

**КОРОМИНАС Х.**

Факультет геотехники и наук о Земле  
Технического университета Каталонии,  
г. Барселона, Испания  
jordi.corominas@upc.edu

**ВАН ВЕСТЕН К.**

Факультет геоинформатики и наблюдений за  
Землей Университета Твенте, г. Энсхеде,  
Нидерланды

**ФРАТТИНИ П.**

Факультет наук о Земле и окружающей среде  
Миланского университета Бикоцца, г. Милан,  
Италия

**КАШИНИ Л.**

Факультет гражданского строительства  
Университета Салерно, г. Салерно, Италия

**МАЛЕ Ж.-П.**

Национальный центр научных исследований при  
Страсбургском институте физики Земли,  
г. Страсбург, Франция

**ФОТОПУЛУ С.**

Отделение по исследованиям геотехнической  
сейсмостойкости и динамики грунтов факультета  
гражданского строительства Университета  
Аристотеля в Салониках, г. Салоники, Греция

**КАТАНИ Ф.**

Факультет наук о Земле Флорентийского  
университета,  
г. Флоренция, Италия

**ВАН ДЕН ЭКХАУТ М.**

Институт окружающей среды и устойчивого  
развития Объединенного исследовательского  
центра Европейской комиссии, г. Испра, Италия

**МАВРОУЛИ О.**

Факультет геотехники и наук о Земле  
Технического университета Каталонии,  
г. Барселона, Испания

**АЛЬЯРДИ Ф.**

Факультет наук о Земле и окружающей среде  
Миланского университета Бикоцца, г. Милан,  
Италия

**ПИТИЛАКИС К.**

Отделение по исследованиям геотехнической  
сейсмостойкости и динамики грунтов факультета  
гражданского строительства Университета  
Аристотеля в Салониках, г. Салоники, Греция

**ВИНТЕР М.Г.**

Лаборатория транспортных исследований (TRL),  
г. Эдинбург, Великобритания

**ПАСТОР М.**

Институт инженеров путей сообщения  
Мадридского политехнического университета,  
г. Мадрид, Испания

**ФЕРЛИЗИ С.**

Факультет гражданского строительства  
Университета Салерно, г. Салерно, Италия

**ТОФАНИ В.**

Факультет наук о Земле Флорентийского  
университета, г. Флоренция, Италия

**ЭРВАС Й.**

Институт окружающей среды и устойчивого  
развития Объединенного исследовательского  
центра Европейской комиссии, г. Испра, Италия

**СМИТ Дж.Т.**

Компания Golder Associates (ранее – TRL),  
г. Бурн-Энд, графство Бакингемшир,  
Великобритания



## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОЛИЧЕСТВЕННОМУ АНАЛИЗУ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ

Принята к публикации 23.12.2024. Опубликовано 27.12.2024

**АННОТАЦИЯ**

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод обзорной статьи итальянских, испанских, греческих, британских, голландских и французских исследователей «Рекомендации по количественному анализу оползневых рисков» (Corominas et al., 2014). Она была опубликована в 2014 году в рецензируемом научном журнале *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* («Бюллетень по инженерной геологии и окружающей среде»), который выпускается издательством Springer Science+Business Media от имени Международной ассоциации инженерной геологии и окружающей среды. Указанная работа находится в открытом доступе на сайте ResearchGate по лицензии CC BY 2.0 (предыдущей версии CC BY 3.0 и CC BY 4.0), 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 перевода (Corominas et al., 2014) приведена в конце.

В данной статье представлены рекомендуемые методы количественного анализа опасностей и рисков оползневых событий, а также уязвимости/чувствительности к ним объектов в различных пространственных масштабах (детальных, локальных, региональных, национальных), а также методы верификации и валидации полученных результатов анализа. Описанные подходы фокусируются на оценке вероятностей возникновения различных типов оползней с определенными характеристиками. Еще описываются методы, используемые для определения пространственного распределения интенсивности оползней, описания подверженных риску объектов, оценки потенциальной степени ущерба, количественной оценки уязвимости объектов риска, а также методы, используемые для количественного анализа оползневых рисков. Статья предназначена для использования ее инженерами, работающими в научной и практической сферах, геологами и другими специалистами, имеющими дело с оползнями.

Перевод статьи выполнен при поддержке ГК «ПЕТРОМОДЕЛИНГ» и Алексея Бершова.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

оползни; риск; опасность; уязвимость; предрасположенность; метод количественного анализа; камнепады; обломочные потоки; медленно движущиеся оползни.

**ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Короминас Х., Ван Вестен К., Фраттини П., Кашины Л., Мале Ж.-П., Фотопулу С., Катани Ф., Ван Ден Экхаут М., Мавроули О., Альярди Ф., Питилакис К., Винтер М.Г., Пастор М., Ферлизи С., Тофани В., Эрвас Й., Смит Дж.Т. Рекомендации по количественному анализу оползневых рисков // *Геоинфо*. 2024. Т. 6. № .... С. 20–79. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-12-20-79.

**COROMINAS J.**

Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain  
jordi.corominas@upc.edu

**VAN WESTEN C.**

Faculty of Geo-information Sciences and Earth Observation, University of Twente, The Netherlands

**FRATTINI P.**

Department of Earth and Environmental Science, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Milan, Italy

**CASCINI L.**

Department of Civil Engineering, University of Salerno, Salerno, Italy

**MALET J.-P.**

Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Strasbourg, France

**FOTOPOULOU S.**

Research Unit of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

**CATANI F.**

Department of Earth Sciences, University of Firenze, Florence, Italy

**VAN DEN EECKHAUT M.**

Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy

**MAVROULI O.**

Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain

**AGLIARDI F.**

Department of Earth and Environmental Science, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Milan, Italy

**PITILAKIS K.**

Research Unit of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

**WINTER M.G.**

Transport Research Laboratory (TRL), Edinburgh, UK

**PASTOR M.**

ETS Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

**FERLISI S.**

Department of Civil Engineering, University of Salerno, Salerno, Italy

**TOFANI V.**

Department of Earth Sciences, University of Firenze, Florence, Italy

**HERVAS J.**

Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy

**SMITH J.T.**

Golder Associates (formerly TRL), Bourne End Business Park, Bourne End, UK

# RECOMMENDATIONS FOR THE QUANTITATIVE ANALYSIS OF LANDSLIDE RISK

Accepted for publication on December 23, 2024. Published on December 27, 2024.

**ABSTRACT**

We present a slightly abridged and adapted translation of the review paper “Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk” by Italian, Spanish, Greek, British, Dutch, and French researchers (Corominas et al., 2014). It was published in 2014 in the peer-reviewed journal “Bulletin of Engineering Geology and the Environment” by the Springer Science+Business Media publishing company. It is an open access article on the ResearchGate website under the CC BY 2.0 license (the previous version of CC BY 3.0 and CC BY 4.0), 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 (Corominas et al., 2014) used for the presented translation is given in the end.

This paper presents recommended methodologies for the quantitative analysis of landslide hazard, vulnerability and risk at different spatial scales (site-specific, local, regional and national), as well as for the verification and validation of the results. The methodologies described focus on the evaluation of the probabilities of occurrence of different landslide types with certain characteristics. Methods used to determine the spatial distribution of landslide intensity, the characterization of the elements at risk, the assessment of the potential degree of damage and the quantification of the vulnerability of the elements at risk, and those used to perform the quantitative risk analysis are also described. The paper is intended for use by scientists and practicing engineers, geologists and other landslide experts.

The translation of the paper was carried out with the support of the **PETROMODELING Group of Companies and Aleksey Bershov.**

**KEYWORDS:**

landslides; risk; hazard; vulnerability; susceptibility; methodology for quantitative analysis; rockfalls; debris flows; slow-moving landslides.

**FOR CITATION:**

Corominas J., Van Westen C., Frattini P., Cascini L., Malet J.-P., Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M.G., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervas J., Smith J.T. Rekomendatsii po kolichestvennomu analizu opolznevyh riskov [Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk] // *GeoInfo*. 2024. T. 6. № 10. S. 20–79. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-12-20-79 (in Rus.).

## РАСШИФРОВКА ИСПОЛЗУЕМЫХ В ОБЗОРЕ ТЕРМИНОВ ►

Большинство терминов, используемых в представленной обзорной статье, соответствуют определениям, предложенным для рассмотрения оползневых опасностей и рисков международными комитетами [1–3].

