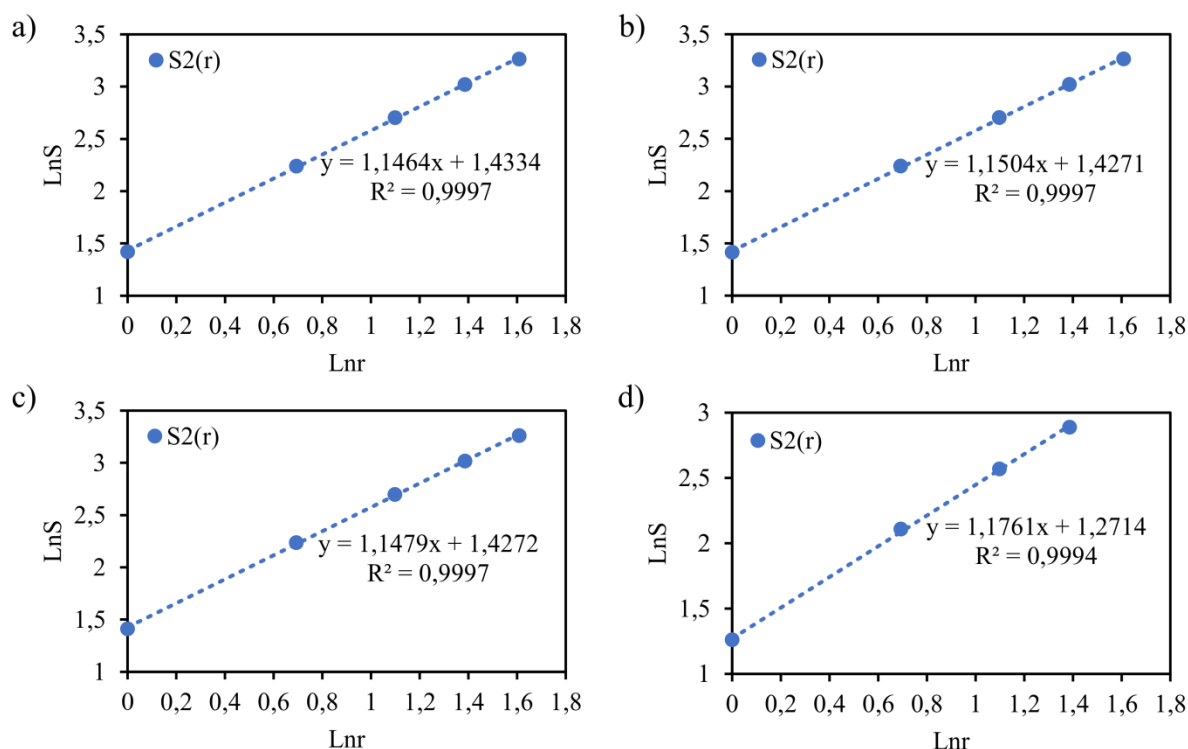


Рис. 13. Анализ фрактальной размерности моделей CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c) и CF60 (d) с использованием обучающей выборки

Fig. 13. Fractal dimension analysis of models CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c), and CF60 (d) using training data

