



ПРИМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ КАМНЕПАДОВ И ПЛАНИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ ЗАЩИТЫ ОТ НИХ ВДОЛЬ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ФОРИА Ф.

Компания ETS Srl, г. Рим, Италия
federico.foria@etsingegneria.it

МИЧЕЛИ Г.

Компания ETS Srl, г. Рим, Италия

ТАМБУРИНИ А.

Компания IMAGEO Srl, коммуна Маттие, провинция Турин, Италия

ВИЛЛА Ф.

Компания IMAGEO Srl, коммуна Маттие, провинция Турин, Италия

РЕЧ А.

Бюро Studio Geologico Epifani, г. Арона, провинция Новара, Италия

ЭПИФАНИ Ф.

Бюро Studio Geologico Epifani, г. Арона, провинция Новара, Италия

АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный адаптированный перевод статьи итальянских исследователей «Применение пространственного многокритериального анализа для оценки опасности камнепадов и планирования стратегий защиты от них вдоль линейных сооружений» (Foria et al., 2021). Она была опубликована в 2021 году в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Foria et al., 2021) приведена в конце.

Линейные сооружения часто проходят через районы с высокой вероятностью оползневых событий, что в конечном итоге приводит к серьезным проблемам с их эксплуатацией и ставит под угрозу их безопасность. Выявление и прогнозирование оползнеопасных зон является сложной задачей, особенно в отношении камнепадов, поскольку они могут происходить внезапно и быстро.

Для оценки опасности камнепадов необходимы подробные данные, касающиеся геометрии склона, инженерно-геологических свойств слагающих его грунтов, дренажной системы и т. д. Несмотря на то что тематические наборы таких данных доступны и их можно легко загрузить для большей части территории Италии, их детальность недостаточна и необходимо собирать специальную исходную информацию.

Авторами статьи была разработана оригинальная междисциплинарная методика GEO4 на основе материалов, подготовленных с помощью системы мобильного картографирования ARCHITA, интегрированных с данными бортового лидара, обследований трасс линейных сооружений, с использованием геоинформатики, геологических моделей, инженерно-геологических характеристик и геоморфометрического подхода. После применения этой методики используется пространственный многокритериальный анализ (Spatial Multi-Criteria Analysis, SMCA) для получения агрегированного пространственно распределенного показателя оползнеопасности на основе нормализованных значений инициирующих факторов. Такой показатель применяется для выявления и классификации неустойчивых морфологических элементов склонов вдоль линейных сооружений, помогая лицам, принимающим решения, определять наиболее подходящие защитные меры и планировать их реализацию более четким, воспроизводимым и объективным образом.

Представленный в статье метод к настоящему времени успешно применен на сотнях километров железнодорожных линий в Италии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

оползневая опасность; опасность камнепадов; защита от оползневых явлений; защита от камнепадов; линейные сооружения; междисциплинарная методика GEO4; пространственный многокритериальный анализ (SMCA); агрегированный показатель оползнеопасности.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Фория Ф., Мичели Г., Тамбурины А., Вилла Ф., Реч А., Эпифани Ф. Применение пространственного многокритериального анализа для оценки опасности камнепадов и планирования стратегий защиты от них вдоль линейных сооружений (пер. с англ.) // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 7-8. С. 30–39. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-7-8-30-39.

APPLICATION OF SPATIAL MULTI-CRITERIA ANALYSIS (SMCA) TO ASSESS ROCKFALL HAZARD AND PLAN MITIGATION STRATEGIES ALONG LONG INFRASTRUCTURES

FORIA F.

ETS Srl, Roma (RM), Italy

MICELI G.

ETS Srl, Roma (RM), Italy

TAMBURINI A.

IMAGEO Srl, Mattie (TO), Italy

VILLA F.

IMAGEO Srl, Mattie (TO), Italy

RECH A.

Studio Geologico Epifani, Arona (NO), Italy

EPIFANI F.

Studio Geologico Epifani, Arona (NO), Italy

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Application of spatial multi-criteria analysis (SMCA) to assess rockfall hazard and plan mitigation strategies along long infrastructures” by Italian researchers (Foria et al., 2021). It was published in the journal “Earth and Environmental Science” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Foria et al., 2021) used for the presented translation is given in the end.

Long infrastructures often cross areas with a high probability of landslides, causing eventually serious problems to the serviceability and compromising safety. The identification and prediction of hazardous zones are difficult, especially for what concerning rockfalls, as they can occur quickly and suddenly.

In order to assess rockfall hazard, detailed data such as slope geometry, geotechnical and geomechanical properties of materials, drainage system pattern, etc. are needed. Even though thematic datasets are available and easily downloadable for the majority of the Italian territory, their scale is not adequate and ad-hoc input data must be gathered.

An original multi-disciplinary procedure (GEO4) has been developed by the authors based on a mobile mapping system (ARCHITA) integrated with Airborne Lidar and ILI (In-Line Inspections), geomatics, geological models, geotechnical-geomechanical characterization and geomorphometric approach. A Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) is then used to create a composed and spatially distributed index of landslide hazard based on normalized values of triggering factors. Such index is used to identify and classify the morphological unstable element along the infrastructure,

supporting decision-makers in defining the most appropriate mitigation measures and planning their implementation in a clearer, more repeatable and more objective orientated-way.

The presented method has been successfully applied so far to hundreds of km of railway lines in Italy.

KEYWORDS:

landslide hazard; rockfall hazard; landslide mitigation; rockfall mitigation; long infrastructures; GEO4 multi-disciplinary procedure; spatial multi-criteria analysis (SMCA); aggregated index of landslide hazard.

FOR CITATION:

Foria F., Miceli G., Tamburini A., Villa F., Rech A., Epifani F. *Primeneniye prostranstvennogo mnogokriterial'nogo analiza dlya otsenki opasnosti kamnepadov i planirovaniya strategii zashchity ot nikh vdol' lineinykh sooruzheniy [Application of spatial multi-criteria analysis (SMCA) to assess rockfall hazard and plan mitigation strategies along long infrastructures] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2024. Vol. 6. № 7-8. S. 30–39. DOI:10.58339/2949-0677-2023-6-7-8-30-39 (in Rus.).*

ВВЕДЕНИЕ ▶

Такие катастрофические явления, как оползни, могут существенно повлиять на человеческие сообщества, создавая угрозу для жизни людей, влияя на их деятельность и функционирование инфраструктуры. Для решения этих проблем важно иметь инструменты, которые позволят выявлять возможность этих событий и надлежащим образом управлять соответствующими рисками. В статье предлагается подход, разработанный в этих целях главным образом в рамках деятельности «Итальянской железнодорожной компании» (Rete Ferroviaria Italiana, RFI).