**Анализ рисков (risk analysis)** – использование доступной информации для расчета рисков реализации опасностей для отдельных лиц, населения, имущества или окружающей среды.

Анализ рисков обычно включает следующие этапы: определение масштабов; выявление (идентификация) опасностей; оценка уязвимости; расчет рисков (risk estimation).

**Валидация (validation)** – это процесс определения степени, в которой модель является точным представлением реального мира с точки зрения предполагаемого использования модели в дальнейшем. (То есть это процедура подтверждения адекватности модели путем сравнения результатов ее работы с реальными данными. Валидация име-

ет смысл, только если предварительно выполнена верификация модели. – *Пед.*)

**Верификация (verification)** – это процесс определения того, что работа модели точно соответствует концептуальному описанию от разработчика, (То есть это процедура подтверждения корректности модели путем сравнения результатов ее работы с эталонными данными. – *Пед.*)

**Вероятность (probability)** – мера степени определенности, имеющая значения от нуля (невозможность) до 1,0 (определенность, то есть несомнен-



ность), или от 0 до 100% соответственно. Это оценка возможности наступления неопределенного будущего события или возможности достижения заданной величины чего-либо.

**Вероятность достижения (reach probability, runout probability)** – вероятность того, что определенный оползень достигнет точек на определенном расстоянии от места его возникновения (переместится на определенное расстояние).

**Вероятность оползня (landslide probability)**. В рамках оползневой опасности важны следующие виды вероятности:

- *пространственная вероятность (spatial probability)* – вероятность того, что определенная территория будет затронута оползнем;
- *временная вероятность (temporal probability)* – вероятность того, что определенное инициирующее событие вызовет оползень;
- *вероятность размера/объема (size/volume probability)* – вероятность того, что потенциальный оползень будет иметь заданный размер/объем;
- *вероятность достижения (reach probability)* – вероятность того, что оползень пройдет определенное расстояние вниз по склону.

**Возможность (likelihood)**. Этот термин используется для качественного описания вероятности или частоты (означает способность чего-либо возникнуть/случиться в реальности при определенных условиях. – Ped.).

**Зонирование (zoning)** – это процесс подразделения местности на однородные зоны (домены) с последующим их ранжированием в соответствии со степенью фактической или потенциальной подверженности оползневым событиям, со степенью опасности или риска.

Важно, чтобы те, кто выполняет картирование оползней, использовали согласованную терминологию для их классификации и характеристики. Рекомендуется, чтобы классификация и терминология основывались на хорошо известных схемах [4–7].

**Зонирование опасности (hazard zoning)** – разделение местности на зоны, характеризующиеся временной вероятностью возникновения оползней определенной интенсивности в течение заданного промежутка времени. На картах оползневой опасности должны быть показаны зоны, в которых могут сойти оползни, а также зоны их охвата до максимальной дальности перемещения.

**Инвентаризация/учет оползней (landslide inventory)** – регистрация выявленных на определенной территории оползней, объединенная с описанием их атрибутов. В идеале эти атрибуты должны содержать информацию о типе оползня, дате его схода или относительном возрасте, размере и/или объеме, текущей активности и причинах. Инвентаризация оползней либо ведется все время (непрерывно), либо представляет собой так называемую событийную инвентаризацию, то есть регистрацию и описание оползней, произошедших в результате определенного инициирующего события (ливня, землетрясения).

**Индивидуальный риск для жизни (individual risk to life)** – риск смертельного исхода или получения травмы любым идентифицируемым лицом, находящимся в зоне воздействия оползня или ведущим определенный образ жизни.

**Интенсивность оползня (landslide intensity)** – набор пространственно определенных параметров, связанных с разрушительной силой оползня. Эти параметры могут быть описаны количественно или качественно и могут включать максимальную скорость перемещения, общее смещение, дифференцированные/частные смещения, толщину оползневых масс, максимальный расход оползневых масс на единицу ширины или кинетическую энергию на единицу площади.

**Карта оползневой опасности (landslide risk map)** – карта, показывающая подразделение местности на зоны, характеризующиеся разными вероятностями потерь, которые могут возникнуть из-за оползней заданного типа в течение заданного периода времени. Для такой карты обычно рассчитываются:

- ожидаемые потери на конкретной территории в результате воздействия оползня заданной величины (интенсивности) в заданном году;
- ожидаемые потери на конкретной территории от оползня с периодом повторяемости 100 лет;
- совокупные потери за заданный промежуток времени из-за оползней с разными периодами повторяемости.

**Карта оползневой опасности (landslide hazard map)** – карта, показывающая разделение местности на зоны, которые характеризуются вероятностью возникновения оползней определенной интенсивности. На картах оползневой опасности должны быть указаны зоны, где могут возникать оползни, а также зоны их охвата до максимальной дальности перемещения.

**Карта предрасположенности территорий к оползням (landslide susceptibility map)** – карта, показывающая подразделение местности на зоны с разной вероятностью возникновения оползней определенного типа. На ней должны быть указаны зоны, в которых могут возникать оползни, а также зоны их охвата до максимальной дальности перемещения.

**Качественный анализ риска (qualitative risk analysis)** – анализ, в котором используются словесные, описательные или числовые шкалы для описания масштабов (или величин) потенциальных последствий и возможности того, что эти последствия (или величины) наступят. (Этот анализ позволяет получать приблизительные, относительные оценки возможных последствий, используя установленные критерии. – Ped.).

**Количественный анализ риска (quantitative risk analysis)** – анализ, основанный на численных значениях вероятности, уязвимости и последствий, в результате которого получается численная величина риска.

**Контроль риска, или воздействие на риск в целях его уменьшения (risk control, risk treatment)** – процесс принятия решений по управлению риском, а также применение или усиление мер по снижению риска и периодическая переоценка эффективности этих мер на основе результатов очередной оценки риска.

**Население, подверженное риску (population at risk)** – все люди на рассматриваемой территории, которые могут быть непосредственно подвержены последствиям схода оползней.

**Объекты риска (elements at risk)** – объекты, подверженные риску, то есть население, здания, инженерные сооружения, хозяйственная деятельность, общественные службы, инженерные коммуникации и другие объекты инфраструктуры, культурные и экологические особенности на территории, которая может быть затронута оползнями.

**Опасность (hazard)** – условия, которые могут привести к нежелательным последствиям. Описание характера оползневой опасности должно включать местоположение, объем (или площадь), классификацию и скорость потенциальных оползней и любого образующегося в результате этого отделившегося от склона материала, а также вероятность оползневых событий в течение заданного периода времени.

**Оползневая деятельность/активность (landslide activity)** – та или иная

стадия развития оползня: «предразрушение» склона, когда в склоне имеются напряжения, но он еще не нарушен; нарушение, характеризующееся образованием непрерывной поверхности отрыва; «постразрушение», которое включает движение сразу после разрушения до момента, когда оно фактически останавливается; повторная активизация, когда склон сползает по одной или нескольким ранее существовавшим плоскостям разрыва. Реактивизация может быть случайной (например, сезонной) или непрерывной (в этом случае это так называемый активный оползень).

**Остаточный риск (residual risk)** – степень риска, которая остается после принятия мер по его снижению.

**Оценка оползневой опасности (landslide hazard assessment)** – определение/оценка зон, где в течение заданного периода времени могут произойти оползни определенного типа, с определенными объемом, интенсивностью и дальностью перемещения.

**Оценка предрасположенности территории/участка к оползням (landslide susceptibility assessment)** – количественное или качественное оценивание типов, объемов (или площадей) и пространственного распределения оползней, которые существуют или потенциально могут возникнуть на участке или территории.

**Оценка/оценивание рисков (risk assessment)** – это процесс, который включает в себя такие этапы, как анализ и сравнительная оценка рисков (risk evaluation). Его целью является использование полученных результатов для принятия обоснованного решения относительно методов контроля риска. То есть оценка рисков входит в процесс выработки рекомендаций относительно того, являются ли существующие риски приемлемыми и адекватны ли существующие меры контроля рисков, а если нет, то оправданны ли альтернативные меры контроля рисков и будут ли они предприняты.

**Период повторяемости, или интервал повторения (recurrence interval, return period)** – долгосрочный средний промежуток времени между оползневыми событиями на определенном участке или на определенной территории (статистически вычисленное среднее время между возникновением оползней определенной величины или интенсивности на определенном участке или на определенной территории. – *Ред.*).