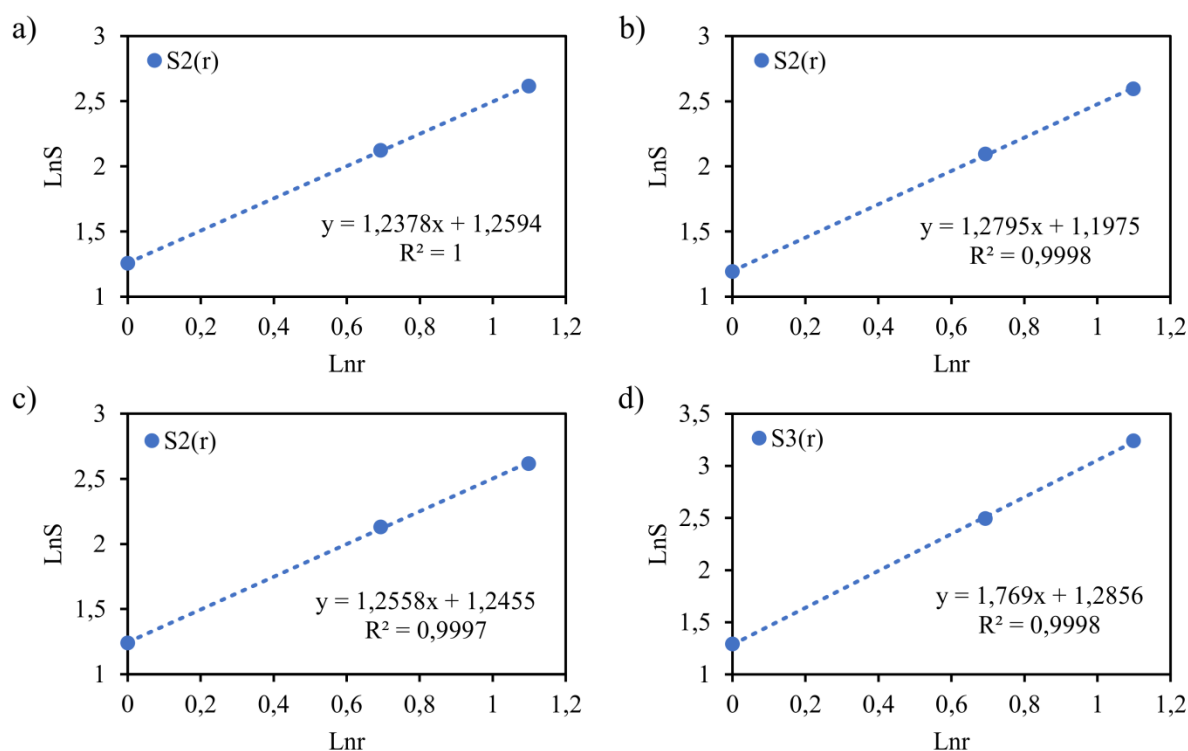


Рис. 14. Анализ фрактальной размерности моделей CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c) и CF60 (d) с использованием данных для проверки

Fig. 14. Fractal dimension analysis of models CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c), and CF60 (d) using testing data

При оценке достоверности фрактальные размерности для моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 равны 1,1464, 1,1504, 1,1479 и 1,1761 соответственно, что подтверждает результаты, полученные

на основе ROC анализа, и вывод о том, что модель CF60 является наиболее достоверной при составлении карт оползневой восприимчивости в районе исследований.

При оценке точности прогнозирования фрактальные размерности для моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 равны 1,2378, 1,2795, 1,2558 и 1,769 соответственно, что также полностью согласуется с ранее полученными результатами. Графики зависимости

фрактальной размерности D от пространственного разрешения ЦМР приведены на рис. 15.

Полученные результаты позволяют рекомендовать фрактальный метод для валидации моделей по оползневой восприимчивости территорий.

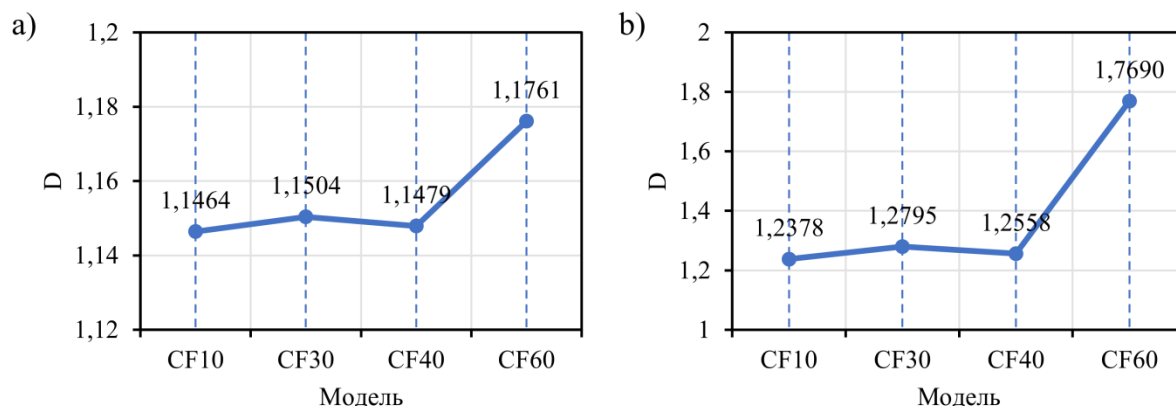


Рис. 15. Результаты расчета значений D для четырех моделей с использованием обучающей выборки (а) и данных для проверки данных (б)