На многих итальянских железнодорожных линиях одной из самых серьезных проблем безопасности эксплуатации является гидрогеологическая нестабильность: даже небольшие объемы камней или другого обломочного материала на путях могут привести к сходу поезда с рельсов [1, 2]. Чтобы помочь в реализации глобальных стратегий заказчиков и точно спланировать денежные средства, предназначенные для обеспечения безопасности железной дороги, необходимо картирование оползневой опасности.

Для большей части территории Италии доступны данные по оползням различной детальности, но они неоднородны и их картографический масштаб слишком мал для анализа нестабильных участков склонов вдоль железнодорожных коридоров. Кроме того, не учитывается опасность оползней вдоль железнодорожных выемок.

Также недостаточно знаний об исторических событиях, произошедших на железных дорогах, и недостаточно известны условия устойчивости на обочинах путей в отношении как естественных склонов, так и откосов искусственных выемок.

Для параметризации различных компонентов опасности и оценки подверженности оползням для каждой точ-

ки железнодорожного коридора необходим единый и объективный подход, основанный на детальном изучении рельефа, геологических и геоморфологических условий, свойств скальных и дисперсных грунтов. Такой крупномасштабный анализ проводится в рамках сервиса GEO4 на основе мобильной картографической системы ARCHITA, интегрированной с данными бортового лидара, обследований маршрутов линейных сооружений, с использованием геоинформатики, геологических моделей, инженерно-геологических характеристик и геоморфометрического подхода. Данная методика позволяет картировать склоны вдоль объектов инфраструктуры путем определения пространственной вероятности возникновения оползней и других критических событий с помощью пространственного многокритериального анализа (Spatial Multi-Criteria Analysis, SMCA). При использовании сервиса GEO4 можно составлять карты рисков и приоритетов, чтобы оперативно помогать властям в реализации глобальных стратегий и планировании выделения денежных средств на обеспечение безопасности железнодорожных линий в течение времени их эксплуатации.

СУТЬ МЕТОДИКИ ▶

Для оценки оползневой опасности вдоль железнодорожных коридоров был применен подход, разработанный с помощью систем поддержки пространственных решений (Spatial Decision Support Systems, SDSS). Этому подходу отвечают такие требования, как:

- масштаб, подходящий для необходимого уровня детализации;
- высокопроизводительные методы изысканий, позволяющие свести к минимуму полевые работы и соответствующие помехи движению железнодорожного транспорта;

- воспроизводимость для обеспечения объективности;
- калибровка на основе задокументированных случаев из практики.

Пространственный многокритериальный анализ (SMCA) основан на подходе, разработанном и в основном используемом в качестве системы поддержки принятия решений в области государственного планирования [3]. Он необходим, когда измеряемый параметр является функцией многих напрямую не сопоставимых переменных, которые необходимо взвесить и нормализовать.

Этот анализ включает множество подходов, все из которых основаны на одной и той же схеме: определить вклад каждого критерия и его вес для окончательного выбора (или классификации). Данный процесс обычно делится на три этапа: определение критериев, их нормализация (критерий обычно нормируется в диапазоне от 0 до 1) и присвоение веса (или относительной важности) каждому критерию.

В геологической и экологической сферах анализ SMCA в основном применяется для картирования опасностей и рисков, которые, как правило, зависят от разнородных переменных [4–6]. В рассматриваемом в статье случае анализ и входные параметры модели SMCA определялись в соответствии с основными известными проблемами, связанными с устойчивостью склонов вдоль анализируемых железнодорожных коридоров (в основном с камнепадами, сходами другого обломочного материала и оползнями дисперсных грунтов).

Детализация (или пространственное разрешение) анализа составляла 10 м. То есть через каждые 10 м вдоль железнодорожной линии рассчитывалось одно значение каждого параметра. Шаг в 10 м был выбран для наиболее подходящего общего разрешения, отражающего все вариации параметров.

СБОР ДАННЫХ ►

Было организовано четыре уровня сбора данных.

1. Библиографический анализ ►

Первый и более низкомасштабный уровень – это библиографический анализ со сбором существующих данных по изучаемой местности: геологических карт, официальных кадастров оползней (www.progettoiffi.isprambiente.it), данных по смещениям поверхности из Национальной базы данных спутниковой интерферометрии (InSAR, www.pcn.miamambiente.it/GN/progetti/piano-straordinario-di-telerilevamento) и других открытых источников геоданных (https://geoportale.lamma.rete.toscana.it/difesa_suolo/#/viewer/openlayers/326).

Для обнаружения и мониторинга оползневых процессов и явлений (а также для повышения эффективности инвентаризации оползней в региональном масштабе и для оценки охваченных ими площадей) в качестве дополнения к традиционным геологическим и геоморфологическим исследованиям может рассматриваться спутниковая радарная интерферометрия благодаря ее способности обнаруживать смещения на миллиметровом уровне в течение длительного времени и на больших площадях.

Доступные в настоящее время архивы данных, полученных с помощью спутниковых радаров примерно за 30 лет, охватывают всю территорию Италии. Их использование может помочь в исследованиях оползней как в крупных, так и в малых масштабах, помогая в оценке площадей оползней, в обнаружении незакартированных оползневых событий, в оценке оползневой активности.

2. Бортовое лазерное сканирование ►

Второй уровень информации получают путем бортового лазерного сканирования (лидарной съемки) вдоль всей железнодорожной линии при ширине коридора около 400 м. По этим данным можно получить цифровую модель местности (ЦММ) и цифровую модель поверхности (ЦМП) с высоким разрешением (0,5 м/пиксель), а также детальное ортоизображение (10 см/пиксель).