**Подверженность (exposure)** – возможность оказаться под воздействием

потенциальных оползней для людей, сооружений, имущества, инженерных систем или других объектов в зонах, которые могут быть затронуты оползнями.

**Последствия/последствие (consequence)** – результаты или потенциальные результаты оползневого события, выраженные качественно или количественно в отношении потерь, вреда или пользы, ущерба, травм или потерь жизней.

**Пространственно-временная вероятность для объекта риска (spatiotemporal probability of the element at risk)** – вероятность того, что объект риска окажется на пути движения возможного оползня, то есть количественное выражение подверженности объекта воздействию потенциального оползня.

**Размер/величина оползня (landslide magnitude)** – показатель размера оползня. Количественно величина оползня может быть выражена через его объем или (косвенно) площадь. Эти два показателя могут относиться к стенке отрыва, отложениям оползня или и к тому, и к другому.

**Риск (risk)** – мера вероятности и серьезности неблагоприятного воздействия на здоровье, имущество или окружающую среду. Риск часто определяется как вероятность оползневого события, умноженная на его последствия.

**Социальный риск (societal risk)** – риск того, что общество пострадает от оползневого события, которое приведет к многочисленным жертвам, травмам, а также финансовым, экологическим и другим потерям и нарушениям жизнедеятельности отдельных людей, социальных групп и общества в целом.

**Сравнительная оценка риска (risk evaluation)** – этап, на котором величины и суждения напрямую или косвенно используются в процессе принятия решений с учетом важности рассчитанных (estimated) величин рисков и связанных с ними социальных, экологических и экономических последствий с целью определения ряда альтернатив для управления рисками. (Сравнительная оценка риска включает в себя сопоставление рассчитанных оценок риска с установленными критериями. При этом используются данные о риске, которые были получены при его анализе, а результаты сравнительной оценки нужны для принятия решений о дальнейших действиях. – *Ред.*).

**Угроза (danger)** – природное явление, которое может привести к неблагоприятным последствиям, описываемое с точки зрения его геометрии, механических и других характеристик. Опас-

ность может быть существующей (например, оползающий склон) или потенциальной (например, возможный камнепад). Описание характера опасности не включает в себя ее прогнозирование.

**Управление рисками/риском (risk management)** – полный процесс оценки рисков и контроля рисков.

**Уязвимость/чувствительность (vulnerability)** – степень потерь для данного объекта риска или ряда объектов риска, подверженных воздействию оползня заданной величины/интенсивности. Она выражается в соответствии со шкалой от 0 (нет отрицательных последствий) до 1 (полная потеря).

**Частота (frequency)** – мера возможности, выраженная в количестве событий за заданный промежуток времени.

## ВВЕДЕНИЕ ►

Несмотря на значительное улучшение знаний о механизмах неустойчивости склонов/откосов и наличие широкого спектра методов защиты, оползневые события по-прежнему приводят к значительному числу человеческих жертв и большим экономическим потерям во всем мире. Недавние исследования [8] показали, что гибель людей чаще происходит в менее развитых странах, где относительно мало инвестиций в развитие понимания опасностей и рисков, связанных с оползнями (в основном из-за отсутствия необходимых для этого ресурсов). Для поддержки местных и региональных администраций, которые отвечают за управление оползневыми рисками в большинстве стран, необходимы совместные исследования и более активные усилия по наращиванию соответствующего потенциала.

Органам власти и лицам, принимающим решения, нужны карты, отображающие зоны, которые могут быть затронуты оползнями, чтобы они были учтены в планах строительства и/или чтобы были реализованы соответствующие меры по снижению рисков. Доступно множество разнообразных методов оценки предрасположенности территорий к возникновению оползней, оползневых опасностям и рискам.

Для содействия принятию решений по управлению рисками несколько организаций и научных сообществ предложили руководящие принципы или методические рекомендации по составлению карт оползневой опасности (например, [1, 9–12]). При этом их общей целью является использование единой терминологии и выделение основных данных, необходимых для подготовки карт и

практических руководств по анализу этой информации. Некоторые из них предназначены для включения в нормативно-правовые документы [9; 11]. Однако в разных странах и даже в пределах одной и той же страны применяемые методики существенно различаются между собой [13].

Чтобы управлять риском, его необходимо сначала проанализировать и оценить. Оползневый риск, которому подвержены объект или территория, должен быть рассчитан для определенного промежутка времени после оценки частоты/вероятности возникновения оползней, интенсивность которых превышает минимальное заданное значение. В связи с этим растет необходимость в количественном анализе рисков (КолАР), который отличается от качественного (КачАР) входными данными, используемыми методиками и конечными результатами. КолАР позволяет количественно оценить вероятность определенного уровня потерь и связанные с этим неопределенности, в отличие от КачАР, который дает результаты в виде взвешенных индексов, относительных рангов (например, низкого, среднего и высокого), оценки качественных уровней/категорий риска. (Оценка риска – процесс идентификации и прогнозирования опасности/опасностей, оценки уязвимости и возможных потерь объекта и его составляющих для всех случаев реализации этой опасности. Количественная оценка риска – анализ уровня и степени риска в количественной форме. – *Ред.*)

КолАР важен для ученых и инженеров, поскольку он позволяет количественно оценить риск, причем объективно и воспроизводимо, а его результаты для разных мест (участков, регионов и т.д.) можно сравнивать между собой. Кроме того, он помогает выявлять пробелы во входных данных и понимать слабые стороны используемых видов анализа. Для специалистов, занимающихся управлением оползневых рисками, количественный анализ также полезен, поскольку он позволяет проводить анализ затрат и выгод и обеспечивает основу для определения приоритетов в управлении и действиях по противооползневой защите, а также соответствующего распределения ресурсов. Для общества в целом КолАР помогает повысить осведомленность о существующих уровнях риска в количественной форме и оценить эффективность предпринимаемых мер защиты.

Для КолАР обычно необходимы более точные геологические и геомехани-

ческие входные данные и высококачественная цифровая модель рельефа (ЦМР), чтобы можно было оценить весь диапазон возможных сценариев, проектных событий и периодов повторяемости. Ли и Джонс [14] предупредили, что даже при наличии результатов количественного анализа риска вероятность оползневого события и величина его неблагоприятных последствий являются лишь оценочными. Из-за ограничений в доступной информации использование чисел может скрыть то, что велика потенциальная возможность ошибки. В этом отношении оценки, полученные при КолАР, не обязательно более объективны, чем при качественном, поскольку, например, вероятность может быть оценена на основе личных суждений. Однако количественный анализ риска облегчает обмен информацией между специалистами по геонаукам, собственниками земли и лицами, принимающими решения.

Риск для одного оползневого сценария можно аналитически выразить следующим образом:

$$R = P(M_i)P(X_j|M_i)P(T|X_j)V_{ij}C, \quad (1)$$

где  $R$  – риск, связанный с достижением оползнем величиной  $M_i$  объекта риска, расположенного на расстоянии  $X$  от места инициации этого оползня;  $P(M_i)$  – вероятность возникновения оползня величиной  $M_i$ ;  $P(X_j|M_i)$  – вероятность того, что оползень достигнет точки, расположенной на расстоянии  $X$  от зоны его зарождения, с интенсивностью  $j$ ;  $P(T|X_j)$  – вероятность нахождения объекта риска в точке  $X$  во время оползневого события;  $V_{ij}$  – уязвимость объекта риска к воздействию оползня величиной  $i$  и интенсивностью  $j$ ;  $C$  – величина объекта риска.

В уравнении (1) есть три основных компонента, которые необходимо учитывать при оценке: опасность, подверженность объектов риску и их уязвимость/чувствительность к воздействию оползня. Они характеризуются как пространственными, так и непространственными атрибутами. Опасность характеризуется вероятностью оползневого события и его интенсивностью, которая отражает серьезность опасности. Объектами риска здесь являются: население; имущество; экономическая деятельность, включая общественные услуги; любые другие определенные объекты, подверженные соответствующим опасностям на той или иной территории [3]. Они тоже имеют простран-

ственные и непространственные характеристики. Взаимодействие опасности и этих объектов включает их подверженность оползневому риску и их уязвимость к воздействию оползней. Подверженность отражает степень, в которой объекты риска действительно могут оказаться на пути возможного оползня. Уязвимость относится к условиям, определяемым физическими, социальными, экономическими факторами и условиями окружающей среды или процессами, которые делают общество чувствительным к воздействию опасностей [3]. Физическая уязвимость оценивается как результат взаимодействия между интенсивностью опасности и типом объекта риска с использованием так называемых кривых уязвимости.