Fig. 15. Calculation results of D values for four models using training (a) and testing data (b)

Заключение

Вывод о том, что использование 60-метровой цифровой модели рельефа обеспечивает наилучшую достоверность и точность прогнозирования при оценке оползневой восприимчивости территории, не является тривиальным. Однако аналогичные результаты были получены и в других исследованиях оползней [23, 45], которые также показали, что использование самого высокого доступного разрешения не всегда приводит к наиболее точной оценке оползневой восприимчивости. Этот интересный результат, вероятно, связан со средним размером оползней в исследуемом районе. Как было сказано ранее, на карте инвентаризации оползней отображались в виде точек, указывающих их местоположение (геометрические характеристики оползня не учитывались). При этом в используемом для оценки оползневой восприимчивости методе фактора достоверности его значения рассчитывались с учетом площади оползней. На Рис. 3 был приведен кумулятивный график распределения оползней по размеру, согласно которому средняя площадь оползней на исследуемой территории равна $3901,84 \text{ м}^2$ (т. е. пиксель оползня составляет около 62,46 м) и на крупные оползни приходится более 65 % общей площади оползней. Таким образом, при использовании 60-метровой цифровой модели рельефа

учитывалось не только местоположение оползней, но и косвенно (так как размер пикселя близок к среднему размеру оползней на исследуемой территории) их размер, что и обеспечило ей наилучшую достоверность и точность прогнозирования.

Выполненное исследование позволяет сформулировать важное заключение: для повышения достоверности карт восприимчивости территории к оползневому процессу, в тех случаях, когда на карте инвентаризации геометрические характеристики оползней не учитываются, необходимо определение оптимального разрешения цифровой модели рельефа, при котором размер пикселя близок к среднему размеру оползней. Иными словами, использование цифровой модели рельефа, в которой размер пространственного элемента сопоставим с геометрическими размерами наиболее часто встречающихся оползней, может обеспечить наибольшую достоверность и точность прогнозирования при оценке оползневой восприимчивости. Проверка этого вывода является дальнейшим направлением проводимых исследований, в т. ч. в регионах с крупномасштабными оползнями.

Исследование было профинансировано Институтом геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий в рамках национального научно-технического проекта под номером гранта DTDL.CN-81/21.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 15.01.2023).
2. 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 15.01.2023).
3. Kieu L.Q., Ngo G.V. Landslide susceptibility assessment for warning of dangerous areas in Tan Uyen district, Lai Chau province, Vietnam // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. – 2022. – V. 104. – Iss. 3. – P. 183–200. URL: <https://doi.org/10.1080/04353676.2022.2091915> (дата обращения 15.01.2023).
4. Using landslide statistical index technique for landslide susceptibility mapping: Case study: Ban Khoang Commune, Lao Cai Province, Vietnam / L.N. Thanh, Y.-M. Fang, T.-Y. Chou, T.-V. Hoang, Q.D. Nguyen, C.-Y. Lee, C.-L. Wang, H.-Y. Yin, Y.-C. Lin // Water. – 2022. – V. 14. – Iss. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/w14182814> (дата обращения 15.01.2023).

5. Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам / В.Б. Зюнг, И.К. Фоменко, Ч.К. Нгуен, Т.Х.Л. Ви, О.В. Зеркаль, Х.Д. Ву // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 126–140. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473> (дата обращения 15.01.2023).
6. Tam D.M. Flooding and landslides at the highways of Vietnam // Proceedings of the International Workshop on «Saving Our Water and Protecting Our Land». – Hanoi, 2001. – P. 18–27.
7. UNICEF Viet Nam, 2019. Viet Nam child centred risk assessment. Hanoi, Vietnam. URL: <https://www.unicef.org/vietnam/reports/vietnam-child-centred-risk-assessment> (дата обращения 15.01.2023).
8. 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 15.01.2023).
9. Нгуен Ч.Й. Оценка оползней и селей в некоторых горных районах Вьетнама и рекомендации по мерам борьбы и уменьшения ущерба. Отчёт о НИР. – Ханой: Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), 2006. – 134 с. (на вьетнамском языке)
10. ARC, VNRC, ADPC. Manual on Early Warning System in Vietnam. – Hanoi: Vietnam Red Cross, 2011. URL: <https://www.rcrc-resilience-southeastasia.org/document/manual-on-early-warning-system-in-vietnam/> (дата обращения 15.01.2023).
11. Landslide susceptibility modeling using a hybrid bivariate statistical and expert consultation approach in Canada Hill, Sarawak, Malaysia / M.T. Daniel, T.F. Ng, M.F. Abdul Kadir, J.J. Pereira // Frontiers in Earth Science. – 2021. – V. 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.616225> (дата обращения 15.01.2023).
12. Landslide susceptibility mapping with GIS in high mountain area of Nepal: a comparison of four methods / P. Gautam, T. Kubota, L.M. Sapkota, Y. Shinohara // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – Iss. 9. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09650-2> (дата обращения 15.01.2023).
13. 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 15.01.2023).
14. Landslide susceptibility research combining qualitative analysis and quantitative evaluation: a case study of Yunyang County in Chongqing, China / W. Zhang, S. Liu, L. Wang, P. Samui, M. Chwala, Y. He // Forests. – 2022. – V. 13. – Iss. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/f13071055> (дата обращения 15.01.2023).
15. 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 15.01.2023).
16. Quantitative assessment of landslide risk based on susceptibility mapping using Random Forest and GeoDetector / Y. Wang, H. Wen, D. Sun, Y. Li // Remote Sensing. – 2021. – V. 13. – Iss. 13. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13132625> (дата обращения 15.01.2023).
17. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 320 с.
18. 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 15.01.2023).
19. 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 15.01.2023).
20. 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. – Iss. 3. – P. 274–287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014> (дата обращения 15.01.2023).
21. 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. – Iss. 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 15.01.2023).
22. The performance of landslide susceptibility models critically depends on the quality of digital elevation models / J. Brock, P. Schratz, H. Petschko, J. Muenchow, M. Micu, A. Brenning // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – V. 11. – Iss. 1. – P. 1075–1092. URL: <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1776403> (дата обращения 15.01.2023).
23. Wubalem A. The impact of DEM resolution on landslide susceptibility modeling // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – V. 15. – Iss. 10. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10241-z> (дата обращения 15.01.2023).
24. Petrogenesis of Eocene to early Oligocene granitic rocks in Phan Si Pan uplift area, northwestern Vietnam: geochemical implications for the Cenozoic crustal evolution of the South China Block / T.T. Pham, J.G. Shellnutt, T.-A. Tran, H.-Y. Lee // Lithos. – 2020. – V. 372–373. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105640> (дата обращения 15.01.2023).
25. Landslide hazard assessment for Batxat area of Vietnam using GIS-based spatial prediction models / Binh Van Duong, I.K. Fomenko, Ha Viet Nhu, Phuong Huy Nguyen, O.N. Sirotkina, Kien Trung Nguyen, Ha Ngoc Thi Pham // Journal of Mining and Earth Sciences. – 2022. – V. 63. – Iss. 5a. – P. 70–82.
26. Landslide inventory maps: new tools for an old problem / F. Guzzetti, A.C. Mondini, M. Cardinali, F. Fiorucci, M. Santangelo, K.-T. Chang // Earth-Science Reviews. – 2012. – V. 112. – Iss. 1. – P. 42–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001> (дата обращения 15.01.2023).
27. How robust are landslide susceptibility estimates? / U. Ozturk, M. Pittore, R. Behling, S. Roessner, L. Andreani, O. Korup // Landslides. – 2021. – V. 18. – Iss. 2. – P. 681–695. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01485-5> (дата обращения 15.01.2023).
28. Perera E.N.C., Gunaratne A.M.C.T., Samarasinghe S.B.D. Participatory Landslide Inventory (PLI): an online tool for the development of a landslide inventory // Complexity. – 2022. – V. 2022. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/2659203> (дата обращения 15.01.2023).
29. Wubalem A. Landslide inventory, susceptibility, hazard and risk mapping // Landslides / Eds. Y. Zhang, Q. Cheng. – London: IntechOpen, 2021. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100504> (дата обращения 15.01.2023).
30. Shortliffe E.H., Buchanan B.G. A model of inexact reasoning in medicine // Mathematical Biosciences. – 1975. – V. 23. – Iss. 3. – P. 351–379. URL: [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90047-4) (дата обращения 15.01.2023).
31. Zhao Z., Liu Z.Y., Xu C. Slope unit-based landslide susceptibility mapping using Certainty Factor, Support Vector Machine, Random Forest, CF-SVM and CF-RF models // Frontiers in Earth Science. – 2021. – V. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.589630> (дата обращения 15.01.2023).
32. GIS-based assessment of landslide susceptibility using certainty factor and index of entropy models for the Qianyang County of Baoji city, China / Q. Wang, W. Li, W. Chen., H. Bai // Journal of Earth System Science. – 2015. – V. 124. – Iss. 7. – P. 1399–1415. URL: <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0624-3> (дата обращения 15.01.2023).
33. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and analytic hierarchy process / W. Fan, X.-S. Wei, Y.-B. Cao, B. Zheng // Journal of Mountain Science. – 2017. – V. 14. – Iss. 5. – P. 906–925. URL: <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4068-2> (дата обращения 15.01.2023).
34. A comparative analysis of certainty factor-based machine learning methods for collapse and landslide susceptibility mapping in Wenchuan County, China / X. Yuan, C. Liu, R. Nie, Z. Yang, W. Li, X. Dai, J. Cheng, J. Zhang, L. Ma, X. Fu, M. Tang, Y. Xu, H. Lu // Remote Sensing. – 2022. – V. 14. – Iss. 14. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14143259> (дата обращения 15.01.2023).
35. Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata,