3. Мобильное картографирование ►

После первого предварительного анализа библиографической информации и лидарных топографических данных используется система мобильного много-



Рис. 1. Система мобильного многомерного картографирования ARCHITA

мерного картографирования ARCHITA, разработанная компанией ETS Srl [7] для откосов железнодорожных выемок, которые, как правило, видны только с путей (рис. 1). Данная система оснащена лазерным сканером, тепловизионными камерами, многоканальным георадаром и видеокамерами высокого разрешения и обеспечивает скорость съемки в среднем 15–30 км/ч. Это сокращает время полевых работ, повышает безопасность работников и не требует частых и длительных перебоев в движении транспорта. Облака точек мобильного лазера и бортового лидара могут быть наложены друг на друга и объединены благодаря высокоточному методу геопозиционирования, принятому для систем геодезической съемки.

4. Обследования трасс линейных сооружений ►

Последний уровень исследований – это полевые изыскания вдоль трассы линейного объекта, результаты которых дополняют предыдущие. Они направлены на непосредственный сбор информации:

- по геологии и геоморфологии местности, инженерно-геологическим свойствам слагающих откосы/склоны материалов, результатам полевых испытаний;
- по выполненным ранее работам для укрепления откосов/склонов, имеющимся защитным сооружениям, их состоянию;
- по неустойчивости откосов/склонов, эрозионным явлениям на них и т. д.

Кроме того, во время полевых изысканий отбираются образцы дисперсных/скальных грунтов, репрезентативные для каждого литотипа, которые используются при лабораторных испытаниях в целях определения основных параметров для предварительного анализа

устойчивости откосов/склонов вдоль каждого 10-метрового участка трассы.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ ►

Поскольку все собранные данные имеют географическую привязку, их можно обрабатывать в среде ГИС (в геоинформационной системе) в целях извлечения всех входных параметров, необходимых для анализа методом SMCA, что помогает идентифицировать зоны зарождения возможных оползней и масштабы зон их охвата. Эта информация необходима для оценки оползневой опасности вдоль железных дорог.

Оценка устойчивости откосов/склонов ►

Для оценки показателя устойчивости откоса/склона вдоль железной дороги обычно применяются как геоморфометрические данные, так и результаты полевых и лабораторных испытаний. В зависимости от типа откоса/склона и развивающихся там процессов можно использовать инженерно-геологический подход.

Распределение значимых геомеханических параметров недоступных скальных обрывов можно получить путем обработки плотного облака точек, полученного при мобильном сканировании.

Для расчета локальной ориентации особенностей откоса/склона в каждой точке плотного облака точек можно использовать коммерческое программное обеспечение. Примером может служить программа Coltop3D [8], в которой применяется идея присвоения уникального цвета для угла наклона и направления линии падения плоскости каждой трещины путем адаптации такого инструмента компьютерной графики, как цве-

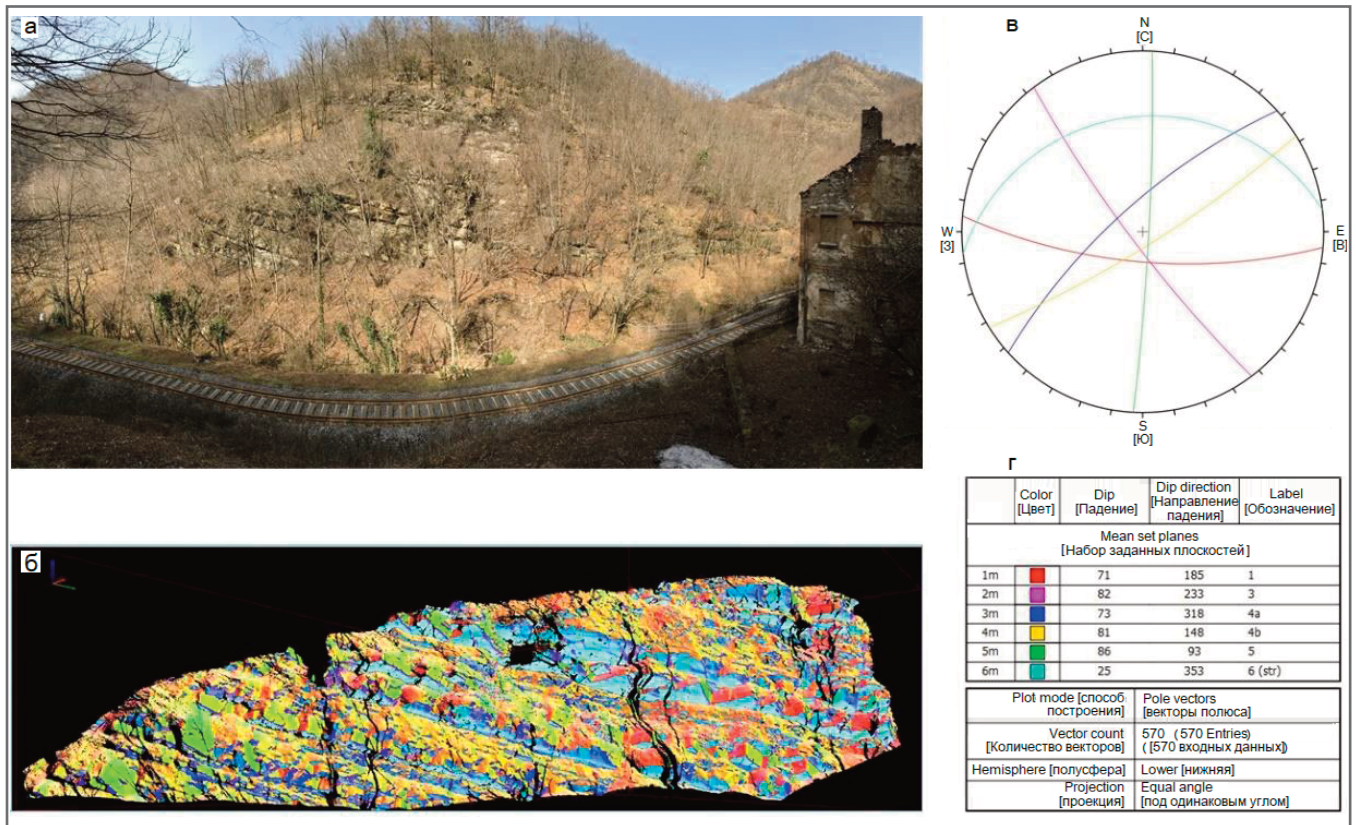


Рис. 2. Исследуемый обрывистый скалистый склон над участком железной дороги Борго-Сан-Лоренцо – Фаэнца (а); его изображение в присвоенных цветах, отражающих ориентацию основных систем трещин (б); стереосеть (нижняя полусфера), отражающая основные системы трещин, идентифицированные в результате анализа в соответствии с теми же цветовыми кодами (в); таблица присвоения цветов (г)