Для получения дополнительных пояснений по поводу анализа опасностей и рисков читатель может обратиться к учебникам/руководствам [14–16].

Вероятно, наиболее важным вопросом является определение времени оползневых событий. Во многих районах отсутствие (недостаток) данных не позволяет провести количественное определение вероятности разрушения склона или активизации ранее сошедших оползней в пределах определенного периода времени. Несмотря на это ограничение, решения по управлению оползневыми рисками иногда принимаются с учетом пространственного распределения существующих или потенциальных оползней. Это осуществляется посредством анализа факторов, предрасполагающих к оползневым событиям, или предрасположенности территорий к оползням.

Цель настоящих рекомендаций – дать обзор существующих методов/методик КолАР и зонирования предрасположенности территорий к оползням, оползневых опасностей и рисков в различных масштабах, а также дать рекомендации по их использованию. Эта публикация предназначена не для того, чтобы стать стандартом, а для того, чтобы представить набор количественных инструментов исследователям и практикам, занимающимся анализом оползневых опасностей и рисков, а также методами/методиками соответствующего картирования. Пользователи должны быть осведомлены о действиях и данных, которые необходимы для характеристики оползнеопасных зон и для оценки уровней опасности и потенциальных рисков, а также связанных с ними неопределенностей.

Предлагаемый обзор структурирован аналогично руководству JTC-1 [1; 13] от Совместного технического комитета (Joint Technical Committee, JTC) Международной организации по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO) и Международной электротехнической комиссии (International Electrotechnical Commission, IEC). Следует отметить, что некоторые из авторов настоящей статьи были глубоко вовлечены в подготовку вышеуказанного руководства. Однако здесь все разделы обновлены (по состоянию на момент написания данной работы, то есть на 2014 г. – *Ред.*).

Представленные здесь рекомендации касаются только количественных подходов. При подготовке обзора были приняты значительные усилия для того, чтобы раскрыть темы, которые лишь частично рассматривались в ранее опубликованных руководствах, причем иногда это требовало новых разработок:

- а) методик картирования оползневой опасности на основе карт предрасположенности территорий к возникновению оползней;
- б) анализа опасностей, связанных с разными типами оползней;
- в) оценки подверженности объектов оползневым рискам;
- г) оценки уязвимости, в частности физической чувствительности, и построения кривых уязвимости;
- д) верификации моделей и валидации карт зонирования.

## СТРУКТУРА КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА РИСКА ►

Общая структура КолАР включает весь процесс оценки риска и его контроля (воздействия в целях уменьшения).

Оценка риска включает процесс его анализа и сравнительной оценки.

При анализе риска используется доступная информация для расчета величины риска реализации опасности для отдельных лиц, населения, имущества или окружающей среды. В этот анализ обычно входят следующие стадии: идентификация опасности, оценка опасности, инвентаризация объектов риска и их подверженности риску, оценка уязвимости объектов риска, расчет величины риска. Поскольку все эти стадии имеют важный пространственный компонент, анализ риска часто требует управления набором пространственных данных и использования географических информационных систем (ГИС).

Сравнительная оценка риска – это этап, на котором величины и суждения

напрямую или косвенно входят в процесс принятия решений, включая учет важности вычисленных рисков и связанных с ними социальных, экологических и экономических последствий, в целях определения ряда альтернатив для управления рисками.

Оценка оползневой опасности требует подхода с учетом многих опасностей, поскольку могут возникать различные типы оползней, каждый из которых имеет свои характеристики и причины, а также свои пространственные, временные и размерные вероятности. Кроме того, оползневые опасности часто возникают в сочетании с другими типами опасностей (например, наводнениями или землетрясениями).

На рисунке 1, основанном на работе [17], представлена структура оценки оползневого риска при нескольких опасностях с указанием разных этапов (А–И). На первом этапе (А) обрабатываются исходные данные, необходимые для оценки риска для нескольких факторов опасности с уделением особого внимания информации, необходимой для создания карт предрасположенности территорий к оползням в отношении их возникновения, дальности перемещения, инициирующих факторов, инвентаризаций, выполненных в разное время, и объектов риска.

Второй этап (Б) сосредоточен на оценке предрасположенности территорий к оползням и разделен на два компонента. Первый, наиболее часто используемый, касается моделирования зон, предрасположенных к инициированию оползней, для которого может использоваться множество разных методов (основанных на инвентаризации, а также эвристических, статистических, детерминистических). На полученных картах будут отображены зоны зарождения оползней для моделирования потенциальных зон их перемещения/распространения (вероятностей достижения определенных расстояний).

Третий этап (В) касается оценки оползневой опасности, которая в значительной степени зависит от наличия данных по инвентаризациям оползней, вызванных одинаковыми инициирующими событиями. Связывая распределение оползней с временной вероятностью инициирующего события, можно провести анализ периодов повторяемости оползней той или иной величины. Результаты инвентаризации оползней, вызванных одинаковыми инициирующими событиями (в дополнение к другим факторам), используются для определения

пространственной вероятности инициирования оползней и достижения ими определенных точек, а также для вычисления вероятности возникновения потенциальных оползней в течение заданного периода повторяемости.

Четвертый этап (Г) – это анализ подверженности объектов воздействию оползней, который включает в себя наложение друг на друга карт опасностей и карт расположения объектов риска в среде ГИС.

На пятом этапе (Д) происходит оценка уязвимости объектов с рассмотрением разных типов чувствительности и разных возможных подходов. Основное внимание уделяется использованию экспертных мнений, эмпирических данных и физически обоснованных аналитических или численных моделей при определении классов уязвимости, а также применению доступных кривых или матриц уязвимости. При этом наибольшая часть внимания уделяется определению физической чувствительности объектов, подверженных риску. Другие типы уязвимости (например, социальные, экологические и экономические) в основном анализируются с использованием пространственной многокритериальной сравнительной оценки как части качественной оценки риска (на восьмом этапе, то есть «З») и в данной статье обсуждаться не будут.

Шестой этап (Е) объединяет рассмотрение опасности, уязвимости, характера объектов риска и их количества (либо числа людей, либо количества зданий, либо стоимости). Риск для каждого конкретного объекта (конкретный риск) рассчитывается для многих различных ситуаций и связан с типом оползня, его объемом, периодом повторяемости инициирующего события и типом самого объекта риска.

Седьмой этап (Ж) в целом является реализацией количественного подхода к оценке риска, при котором полученные результаты отображаются в виде кривых риска, отображающих ожидаемые потери в зависимости от вероятности возникновения оползня для каждого его типа в отдельности и отражающих неопределенность, основанную на неопределенностях входных данных при анализе риска. Это можно проиллюстрировать, построив по две кривые, выражающие минимальные и максимальные потери для каждого периода повторяемости инициирующего события или для соответствующей годовой вероятности. Индивидуальные кривые риска могут быть интегрированы в общие кривые риска для