- Japan / J. Dou, D. Tien Bui, P.A. Yunus, K. Jia, X. Song, I. Revhaug, H. Xia, Z. Zhu // PLOS ONE. – 2015. – V. 10. – Iss. 7. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262> (дата обращения 15.01.2023).
36. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps / I. Cantarino, M.A. Carrion, F. Goerlich, V. Martinez Ibañez // Landslides. – 2019. – V. 16. – Iss. 2. – P. 265–282. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4> (дата обращения 15.01.2023).
37. 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 15.01.2023).
38. Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension // Science. – 1967. – V. 156. – Iss. 3775. – P. 636–638. URL: <http://www.jstor.org/stable/1721427> (дата обращения 15.01.2023).
39. Mandelbrot B.B. Fractal analysis and synthesis of fracture surface roughness and related forms of complexity and disorder // International Journal of Fracture. – 2006. – V. 138. – Iss. 1. – P. 13–17. URL: <https://doi.org/10.1007/s10704-006-0037-z> (дата обращения 15.01.2023).
40. Zhang Y., Yan Q. Landslide susceptibility prediction based on high-trust non-landslide point selection // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2022. – V. 11. – Iss. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi11070398> (дата обращения 15.01.2023).
41. Kornejady A., Pourghasemi H.R. Producing a Spatially focused landslide susceptibility map using an ensemble of Shannon's entropy and fractal dimension (case study: Ziarat Watershed, Iran) // Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences / Eds. H.R. Pourghasemi, C. Gokceoglu. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – P. 689–732. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00032-6> (дата обращения 15.01.2023).
42. Assessment of landslide susceptibility using integrated ensemble fractal dimension with kernel logistic regression model / T. Zhang, L. Han, J. Han, X. Li, H. Zhang, H. Wang // Entropy. – 2019. – V. 21. – Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/e21020218> (дата обращения 15.01.2023).
43. Fractal-based spatial distribution analysis of geological hazards and measurement of spatial association with hazard-related predisposing factors / Q. Hu, Y. Zhou, S.X. Wang, F.T. Wang, H.J. Wang // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2020. – V. XLII-3/W10. – P. 125–131. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-125-2020> (дата обращения 15.01.2023).
44. Machine learning and fractal theory models for landslide susceptibility mapping: Case study from the Jinsha River Basin / Q. Hu, Y. Zhou, S. Wang, F. Wang // Geomorphology. – 2020. – V. 351. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106975> (дата обращения 15.01.2023).
45. The influence of DEM spatial resolution on landslide susceptibility mapping in the Baxie River basin, NW China / Z. Chen, F. Ye, W. Fu, Y. Ke, H. Hong // Natural Hazards. – 2020. – V. 101. – Iss. 3. – P. 853–877. URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03899-9> (дата обращения 15.01.2023).

Поступила: 20.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Зыонг В.Б., 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.

Та Д.Т., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инфраструктурного строительства факультета гражданского строительства Ханойского горно-геологического университета; председатель Вьетнамской ассоциации инженерной геологии и окружающей среды.

Нгуен Ч.К., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела развития технологий и экологической инженерии Института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

Зеркаль О.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Горобцов Д.Н., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Ву Х.Д., научный сотрудник отдела гидрогеологии и инженерной геологии Вьетнамского института геонаук и минеральных ресурсов.