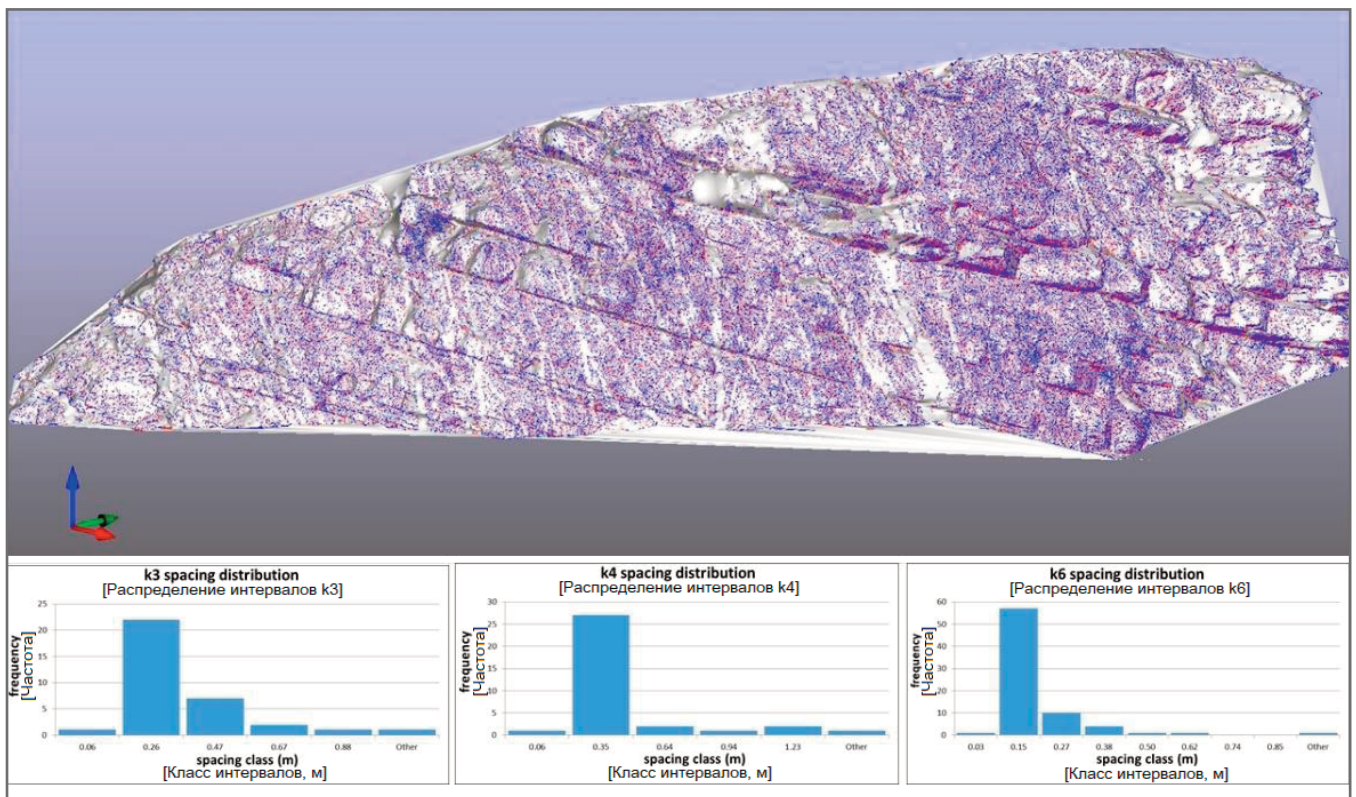


Рис. 3. Следы трещин и гистограммы распределения интервалов между трещинами для трех их основных систем (наклон поверхности – тот же, что и на рисунке 2).

товое колесо модели HSV (Hue Saturation Value – «Оттенок, насыщенность, значение»), где каждому цвету соответ-

ствуют три координаты, к стандартной стереосети (рис. 2). (В цветовом пространстве модели HSV, используемой

для трехкоординатного присвоения цвета, используется цилиндрическая система координат, а множество допусти-