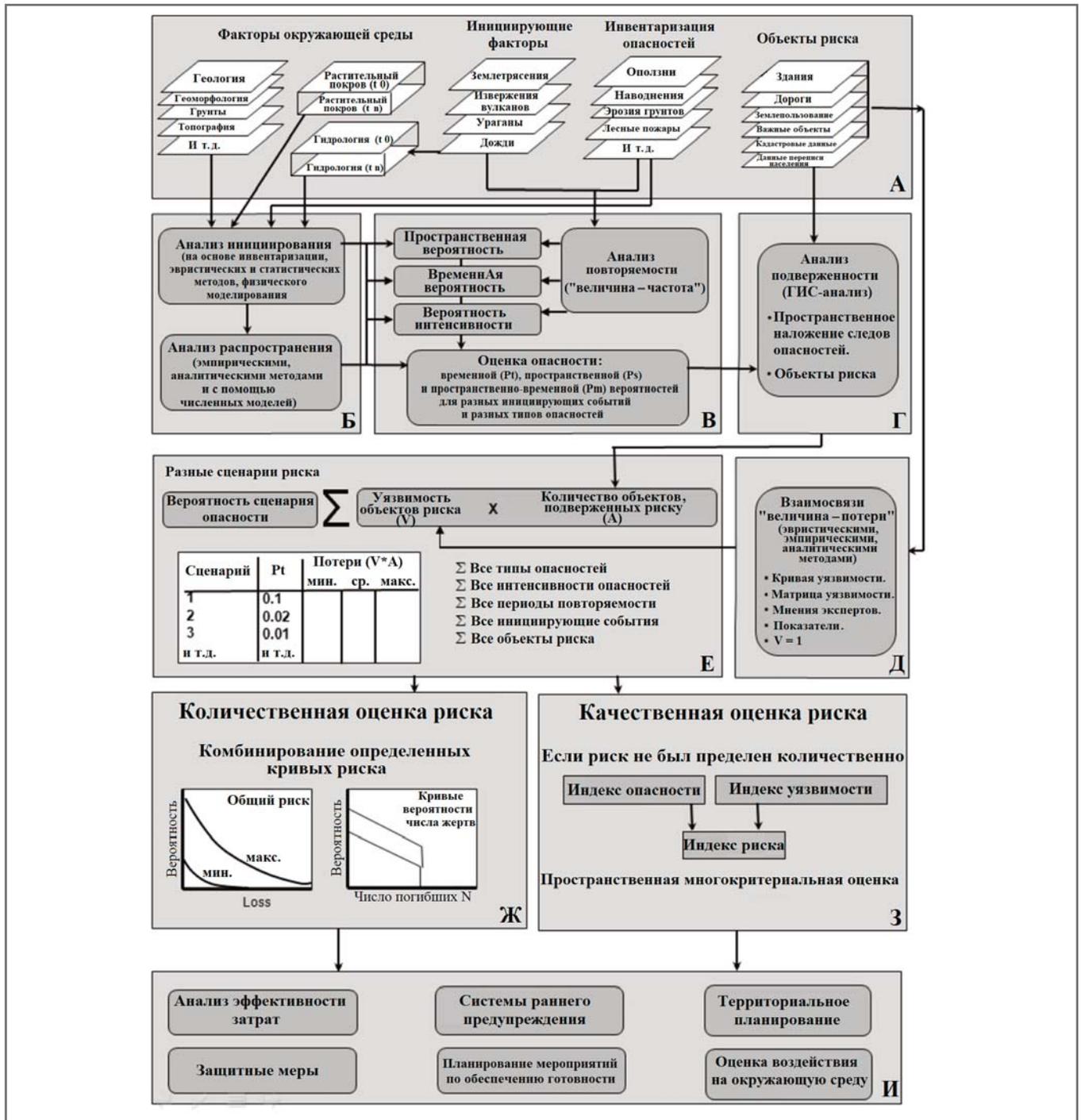


Рис. 1. Структура оценки оползневой риска, связанного со многими опасностями (на основе работы [17])

конкретной территории, а потери населения могут быть выражены в виде кривых вероятности количества жертв [18]. Кривые риска могут быть построены для разных базовых элементов, таких как отдельные склоны, участки дорог, населенные пункты, муниципалитеты, районы или провинции (области).

Восьмой этап (З) касается методов качественной оценки риска, которые в основном основаны на интеграции индекса опасности и индекса уязвимости с использованием пространственной многокритериальной сравнительной оценки.

Последний этап (И) касается использования информации о риске на разных стадиях управления им.

В настоящей статье будут обсуждаться только этапы с «А» по «Ж».

**ОПОЛЗНЕВОЕ ЗОНИРОВАНИЕ В РАЗНЫХ МАСШТАБАХ**

Оползневое зонирование – это разделение территории на однородные зоны (домены) и их ранжирование в соответствии со степенью их фактической или потенциальной подверженности оползням, со степенью опасности или риска. Первые официальные примене-

ния оползневой зонирования, основанные на качественных подходах, относятся к 1970-м годам (например, [19–21]), в то время как количественные методы были разработаны в конце 1980-х годов [22] и более детально – в 1990-х годах (для управления рисками схода оползней с отдельных склонов [23; 24] или большого количества склонов [9; 25]). Эти разработки описаны в работах [26; 27]. За последнее десятилетие (к моменту написания обзора, то есть к 2014 году. – Ред.) появились дальнейшие значительные достижения в зонировании оползней, освещенные:

- в рекомендациях Австралийского общества геомеханики [11; 28];
- в анализе вопросов, связанных с масштабом работ [29; 30];
- в принятых подходах и тенденциях развития практики анализа рисков от детального [27] до глобального [31–33] масштаба;
- в рекомендациях ЖТС-1 [1].

На основе этих разработок в данном разделе представим различные карты, цели, масштабы зонирования с учетом того, что как вид, так и цель зонирования должны определяться конечными пользователями. Конечным пользователям также необходимо [1]:

- 1) понять доступность потенциальных входных данных;
- 2) оценить необходимость и возможности получения новых данных (например, с точки зрения усилий и/или затрат);
- 3) определить реалистичные цели исследований для проведения зонирования, принимая во внимание временные рамки, бюджет и ограничения в ресурсах.

### Виды и назначение карт оползневого зонирования ►

Оползневое зонирование может быть выполнено путем подготовки различных карт, которые по виду зонирования могут быть классифицированы следующим образом:

- карты инвентаризации (учета) оползней;
- карты предрасположенности территорий к оползням;
- карты оползневой опасности;
- карты оползневого риска.

В рамках управления оползневыми рисками (см. рис. 1) карты оползневого зонирования могут использоваться для разных целей [1]: информационных, консультативных, нормативных, проектных.

В зависимости от количества заинтересованных сторон, вовлеченных в управление оползневыми рисками (таких как собственники, арендаторы, живущие или работающие в опасных местах люди, регулирующие органы, геотехники, специалисты по анализу оползневых рисков [34]), а также от размеров зонлируемых территорий, карты оползневого зонирования должны быть подготовлены в соответствующих масштабах..

### Масштабы карт оползневого зонирования ►

Текущая европейская практика [13] показывает, что масштабы карт оползневого зонирования, требуемых госу-

дарственными или местными органами власти, значительно варьируют от страны к стране в зависимости от территориального охвата, используемых исходных данных и методов, а также предоставляемой (предусмотренной) качественной или количественной информации.

Опишем наиболее распространенные масштабы карт оползневого зонирования вместе с некоторыми рассуждениями относительно получаемых результатов и преследуемых целей на основе текущей практики и с учетом того, что оползневое зонирование может потребоваться также строителям, в том числе тем, кто занимается строительством крупных инфраструктурных сооружений (например, автомагистралей или железных дорог).

Масштаб работ ограничивается выбором типа подхода, которого следует придерживаться для достижения целей зонирования. Например, карты национального (1:250 000) и регионального (1:250 000–1:25 000) масштабов не позволяют отобразить отдельные небольшие нарушения на склонах (то есть участки, пострадавшие от оползней, площадь которых не превышает нескольких тысяч квадратных метров). В связи с этим оползни необходимо рассматривать в совокупности, но в указанных масштабах невозможно выполнить ни анализ дальности перемещения оползней, ни анализ их интенсивности и частоты. Или, например, объекты риска должны быть идентифицированы и количественно оценены для определенных территориальных единиц (административно-территориальных единиц или ячеек сетки) либо для однородных единиц со сходными характеристиками (в частности, с точки зрения типа и плотности расположения объектов, подверженных риску). Поэтому подходы к оценке подверженности, опасностей и рисков для масштабов национальных и региональных карт зонирования основываются на следующих допущениях:

- геологические условия на исследуемой территории однородны;
- все склоны имеют одинаковую вероятность разрушения;
- не требуется отражать точное местоположение разрушенного участка склона (оползня);
- все оползни имеют одинаковый размер;
- дальность перемещения (длина) каждого оползня не рассчитывается, равно как и его пространственное распределение и интенсивность;

- данные об объектах риска собираются для заданных пространственных (или однородных) единиц.

Напротив, для подготовки карт в локальных масштабах (1:25 000–1:5 000) и детальных карт в масштабах конкретных участков (>1:5 000) при проведении работ по зонированию необходимо учитывать характеристики отдельных оползней и отдельных объектов риска.

Согласно докладу [35] карты зонирования в национальном масштабе создаются для того, чтобы дать общее представление о проблемных территориях для всей страны. Эти карты могут применяться для информирования национальных директивных органов и широкой общественности. Они могут также использоваться для выбора и планирования предупредительных систем, контролируемых центральными органами власти. Площадь исследуемых территорий в таких случаях превышает десятки тысяч квадратных километров.