UDC 551.435.627

INFLUENCE OF DIGITAL ELEVATION MODEL RESOLUTION ON MAPPING TERRITORY SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDE DEVELOPMENT

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

Igor K. Fomenko²,
ifolga@gmail.com

Duc T. Ta^{1,3},
taducthinh@humg.edu.vn

Trung K. Nguyen⁴,
kien.mgri@gmail.com

Oleg V. Zerkal⁵,
igzov@mail.ru

Denis N. Gorobtsov²,
dngorobtsov@mail.ru

Hong D. Vu⁶,
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, 117997, Moscow, Russia.

³ Vietnam Association of Engineering Geology and Environment,
91, Phung Hung street, Hanoi, 100000, Vietnam.

⁴ Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology,
84, Chua Lang street, Hanoi, 100000, Vietnam.

⁵ Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia.

⁶ Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources,
67, Chien Thang street, Hanoi, 100000, Vietnam.

The relevance. Landslides are one of the most hazardous natural disasters in the world. In Vietnam, landslides frequently caused considerable losses of life and property. The systematic evaluation of landslide hazards is a crucial component of Vietnam's disaster prevention strategy.

The main aim of this study is to assess the landslide susceptibility of the Batxat district, Laocai province (Vietnam), using four digital elevation model resolutions (10, 30, 40, and 60 m) and nine landslide causative factors: slope aspect, elevation, slope, distance to roads, distance to faults, distance to drainage, average monthly precipitation, land use, and weathering crust.

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

The quality of the available input data plays an important role in the reliability of the results of modeling the susceptibility of territories to the landslide process. Maps of slope aspect, slope, horizontal and relative relief, etc. are prepared based on information about the terrain, which is one of the most important parameters for conducting the analysis. The quality of a digital elevation model can be assessed based on its spatial resolution.

Methods: Certainty Factor method, fractal method.

Results. The performed analyses indicated a statistically significant relationship between the distribution of landslides and the landslide causative factors in the study area. As a result, the territory was divided into five zones according to its susceptibility to the landslide process: very low, low, moderate, high, and very high. The very low landslide susceptibility zone is less than 10 % of the study area, while the very high susceptibility zone varies from 14,95 to 18,32 %, depending on the digital elevation model spatial resolution. Analysis of the Receiver Operating Characteristics curve revealed that all models, independent of digital elevation model resolution, have good prediction efficiency, with the area under the receiver operating characteristic curve over 70 %. In addition, the Receiver operating characteristic and fractal analysis results indicated that the model with a digital elevation model spatial resolution of 60 m has the highest accuracy. This significant conclusion may be explained by the fact that the accuracy of the landslide susceptibility assessment result is dependent not only on the digital elevation model resolution but also on the ratio of the digital elevation model resolution and the average area of landslides in the study area. This conclusion proves that it is necessary to depict landslide locations and their detailed morphological characteristics on the landslide inventory maps.

Key words:

Landslide susceptibility of the territory, digital elevation model resolution, certainty factor method, fractal method, GIS, area under the receiver operating characteristic curve, Batxat, Vietnam.

This study was supported by the Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, as part of the national science and technology project under grant number ĐTĐL.CN-81/21.