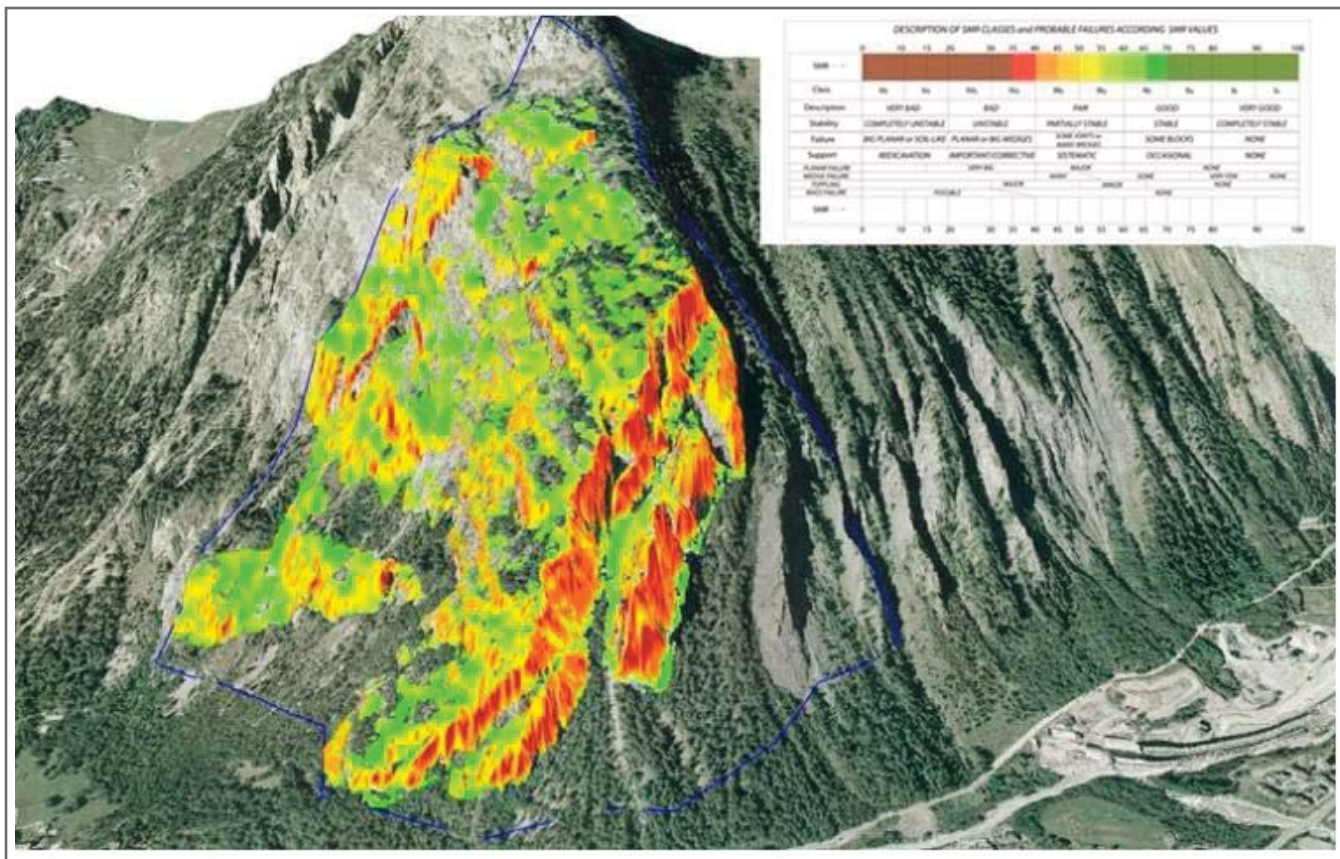


Рис. 4. Карта, построенная в соответствии с классификационной системой оценки грунтового массива SMR и наложенная на 3D модель склона

мых цветов представляет собой шести-гранный конус, поставленный на вершину. – *Ред.*)

После того как будут идентифицированы основные системы трещин, можно провести дальнейшую обработку для извлечения данных, относящихся к каждой системе, в масштабе рассматриваемого очень крутого обрывистого скалистого склона. Можно обоснованно предположить, что изменения кривизны в ЦМП соответствуют следам пересечения трещин с вертикальной плоскостью, имеющей среднюю ориентацию поверхности склона [9]. Применяв для обработки сетки склона подходящее программное обеспечение, можно получить векторное изображение прогнозируемых следов трещин. После их извлечения из сетки они проецируются на плоскость отображения, отражающую местную ориентацию этого склона, и упрощаются, превращаясь в 2D полилинии. Затем следы классифицируются на основе кажущегося угла наклона и группируются в соответствии с основной ориентацией системы трещин, после чего анализируются при увеличении [10].

Исследуемая территория разбивается на круглые участки, для каждого из которых могут быть рассчитаны следующие параметры: частота трещин и ин-

тервал между ними для каждой их системы; совокупная длина трещин на единицу площади (P_{21} , [11]); элементарный объем скального грунта (V_b); объемное количество трещин (J_v) и т. д.

На рисунке 3 показан пример того, как на основе распределения интервалов между основными системами трещин был оценен средний элементарный объем скального грунта, который составил $0,01 \text{ м}^3$.

В качестве следующего шага анализа на основе предыдущих параметров могут быть получены и сопоставлены обычно используемые показатели качества скальных пород, например в соответствии с классификационной системой оценки слагающего склон грунтового массива SMR (Slope Mass Rating) (рис. 4).

При изучении длинных железнодорожных коридоров необходимо также учитывать неглубокие оползни в рыхлых материалах. Для этой цели при подходе GEO4 применяются физически обоснованные модели, такие как SINMAP [12] и SHALSTAB [13] – ГИС-модели с открытым исходным кодом, реализованные в GEO4, в которых используются цифровые модели рельефа (ЦМР) для получения необходимой входной информации с точки зрения

наклона поверхности и гидрологии. Первоначальный диапазон значений присваивается определяющим параметрам состояния слагающих склон/откос материалов, а затем он оптимизируется по «калибровочным районам» на основе данных по дисперсным грунтам, растительному покрову или геологии. Этот подход дает возможность получать карты пространственного распределения значений коэффициента устойчивости (рис. 5), которые можно использовать в качестве входных данных для анализа SMCA.

Геоморфометрический анализ ►

Благодаря наличию ЦМР местности вдоль железнодорожного коридора с высоким разрешением можно провести детальный геоморфометрический анализ, который даст ценные данные для оценки возможных воздействий на железную дорогу со стороны камнепадов, обвалов дисперсных грунтов и других оползневых событий, которые могут полностью или частично перекрыть пути.

Кратко опишем некоторые широко используемые геоморфометрические показатели.

Индекс связности отложений (index of sediment connectivity, IC) [14] – это пространственно распределенный гео-

морфометрический показатель, который может быть легко получен из ЦМР. Основное внимание при этом уделяется влиянию рельефа на связность отложений, в то время как другие аспекты, такие как тип, протяженность и местоположение зон зарождения оползней, не принимаются во внимание. *IC* может использоваться в качестве безразмерного показателя для участков вдоль линейных сооружений, которые характеризуются более высокими скоростями течения и расходами вод и/или отложений. (Забегая вперед: геоморфологическая карта и карта распределения значений *IC*, показанные соответственно на рисунках 8, а, б для одного и того же участка железной дороги, демонстрируют очень хорошую корреляцию выделяемых по ним более опасных участков, что подтверждается картой оползневой опасности на рисунке 8, г.)

Упрощенный подход к выделению зоны, поражаемой потенциальным камнепадом, обеспечивается применением метода угла тени (конуса), или энергетических линий (согласно которому максимальное расстояние перемещения обломков определяется пересечением рельефа с энергетической линией, имеющей эмпирически оцененный наклон. – *Ред.*). Этот подход был описан несколькими авторами [15] и реализован в программе CONEFALL [16]. Был разработан простой ГИС-инструмент для выделения максимальной поражаемой потенциальным камнепадом зоны в соответствии с определенным углом так называемого сектора тени. Полученные результаты могут быть нанесены на карту или ортоизображение для лучшей визуализации и анализа (рис. 6). Этот простой геометрический подход очень полезен для предварительного зонирования территории вдоль сотен километров коридоров линейных сооружений с целью выявления тех областей, для которых необходим дальнейший детальный анализ потенциальных траекторий падающих обломков с помощью 2D и 3D программного обеспечения.