Работы регионального масштаба обычно подходят для деятельности планировщиков на ранних этапах проектов регионального развития или для инженеров, оценивающих возможные ограничения из-за нестабильности склонов при разработке крупных инженерных проектов и планов регионального развития. Эти работы могут также использоваться для выбора и планирования предупредительных систем и планов действий в чрезвычайных ситуациях в городах на региональном уровне. Типичные исследуемые территории превышают по площади 1000 км<sup>2</sup> и достигают десятков тысяч квадратных километров.

Карты локального масштаба имеют достаточное разрешение для возможности проведения анализа устойчивости склонов на больших территориях и объединения его результатов с результатами анализа дальности перемещения. Они очень чувствительны к разрешению ЦМР и качеству входных данных. Локальный масштаб обычно применяется в законодательных целях (карты зонирования могут быть юридически обязательными для государственных администраторов и землепользователей). Это эталонный масштаб, используемый при планировании и реализации городских застроек, предупредительных систем и спасательных самолетов на местном уровне. Более того, этот масштаб требуется для ранжирования территорий, наиболее подверженных риску, и для определения приоритетности территорий, которые требуют за-

Таблица 1. Примеры дескрипторов оползневой опасности при различных масштабах работ

Масштаб работ	Длина транзита / перемещения	Интенсивность (или величина): частота $I(M) : F$	Дескриптор опасности
Национальный (<1:250 000)	не включена	не учитывается	число оползней на административно-территориальную единицу в год
Региональный (1:250 000–25 000)	обычно не включена	часто фиксируется (постоянная) величина	число оползней на 1 км <sup>2</sup> в год
Локальный (1:25 000–5 000)	включена	пространственно распределенная величина (интенсивность)	годовая вероятность возникновения (или период повторяемости) события заданной величины или интенсивности
Детальный для конкретного участка (>1: 5 000)	включена	пространственно распределенная интенсивность	годовая вероятность возникновения (или период повторяемости) события заданной интенсивности

щитных мероприятий по снижению рисков для людей и инфраструктуры. Площадь зонирования обычно составляет от 10 до 1000 км<sup>2</sup>.

Масштаб карты зонирования для конкретного участка может использоваться в установленных законом целях, и это единственный масштаб, который может быть принят именно для инженерных изысканий на этом участке до этапа проектирования защитных мер [35]. Размеры исследуемых территорий в таких случаях могут достигать десятков квадратных километров.

Независимо от методов зонирования и принятого масштаба, настоятельно рекомендуется использовать общие дескрипторы (идентификаторы, признаки) для дифференциации оползней по величине и интенсивности, а также для количественной оценки предрасположенности территорий к оползням, величин опасности и риска, чтобы обеспечить возможность сравнения между разными геоэкологическими ситуациями [1].

### Дескрипторы для оползневых опасностей и рисков ►

Дескрипторы состоят из параметров или комбинаций параметров, которые выбираются в соответствии с типом оползневого зонирования. Точно установленные диапазоны количественных значений для этих параметров могут быть связаны с номинальными шкалами (например: очень высокий, высокий, ..., очень низкий уровни). Различные дескрипторы требуются в зависимости от:

- масштаба анализа (поскольку картографические единицы, принятые для национального масштаба, могут отличаться от таковых для конкретного участка) и соответствующих целей зонирования (таких как информационные, консультативные, законодательные, проектные);

- типа оползней (потенциальных или существующих) и их характеристик (например, если рассматривается величина);
- характеристик объектов, подверженных воздействию (например, таких как линейные сооружения, урбанизированные территории и т.д.);
- принятых критериев приемлемости рисков, которые могут различаться от страны к стране [36].

В таблице 1 приведены примеры дескрипторов оползневой опасности, которые следует учитывать при зонировании оползневой деятельности/активности.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА ►

В этом разделе рассматриваются исходные данные, необходимые для оценки предрасположенности территорий к оползням, оползневых опасностей и рисков. С учетом огромного количества публикаций по этой теме здесь приводится краткое описание параметров, которые больше всего подходят для анализа возникновения и потенциала оползневых явлений с различными механизмами (камнепадов, неглубоких оползней, обломочных потоков, медленно движущихся крупных оползней).

Основные слои/уровни данных, необходимые для анализа предрасположенности территорий к оползням, оползневых опасностей и рисков, можно разделить на четыре группы: данные по инвентаризации оползней; факторы окружающей среды; иницирующие (триггерные) факторы; объекты, подверженные риску [35; 37]. Из них наиболее важной является инвентаризация оползней, поскольку она дает представление о местоположении участков прошлых оползневых событий, а также о соответствующих механизмах разруше-

ния склонов, причинах, частоте возникновения и объемах оползней, а также о нанесенном ими ущербе.

### Параметры, влияющие на оползневые события ►

Возникновение, величина, частота и повторяемость перемещений грунтовых масс контролируются большим количеством факторов, которые можно подразделить на внутренние (обуславливающие, предрасполагающие) факторы, которые способствуют нестабильности склона, и иницирующие (провоцирующие, триггерные) факторы, которые фактически вызывают событие. Вид и вес/весомость каждого фактора зависят от условий окружающей среды (например, от климатических условий, рельефа, геологических условий, геоморфологической эволюции и соответствующих процессов) и также могут существенно варьировать в пределах рассматриваемой территории даже из-за небольших различий в условиях местности (например, в свойствах и мощности дисперсных грунтов, гидрогеологических условиях, плотности и ориентации разрывов сплошности в грунтовых массивах, рельефе). Разные комбинации факторов могут приводить к разным видам оползней в пределах одной и той же территории.

Недавний (на момент написания статьи в 2014 году. – *Ред.*) обзор оползневых механизмов и триггеров представлен статье [38]. В ней приводится подробное описание различных иницирующих факторов, таких как атмосферные осадки и изменения в гидрологии подземных вод, изменения геометрии склонов из-за выемки грунта или эрозии, землетрясения и связанные с ними динамические воздействия, таяние снегов и деградация многолетней

мерзлоты, дегляциация и связанные с ней процессы в парагляциальной (водно-ледниковой) среде, выветривание скальных или дисперсных грунтов и связанная с ним деградация склонов, вулканические процессы и деятельность человека.

Большое разнообразие внутренних и триггерных факторов усложняет анализ предрасположенности территории к возникновению оползней и оползневой опасности. Соответственно, используемые для этого анализа методы и подходы, а также необходимые данные различаются от случая к случаю. Кроме того, важную роль играет масштаб, в котором проводится анализ. В публикации [39] обсуждается связь между доступностью данных, сложностью модели и возможностью прогнозирования. Невозможно дать строгие рекомендации по типу данных, требуемых для анализа оползневых опасности и риска в форме предписанного единого списка предрасполагающих и инициирующих факторов. Выбор причинных факторов различается в зависимости от масштаба анализа, характеристик исследуемой территории, вида оползня и механизмов разрушения склона.

Список возможных факторов, влияющих на оползневые события, представлен в таблице 2 – дифференцированно для разных оползневых механизмов. Этот список не является исчерпывающим, и важно выбрать конкретные факторы, которые связаны с видами оползней и механизмами разрушения склонов в каждой конкретной среде. Однако он дает представление о типах факторов, связанных с топографическими, грунтовыми, геологическими, гидрогеологическими, геоморфологическими, погодными и климатическими условиями, а также с землепользованием, землетрясениями и деятельностью вулканов.

### Источники входных данных ►

Чтобы учесть факторы, указанные в таблице 2, при анализе оползневых опасностей и рисков в любом из пространственных масштабов, описанных ранее, их необходимо представить в виде карт. В таблице 3 приводится обзор источников исходных данных, а также указаны основные типы данных, их характеристики, используемые методы и важность каждого из четырех рассмотренных типов оползневых механизмов. Источники входных данных для анализа оползневых опасностей и рисков можно разделить на следующие компо-

ненты: лабораторный анализ, полевые измерения, работа сетей мониторинга, полевое картирование, исследование архивных материалов, дополнительные (вспомогательные данные), дистанционное зондирование.

Имеется относительно мало публикаций, в которых дается обзор источников входных данных и требований к этим данным для количественного анализа оползневых опасностей и рисков (например, [37]). В большинстве руководств по анализу оползневых опасностей и рисков (например, в [14; 15]) эта тема отдельно не рассматривается.