REFERENCES

1. 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 January 2023).
2. 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 January 2023).
3. Kieu L.Q., Ngo G.V. Landslide susceptibility assessment for warning of dangerous areas in Tan Uyen district, Lai Chau province, Vietnam. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2022, vol. 104, Iss. 3, pp. 183–200. Available at: <https://doi.org/10.1080/04353676.2022.2091915> (accessed 15 January 2023).
4. Thanh L.N., Fang Y.-M., Chou T.-Y., Hoang T.-V., Nguyen Q.D., Lee C.-Y., Wang C.-L., Yin H.-Y., Lin Y.-C. Using landslide statistical index technique for landslide susceptibility mapping: case study: Ban Khoang Commune, Lao Cai Province, Vietnam. *Water*, 2022, vol. 14, Iss. 18. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14182814> (accessed 15 January 2023).
5. Binh Van Duong, Fomenko I.K., Kien Trung Nguyen. Application of GIS-based bivariate statistical methods for landslide potential assessment in Sapa, Vietnam. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 126–140. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473> (accessed 15 January 2023).
6. Tam DM. Flooding and landslides at the highways of Vietnam. *Proceedings of the International Workshop on «Saving Our Water and Protecting Our Land»*, Hanoi, 2001, pp. 18–27.
7. UNICEF Viet Nam. *Viet Nam child centred risk assessment*. Hanoi, Vietnam, 2019. Available at: <https://www.unicef.org/vietnam/reports/viet-nam-child-centred-risk-assessment> (accessed 15 January 2023).
8. 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 January 2023).
9. Nguyen T.Y. Assessment of landslides and mudslides in mountainous areas of Vietnam and recommendations on control measures and damage reduction. Research report. Hanoi, Institute of Geology (Vietnam Academy of Sciences and Technology), 2006. 134 p. In Vietnamese.
10. ARC, VNRC, ADPC. *Manual on Early Warning System in Vietnam*. Hanoi, Vietnam Red Cross, 2011. Available at: <https://www.rccr-resilience-southeastasia.org/document/manual-on-early-warning-system-in-vietnam/> (accessed 15 January 2023).
11. Daniel M.T., Ng T.F., Abdul Kadir M.F., Pereira J.J. Landslide susceptibility modeling using a hybrid bivariate statistical and expert consultation approach in Canada Hill, Sarawak, Malaysia. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.616225> (accessed 15 January 2023).
12. Gautam P., Kubota T., Sapkota L.M., Shinohara Y. Landslide susceptibility mapping with GIS in high mountain area of Nepal: a comparison of four methods. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, Iss. 9. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09650-2> (accessed 15 January 2023).
13. 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 January 2023).
14. Zhang W., Liu S., Wang L., Samui P., Chwala M., He Y. Landslide susceptibility research combining qualitative analysis and quantitative evaluation: a case study of Yunyang County in Chongqing, China. *Forests*, 2022, vol. 13, Iss. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/f13071055> (accessed 15 January 2023).
15. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, vol. 7, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0> (accessed 15 January 2023).
16. Wang Y., Wen H., Sun D., Li Y. Quantitative assessment of landslide risk based on susceptibility mapping using Random Forest and GeoDetector. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, Iss. 13. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs13132625> (accessed 15 January 2023).
17. Pendin V.V., Fomenko I.K. *Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti* [Methodology of landslide hazard assessment and prediction]. Moscow, LENAND Publ., 2015. 320 p.
18. 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 January 2023).
19. 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 January 2023).
20. 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 January 2023).
21. 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 January 2023).
22. Brock J., Schratz P., Petschko H., Muenchow J., Micu M., Brenning A. The performance of landslide susceptibility models critically depends on the quality of digital elevation models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, Iss. 1, pp. 1075–1092. Available at: <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1776403> (accessed 15 January 2023).
23. Wubalem A. The impact of DEM resolution on landslide susceptibility modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, Iss. 10. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10241-z> (accessed 15 January 2023).
24. Pham T.T., Shellnutt J.G., Tran T.-A., Lee H.-Y. Petrogenesis of Eocene to early Oligocene granitic rocks in Phan Si Pan uplift area, northwestern Vietnam: Geochemical implications for the Cenozoic crustal evolution of the South China Block. *Lithos*, 2020, vol. 372–373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105640> (accessed 15 January 2023).
25. Binh Van Duong, Fomenko I.K., Ha Viet Nhu, Phuong Huy Nguyen, Sirotkina O.N., Kien Trung Nguyen, Ha Ngoc Thi Pham. Landslide hazard assessment for Batxat area of Vietnam using GIS-based spatial prediction models. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 2022, vol. 63, Iss. 5a, pp. 70–82.
26. Guzzetti F., Mondini A.C., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.-T. Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 2012, vol. 112, Iss. 1, pp. 42–66. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001> (accessed 15 January 2023).
27. Ozturk U., Pittore M., Behling R., Roessner S., Andreani L., Korup O. How robust are landslide susceptibility estimates? *Landslides*, 2021, vol. 18, Iss. 2, pp. 681–695. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01485-5> (accessed 15 January 2023).
28. Perera E.N.C., Gunaratne A.M.C.T., Samarasinghe S.B.D. Participatory Landslide Inventory (PLI): an online tool for the development of a landslide inventory. *Complexity*, 2022, vol. 2022. Available at: <https://doi.org/10.1155/2022/2659203> (accessed 15 January 2023).
29. Wubalem A. Landslide inventory, susceptibility, hazard and risk mapping. *Landslides*. Eds. Y. Zhang, Q. Cheng. London, IntechOpen, 2021. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100504> (accessed 15 January 2023).