Чтобы получить оценку площади зоны, охваченной перемещением масс (например, селевым потоком), на основе доступной ЦМР, можно применить алгоритм MSF (Modified Single Flow – «Модифицированный единый поток») [17]. Он основан на использовании единого направления потока от заданной начальной точки, причем центральная линия потока проходит в направлении наиболее крутого спуска.

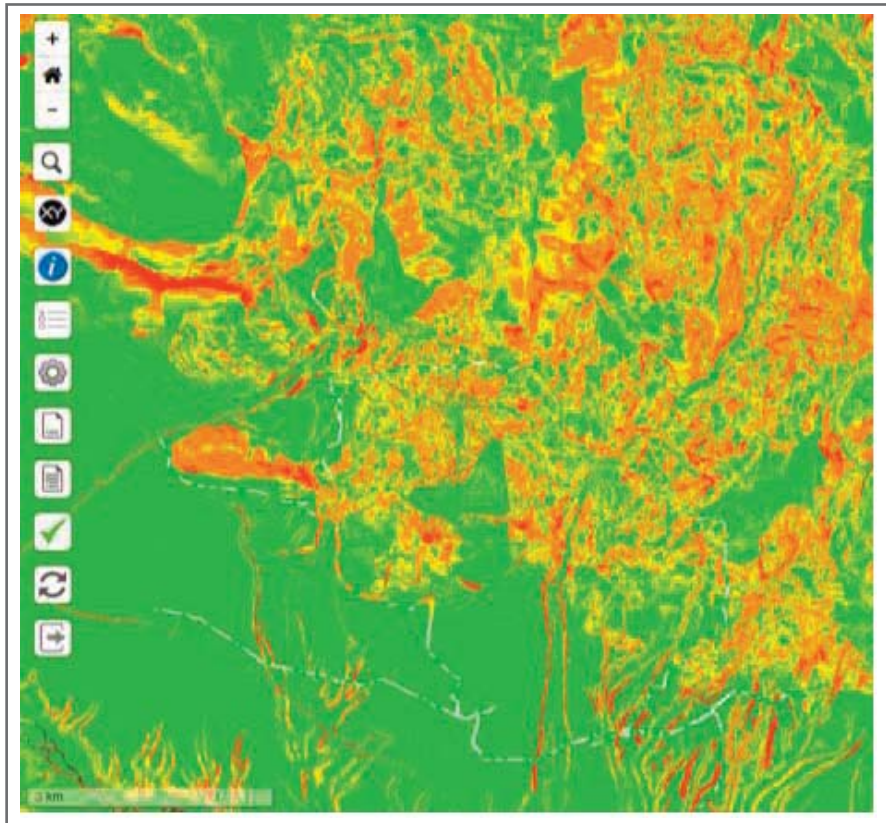


Рис. 5. Карта распределения значений коэффициента устойчивости, полученная с помощью ГИС-модели SINMAP

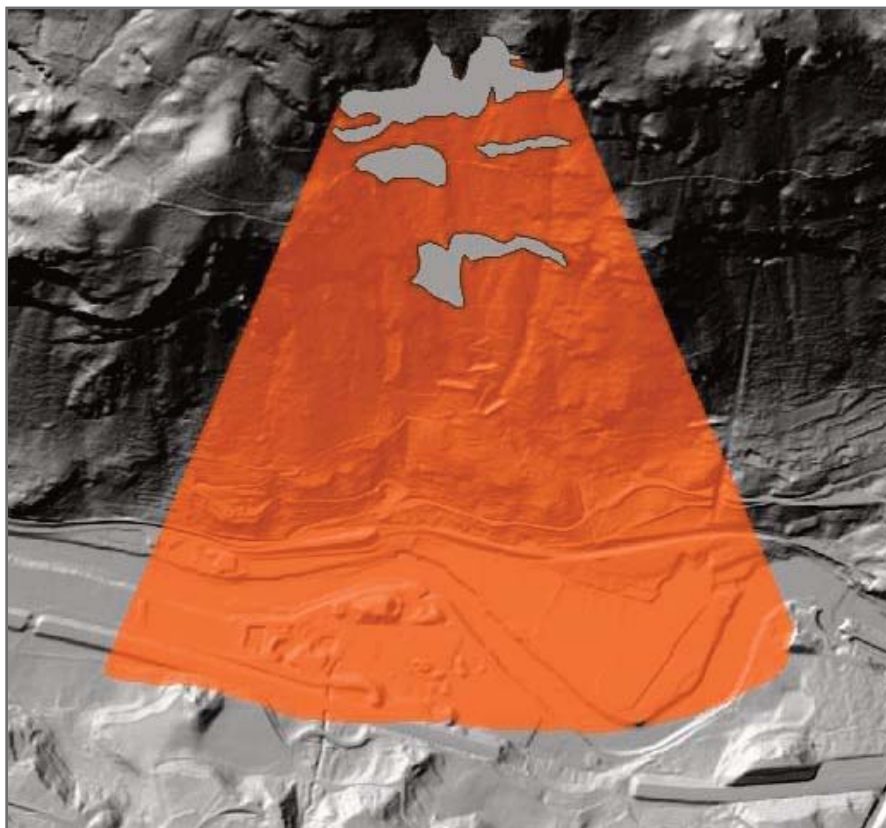


Рис. 6. Зона, поражаемая потенциальным камнепадом, выделенная оранжевым цветом (зоны зарождения возможных камнепадов выделены светло-серым цветом)

Применение алгоритма MSF дает только информацию об ожидаемой площади возможного перемещения масс, а не о его скорости и не о толщине оползневых отложений. Это препятствует возможности проведения како-

го-либо дальнейшего анализа воздействия потенциального оползня на сооружения, находящиеся в охваченной им зоне.

Чтобы прекратить перемещение масс, необходимо установить определенный угол их схода. Многими авторами были предложены эмпирические выражения для обратной зависимости между тангенсом этого угла α (равного H/L , где H – перепад высот; L – горизонтальная составляющая дальности транзита материала) и объемом оползня. Эта зависимость соответствует среднему наклону линии, соединяющей самую высокую точку зоны отрыва масс с самой дальней точкой зоны их аккумуляции, и представляет собой средний коэффициент трения (рис. 7). Для остановки перемещения масс при использовании MSF необходимо принять надлежащее пороговое значение отношения H/L .