Обзор методов лабораторных экспериментов, полевого картирования и мониторинга, результаты которых можно использовать в качестве входных данных для количественной оценки оползневой опасности, можно найти, например, в руководстве [40] и в некоторых более поздних обзорах, например в публикации [41].

Чаще встречаются обзоры по сбору данных, связанных с отдельными компонентами. Например, в работе [42] рассматриваются геофизические методы для исследований оползневых процессов, в статье [43] – методы датирования, применяемые при исследованиях оползней, а в публикации [44] – методы использования метеорологических данных для анализа пороговых величин дождевых осадков для количественной оценки оползневой опасности. В публикации [45] представлен всесторонний обзор данных, которые необходимо собрать для характеристики и оценки физической уязвимости объектов риска, таких как здания, дороги, трубопроводы и т.д.

Хорошие обзоры по использованию данных дистанционного зондирования для анализа оползневых опасностей и рисков можно найти в работах [35, 46–50]. Сфера дистанционного зондирования претерпела очень важные изменения с появлением на околоземных орбитах спутников, которые дают изображения с разным пространственным, временным и спектральным разрешением. Для ознакомления с последней по времени (на момент написания настоящей статьи, то есть к 2014 году. – *Ред.*) информацией можно зайти во всеобъемлющую базу данных, размещенную по электронному адресу <http://gdsc.nlr.nl/FlexCatalog/catalog.html>.

В таблице 3 показан метод, используемый для сбора пространственных данных каждого типа. Многие из важнейших входных данных получены в

виде точечной информации. Они либо связаны с конкретными объектами (например, оползнями, зданиями), либо являются выборочными точками, которые используются для характеристики территориальных единиц (например, типов грунтов, типов растительности). В последнем случае они должны быть преобразованы в карты посредством пространственной интерполяции с использованием корреляции окружающей среды с атрибутами ландшафта (например, с применением методов геостатистической интерполяции, таких как кокригинг, то есть совместный кригинг). Есть также точечные пункты, предоставляющие информацию по региональным переменным (например, по атмосферным осадкам), которые также необходимо интерполировать. Многие типы информации представлены в виде площадных объектов (например, оползней, зданий в плане), или они охватывают всю исследуемую территорию (например, цифровые модели рельефа, данные по растительности, геологии).

Как видно из примеров типов данных, перечисленных в таблице 3, для количественных исследований оползневых опасностей и рисков требуется большое количество данных. Наличие вспомогательной информации, размер изучаемой территории, однородность местности и доступность ресурсов для исследований будут определять тип и количество необходимых данных, которые в конечном итоге также будут определять тип используемого метода оценки предрасположенности участков территории к оползням и возможность преобразования карты предрасположенности в карту количественно оцененных опасностей и рисков [1, 12, 37].

Далее некоторые основные типы входных данных будут рассмотрены более подробно.

### Инвентаризация оползней ►

Базы данных по инвентаризации оползней должны отображать информацию об оползневой деятельности/активности (предпочтительно с указанием состояния, характера и распределения оползневой деятельности/активности, как это было определено в работах [4, 51]). Следовательно, для них требуется информация об оползнях для более крупных территорий, полученная в разное время.

Для детальных (сайт-специфических) масштабов картирования анализ оползневой деятельности/активности

**Таблица 2. Факторы, влияющие на оползневые события, и их релевантность для оценки предрасположенности территорий к оползням и оползневой опасности для разных механизмов оползней\***

Группа факторов	Параметры	Релевантность	Тип фактора		Оползневые механизмы		
			обусл.	триг.	камн.	негл.	круп.
Топографические	Высота, рельеф	Перепады высот обуславливают наличие потенциальной энергии для перемещения материала вниз по склону	+		оч.	крит.	оч.
	Крутизна склона	Является преобладающим фактором, вызывающим оползни	+	+	крит.	крит.	крит.
	Направление склона	Может быть связано с различиями во влажности грунтов и в растительности и играет важную роль в отношении разрывов сплошности	+		крит.	умер.	умер.
	Длина склона, его форма, кривизна, шероховатость	Показатель гидрологических и гидрогеологических условий склона, важный для моделирования траектории движения оползня	+		крит.	оч.	оч.
	Направление потока и аккумуляция	Используется при гидрогеологическом моделировании склонов, например, для определения индекса влажности	+		умер.	крит.	оч.
Геологические	Типы скальных пород	Определяют инженерно-геологические свойства скальных грунтов	+		крит.	оч.	крит.
	Выветривание	Важными факторами являются типы выветривания (физические, химические), его глубина, отдельные зоны, возраст продуктов выветривания	+		крит.	оч.	оч.
	Разрывы сплошности	Сети трещин и их характеристики, связь с направлениями и крутизной склонов	+		крит.	умер.	оч.
	Структурные аспекты	Геологическое строение по отношению к углу наклона и направлению склона	+		оч.	оч.	оч.
	Разломы	Расстояние от активных разломов или ширина зон разломов	+		оч.	оч.	оч.
Связанные с дисперсными грунтами	Типы дисперсных грунтов	Происхождение дисперсного грунта определяет его свойства и геометрию	+		мен.	крит.	оч.
	Толщина поверхностных дисперсных грунтов	Толщина поверхностных образований определяет потенциально подвижный объем	+		мен.	крит.	оч.
	Инженерно-геологические свойства	Гранулометрический состав (размер зерен), удельное сцепление, угол внутреннего трения, объемная плотность	+		мен.	крит.	оч.
	Гидрогеологические свойства	Объем пор, гидравлическая проводимость (водопроницаемость) в водонасыщенном состоянии, кривая влагоудержания (кривая всасывающего давления pF)	+		мен.	оч.	оч.
Гидрогеологические	Грунтовые воды	Пространственные и временные изменения уровня грунтовых вод, высокие уровни грунтовых вод, фронты увлажнения, давление поровой воды, всасывающее давление (сосущая сила) дисперсного грунта	+	+	мен.	оч.	оч.
	Влажность дисперсных грунтов	Пространственные и временные изменения влажности дисперсных грунтов	+	+	мен.	оч.	оч.
	Гидрологические компоненты	Удержание стока, эвапотранспирация, проникающие сквозь растительность атмосферные осадки, поверхностный сток, инфильтрация, гравитационное просачивание и т.д.	+	+	умер.	оч.	оч.
	Сеть потоков и густота дренажной сети	Буферные зоны вокруг потоков; при мелкомасштабной оценке густота дренажной сети может использоваться в качестве показателя типа местности	+		мен.	оч.	оч.

**Таблица 2. Факторы, влияющие на оползневые события, и их релевантность для оценки предрасположенности территорий к оползням и оползневой опасности для разных механизмов оползней\*** (продолжение)

Группа факторов	Параметры	Релевантность	Тип фактора		Оползневые механизмы		
			обусл.	триг.	камн.	негл.	круп.
Геоморфологические	Геоморфологические условия	Высокогорные, ледниковые, перигляциальные, денудационные, прибрежные, тропические и т.д.	+		оч.	оч.	оч.
	Старые оползни	Характеристики материалов и рельефа изменились, что делает эти места более подверженными повторной активизации оползней	+		умер.	оч.	крит.
	Прошлая оползневая деятельность/активность	Историческая информация об оползневой деятельности/активности часто имеет решающее значение для определения оползневых опасностей и рисков	+		крит.	крит.	крит.
Связанные с землепользованием и др. антропогенные	Текущее землепользование	Тип землепользования (почвенно-растительный покров), тип растительности, лесной покров, глубина распространения корней, сцепление корней, вес	+		оч.	оч.	оч.
	Изменения в землепользовании	Временные изменения в землепользовании (почвенно-растительном покрове)	+	+	умер.	крит.	оч.
	Транспортная инфраструктура	Буферные зоны по бокам дорог на склоновых территориях с дорожными выемками	+		умер.	оч.	оч.
	Здания	Подрезка склонов, выполненная для строительства зданий	+	+	умер.	оч.	оч.
	Дренажные и ирригационные сети	Утечки из таких сетей могут быть важными причинами оползней.	+	+	мен.	оч.	оч.
	Разработка карьеров и шахт	Эти действия изменяют геометрию склонов и распределение в них напряжений. Вибрации, вызванные взрывными работами, могут инициировать оползни	+	+	оч.	оч.	оч.
	Плотины и водохранилища	Водохранилища изменяют гидрологические и гидрогеологические условия. Дамбы хвостохранилищ могут выйти из строя	+	+	мен.	оч.	оч.
Связанные с землетрясениями и деятельностью вулканов	Сейсмичность	Повторяемость землетрясений разной силы, исторические карты их интенсивности, связанные с инвентаризацией косейсмических оползней		+	крит.	крит.	крит.
	Механизмы разломов	Место, тип, длина каждого разлома, скрытый или выходящий на поверхность разлом, расстояние от него, висячий бок или лежащий бок	+	+	оч.	оч.	оч.
	Тип вулкана	Высота и состав вулканической постройки, стабильность магматического очага	+	+	умер.	оч.	оч.
	Типы вулканических извержений	Боковые взрывные извержения, обрушения магматических очагов, пирокластические потоки, лахары	+	+	умер.	оч.	оч.
Связанные с погодой и климатом	Атмосферные осадки	Суточные или непрерывные данные, повторяемость выпадения осадков, кривые «интенсивность – продолжительность – частота выпадения осадков» (кривые IDF), пороговые значения для дождей, предшествующие дожди, кривые «площадь – продолжительность – частота выпадения осадков» (кривые PADF)		+	крит.	крит.	крит.
	Температура	Существенное влияние на гидрологию, гидрогеологию и состояние растительности. Резкие перепады температур, таяние снега, циклы замерзания и оттаивания, многолетняя мерзлота	+	+	оч.	оч.	оч.