30. Shortliffe E.H., Buchanan B.G. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, 1975, vol. 23, Iss. 3, pp. 351–379. Available at: [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90047-4) (accessed 15 January 2023).
31. Zhao Z., Liu Z.Y., Xu C. Slope unit-based landslide susceptibility mapping using Certainty Factor, Support Vector Machine, Random Forest, CF-SVM and CF-RF models. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.589630> (accessed 15 January 2023).
32. Wang Q., Li W., Chen W., Bai H. GIS-based assessment of landslide susceptibility using certainty factor and index of entropy models for the Qianyang County of Baoji city, China. *Journal of Earth System Science*, 2015, vol. 124, Iss. 7, pp. 1399–1415. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0624-3> (accessed 15 January 2023).
33. Fan W., Wei X.-S., Cao Y.-B., Zheng B. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and analytic hierarchy process. *Journal of Mountain Science*, 2017, vol. 14, Iss. 5, pp. 906–925. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4068-2> (accessed 15 January 2023).
34. Yuan X., Liu C., Nie R., Yang Z., Li W., Dai X., Cheng J., Zhang J., Ma L., Fu X., Tang M., Xu Y., Lu H. A comparative analysis of certainty factor-based machine learning methods for collapse and landslide susceptibility mapping in Wenchuan County, China. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, Iss. 14. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs14143259> (accessed 15 January 2023).
35. Dou J., Tien Bui D., Yunus P.A., Jia K., Song X., Revhaug I., Xia H., Zhu Z. Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata, Japan. *PLOS ONE*, 2015, vol. 10, Iss. 7. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262> (accessed 15 January 2023).
36. Cantarino I., Carrion M.A., Goerlich F., Martinez 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 January 2023).
37. 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 January 2023).
38. Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, vol. 156, Iss. 3775, pp. 636–638. Available at: <http://www.jstor.org/stable/1721427> (accessed 15 January 2023).
39. 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, pp. 13–17. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10704-006-0037-z> (accessed 15 January 2023).
40. Zhang Y., Yan Q. Landslide susceptibility prediction based on high-trust non-landslide point selection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, vol. 11, Iss. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijgi11070398> (accessed 15 January 2023).
41. Kornejady A., Pourghasemi H.R. Producing a spatially focused landslide susceptibility map using an ensemble of Shannon's entropy and fractal dimension (case study: Ziarat Watershed, Iran). *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. Eds. H.R. Pourghasemi, C. Gokceoglu. Amsterdam, Elsevier, 2019. pp. 689–732. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00032-6> (accessed 15 January 2023).
42. Zhang T., Han L., Han J., Li X., Zhang H., Wang H. Assessment of landslide susceptibility using integrated ensemble fractal dimension with kernel logistic regression model. *Entropy*, 2019, vol. 21, Iss. 2. Available at: <https://doi.org/10.3390/e21020218> (accessed 15 January 2023).
43. Hu Q., Zhou Y., Wang S.X., Wang F.T., Wang H.J. Fractal-based spatial distribution analysis of geological hazards and measurement of spatial association with hazard-related predisposing factors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2020, vol. XLII-3/W10, pp. 125–131. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-125-2020> (accessed 15 January 2023).
44. Hu Q., Zhou Y., Wang S., Wang F. Machine learning and fractal theory models for landslide susceptibility mapping: case study from the Jinsha River Basin. *Geomorphology*, 2020, vol. 351. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106975> (accessed 15 January 2023).
45. Chen Z., Ye F., Fu W., Ke Y., Hong H. The influence of DEM spatial resolution on landslide susceptibility mapping in the Baxie River basin, NW China. *Natural Hazards*, 2020, vol. 101, Iss. 3, pp. 853–877. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03899-9> (accessed 15 January 2023).

Received: 20 January 2023.
Reviewed: 6 February 2023.

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.

Duc T. Ta, Cand. Sc., associate professor, Hanoi University of Mining and Geology; president, Vietnam Association of Engineering Geology and Environment.

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

Oleg V. Zerkal, Cand. Sc., leading researcher, Lomonosov Moscow State University.

Denis N. Gorobtsov, Cand. Sc., head of the Department of Engineering Geology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

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