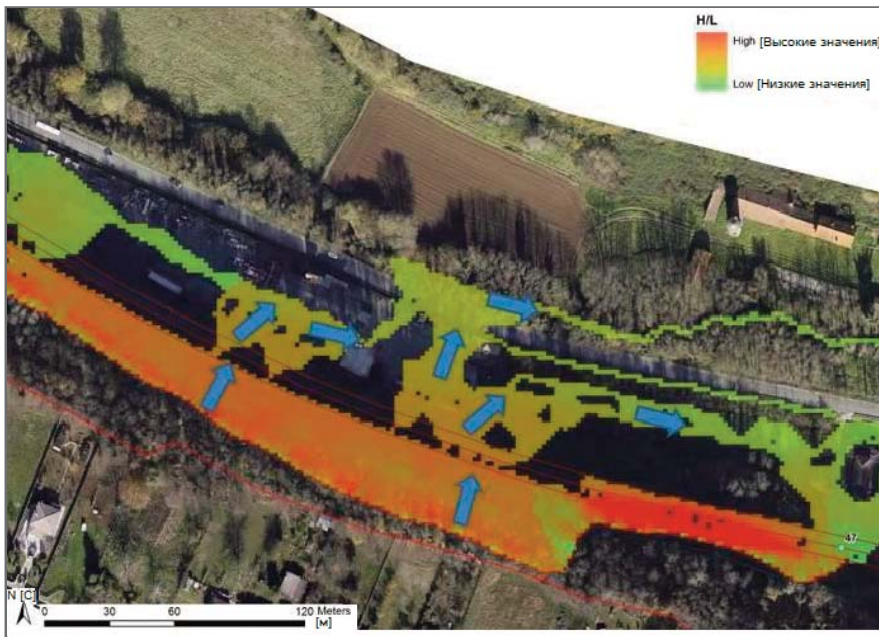


Рис. 7. Прогнозируемая зона поражения перемещающимися массами

Пространственный многокритериальный анализ (SMCA) ▶

Каждый входной параметр описывается векторным или растровым слоем с географической привязкой, образуя та-

ким образом базу геоданных, необходимую для выполнения пространственного многокритериального анализа (SMCA). Затем рассчитывается агрегированный показатель с использованием алгебраической формулы, которая калиб-

руется на основе доступных данных по случаям из практики. Такой показатель является функцией по крайней мере следующих характеристик:

- коэффициента устойчивости склона;
- индекса связности отложений;

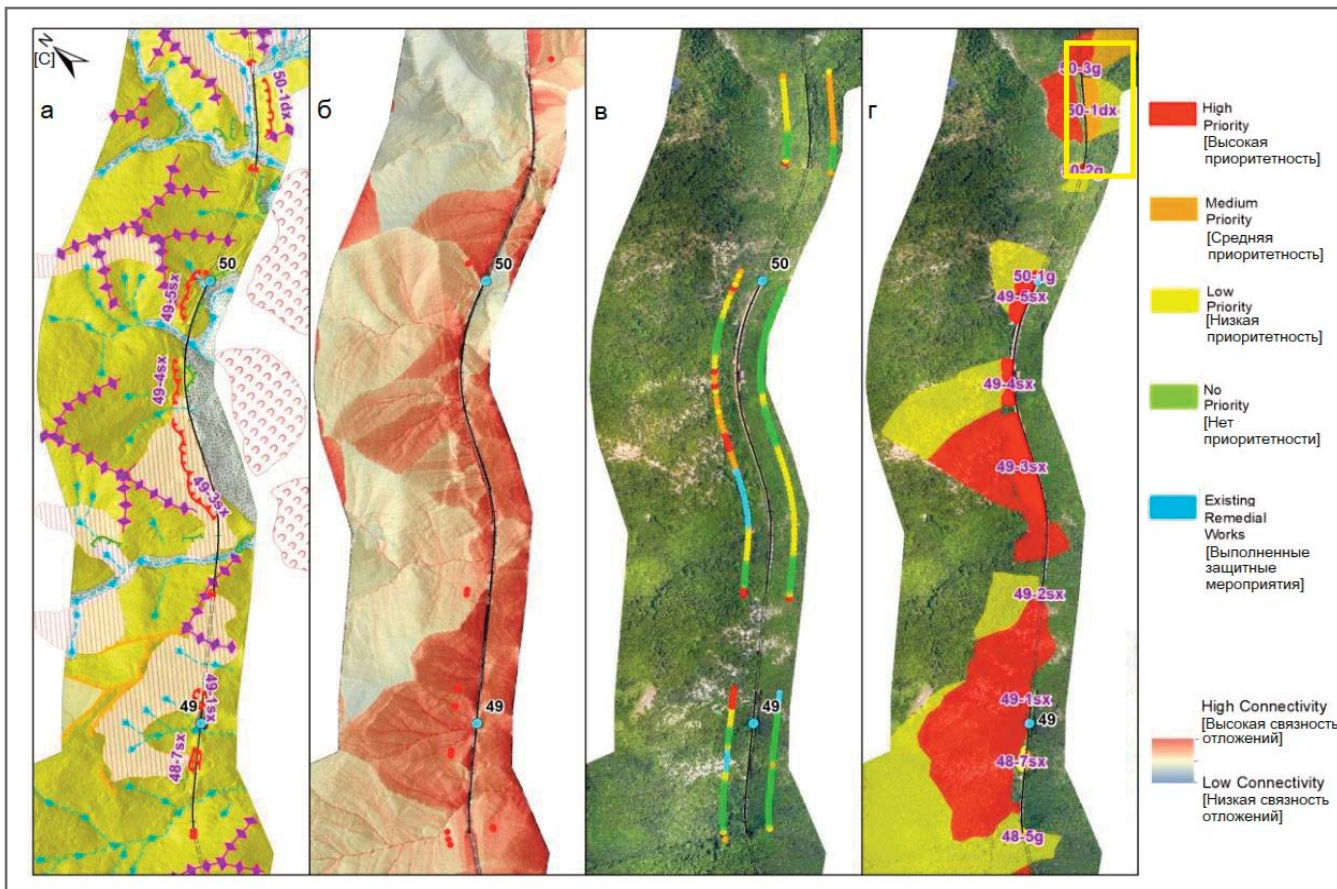


Рис. 8. Тематические карты, созданные для оценки оползнеопасности вдоль железнодорожной линии Борго-Сан-Лоренцо – Фаэнца: а – геоморфологическая карта; б – карта распределения значений индекса связности отложений IC (красные точки обозначают превышения пороговых величин); в – карта распределения итоговых значений индекса, рассчитанных через каждые 10 м вдоль железнодорожной линии с обеих сторон; г – карта агрегированного показателя оползневой опасности (обычно принимаются четыре приоритетных класса; уступ, показанный на рисунке 2, выделен желтой рамкой)

- оценки слагающего склон грунтового массива в соответствии с классификационной системой SMR (Slope Mass Rating);
- высоты растительного покрова;
- проведенных ранее противооползневых мероприятий и состояния соответствующих защитных сооружений;
- признаков неустойчивости;
- эрозионных и прочих явлений;
- дальности транзита перемещающихся масс;
- наличия на исследуемой территории ранее сошедших задокументированных оползней.

Окончательная классификация позволяет получить карту территории вдоль коридора линейного сооружения, на которой указаны четыре класса опасности (ее приоритетности) (рис. 8, г). Примеры, представленные на рисунке 8, относятся к недавнему исследованию, проведенному вдоль железнодоро-

рожной линии протяженностью 76 км (линии Борго-Сан-Лоренцо – Фаэнца в центральной части Италии).

В целях обеспечения легкого доступа к данным и предоставления простого в использовании веб-сервиса для периодического обновления данных была внедрена платформа WebGIS (Веб-ГИС). (WebGIS – это усовершенствованная форма геоинформационной системы, доступная на веб-платформе; обмен информацией в этом случае происходит между сервером и клиентом, где сервером является сервер геоинформационной системы, а клиентом – веб-браузер, мобильное приложение и настольное приложение. – *Ред.*)

Будущие разработки ►

Описанный подход может быть распространен и на другие линейные сооружения, например автомобильные до-

роги, трубопроводы, линии электропередачи.

Кроме того, можно интегрировать структуру WebGIS с модулем системы раннего предупреждения (СРП), способным получать и обрабатывать данные мониторинга в режиме реального времени. Предупреждающие сообщения могут генерироваться автоматически путем сравнения полученных данных с заранее установленными пороговыми значениями по широкому спектру иницирующих параметров, например по атмосферным осадкам, поверхностным и подземным смещениям, поровому давлению и т. д. Интерфейс WebGIS позволит пользователям просматривать данные, запрашивать их и взаимодействовать с системой, предоставляя обратную связь по автоматическим предупреждениям, генерируемым СРП, поддерживая калибровку и оптимизацию пороговых величин и эталонных сценариев. 

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Foria F., Miceli G., Tamburini A., Villa F., Rech A., Epifani F. Application of spatial multi-criteria analysis (SMCA) to assess rockfall hazard and plan mitigation strategies along long infrastructures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 833. Mechanics and Rock Engineering from Theory to Practice, 20–25 September 2021, Turin, Italy. Article 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/833/1/012074. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/833/1/012074>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

1. Geertsema M., Schwab J.W., Blais-Stevens A., Sakals M.E. Landslides impacting linear infrastructure in west central British Columbia // Nat. Haz. 2009. Vol. 48. P. 59–72.
2. Guerriero L., Revellino P., Grelle G., Fiorillo F., Guadagno F.M. Landslides and infrastructures: the case of the Montaguto earth flow in southern Italy // Italian Journal of Engineering Geology and Environment. Book Series. 2013. Vol. 6.
3. Joerin F., Theriault M., Musy A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment // Int. J. of Geographical Information Sc. 2001. Vol. 15. P. 153–174.
4. Mancini F., Ceppi C., Ritrovato G. GIS and statistical analysis for landslide susceptibility mapping in the Daunia area, Italy // Nat. Haz. Earth System Sc. 2010. Vol. 10. P. 1851–1864.
5. Quinn P.E., Hutchinson D.J., Diederichs M.S., Rowe R.K. Regional-scale landslide susceptibility mapping using the weights of evidence method: an example applied to linear infrastructure // Can. Geot. J. 2010. Vol. 47. P. 905–927.
6. Sadr M.P., Hassani H., Maghsoudi A. Slope Instability Assessment using a weighted overlay mapping method, a case study of Khorramabad-Doroud railway track, W Iran // J. of Tethys. 2014. Vol. 2. P. 254–271.
7. Foria F. et al. ARCHITA: an innovative multidimensional mobile mapping system for tunnels and infrastructures // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 295. EDP Sciences.
8. Jaboyedoff M., Metzger R., Oppikofer T., Couture R., Derron M.H., Locat J., Turmel D. New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software // Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and demands. Taylor & Francis, 2007. Vol. 1. P. 61–68.
9. Tamburini A., Martelli D.C.G., Alberto W., Villa F. Geomechanical rock mass characterization with Terrestrial Laser Scanning and UAV // ARMA. 2015. Vol. 15. P. 781.
10. Jaboyedoff M., Philipposian F., Mamin M., Marro C., Rouillier J.D. Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise. Approche statistique et probabilistique // Vdf Hochschulverlag AG an der ETH. Zurich, 1996.
11. Dershowitz W.S., Herda H.H. Interpretation of fracture spacing and intensity // Proc. 33rd U.S. Symp. on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema, 1992. P. 757–766.
12. Pack R., Tarboton D., Goodwin C. Terrain Stability Mapping with SINMAP. Technical Description and Users Guide for Version 1.00. 1998.

13. Dietrich W.E., Montgomery D.R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement (NCASI), 1998.
14. Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments // *Geomorphology*. 2013. Vol. 188. P. 31–41.
15. Evans S., Hungr O. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes // *Can. Geotech. J.* 1993. Vol. 30. P. 620–636.
16. Jaboyedoff M., Labiouse V. Preliminary estimation of rockfall runout zones // *Nat. Haz. Earth System Sc.* 2011. Vol. 11. P. 819–828.
17. Huggel C., Kaab A., Haerberli W., Krummenacher B. Regional scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps // *Nat. Haz. Earth System Sc.* 2003. Vol. 3. P. 647–662.

Независимый электронный журнал **ГеоИнфо**

**С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.**



WWW.GEOINFO.RU