\* Сокращения, использованные в таблице: по механизмам оползней: камн. – камнепады, негл. – неглубокие оползни и обломочные потоки, круп. – крупные медленно движущиеся оползни; по типу фактора: обусл. – обуславливающий (внутренний, предрасполагающий), триг. – триггерный (инициирующий, провоцирующий); по значимости фактора: крит. – критически важный (важнейший), оч. – очень важный, умер. – умеренно важный, мен. – менее важный).

Таблица 3. Источники входных данных и их значимость для количественного анализа оползневых опасностей и рисков для разных механизмов оползней\*

Основной источник	Группа данных	Примеры	Метод сбора данных	Масштаб				Значимость для оползней		
				нац.	рег.	лок.	дет.	камн.	негл.	круп.
Лабораторные исследования	Свойства дисперсных грунтов	Гранулометрический состав, прочность при сдвиге в насыщенных и ненасыщенных водой условиях, кривые влагоудержания, гидравлическая проводимость (водопроницаемость) в водонасыщенном состоянии, глинистые минералы, структурная прочность (чувствительность), вязкость, объемная плотность	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	мен.	крит.	оч.
	Свойства скальных грунтов	Прочность при одноосном сжатии, прочность при сдвиге, минералогический состав	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	крит.	мен.	крит.
	Свойства растительности	Прочность корней на растяжение, прочность корней на выдергивание, суммарная эвапотранспирация	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	мен.	оч.	умер.
	Возраст грунта	Радиоуглеродный анализ (C-14), пылевого анализ	точ.	труд.	труд.	труд.	возм.	мен.	мен.	оч.
Полевые измерения	Возраст оползня	Дендрохронология, лишенометрия, годовичные отложения, тефрохронология, археологические артефакты	точ.	труд.	труд.	труд.	возм.	умер.	умер.	оч.
	Толщина дисперсного грунта от поверхности	Буровые скважины, траншеи, шурфы, обнажения, прогнозы	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	мен.	крит.	умер.
	Геофизические свойства	Сейсморазведка методом преломленных волн, микросейсмический мониторинг, электромагнитная разведка, магниторазведка, георадиолокация, геофизические исследования скважин	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	мен.	умер.	оч.
	Характеристики дисперсного грунта	Стандартные пенетрационные испытания (динамическое зондирование методом SPT), полевое зондирование крыльчаткой	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	мен.	крит.	умер.
	Характеристики скального грунта	Литология, разрывы сплошности (типы, интервалы, ориентация, раскрытие, заполнение), характеристика породной толщи (геомеханической системы)	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	крит.	мен.	оч.
	Гидрогеологические характеристики	Инфильтрационная способность, колебания уровня грунтовых вод, всасывающее давление (сосущая сила) грунта, давление поровой воды (поровое давление)	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	оч.	крит.	крит.
	Характеристики растительности	Глубина распространения корней, плотность распространения корней, вид растительности, виды растений, коэффициент культуры (отношение эвапотранспирации к испарению), количество (доля) проникших под полог леса жидких атмосферных осадков	выб.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	умер.	оч.	мен.
Сети мониторинга	Перемещение оползня	Электромагнитные дальнометры, системы глобального позиционирования, теодолиты, наземные лазерные сканеры, наземная интерферометрия и т.д.	точ.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	оч.	оч.	оч.
	Подземные воды	Пьезометры, тензометры, устройства для измерения расхода	точ.	невозм.	невозм.	труд.	возм.	оч.	крит.	крит.
	Метеорологические данные	Атмосферные осадки, температура, влажность, скорость ветра	интерп.	возм.	возм.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.
	Сейсмические данные	Сейсмические станции, станции сильных движений, микросейсмические исследования	интерп.	возм.	возм.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.

**Таблица 3. Источники входных данных и их значимость для количественного анализа оползневых опасностей и рисков для разных механизмов оползней\***
(продолжение)

Основной источник	Группа данных	Примеры	Метод сбора данных	Масштаб				Значимость для оползней		
				нац.	рег.	лок.	дет.	камн.	негл.	круп.
Полевое картирование	Оползни	Тип, (относительный) возраст; скорость движения; состояние в отношении активности; зоны зарождения, транзита, остановки, охвата; длина, площадь; глубина; объем; причины; развитие	площ.	труд.	возм.	возм.	возм.	крит.	крит.	крит.
	Геоморфология	Характеристика форм рельефа, процессов и материалов поверхности	полн.	труд.	труд.	возм.	возм.	мен.	оч.	оч.
	Типы дисперсных грунтов	Текстура, классификация дисперсных грунтов картирование границ, преобразование в инженерно-геологические типы дисперсных грунтов	полн.	труд.	труд.	возм.	возм.	мен.	крит.	оч.
	Литология	Литологическое картирование, зоны выветривания, картирование границ, формации, элементы, преобразование в инженерно-геологические типы скальных грунтов	полн.	труд.	труд.	возм.	возм.	крит.	оч.	оч.
	Структурная геология	Измерение простирания и падения плоскостей напластования и разрывов сплошности, стратиграфическая реконструкция, картирование разломов, структурная реконструкция	полн.	труд.	труд.	возм.	возм.	оч.	мен.	оч.
	Растительность	Тип растительности, плотность, индекс листовой поверхности	полн.	труд.	труд.	возм.	возм.	мен.	оч.	умер.
	Землепользование	Типы землепользования, характеристика растительности для каждого вида землепользования	полн.	труд.	труд.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.
	Объекты, подверженные риску	Типология, конструктивные системы, высота, фундаментные системы зданий; классификация дорог; классификация трубопроводов	площ., лин.	труд.	труд.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.
Архивные исследования и вспомогательные данные	Прошлые оползневые события	Историческая информация о местоположении, дате возникновения, механизме инициирования, размере, объеме, длине оползней	площ., точ.	труд.	труд.	возм.	возм.	оч.	оч.	крит.
	Данные по повреждениям, потерям	Историческая информация об экономических потерях и пострадавшем населении с указанием дат, местоположений и характеристик	точ.	труд.	труд.	труд.	труд.	оч.	оч.	оч.
	Метеорологические данные	Атмосферные осадки (непрерывные или суточные данные), температура, скорость ветра, влажность	интерп.	возм.	возм.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.
	Изменения в землепользовании	Исторические карты по землепользованию / почвенно-растительному покрову для разных периодов	полн.	возм.	возм.	возм.	возм.	умер.	оч.	оч.
	Объекты, подверженные риску	Исторические карты по застройке, транспортной инфраструктуре, экономической деятельности и характеристикам населения	площ., лин.	возм.	возм.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.
	Цифровые данные по рельефу	Топографические карты с горизонталями, цифровые модели рельефа по существующим каталогам	полн.	возм.	возм.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.
	Тематические карты	Геологические, геоморфологические, гидрографические и другие существующие тематические карты	полн.	возм.	возм.	возм.	возм.	оч.	оч.	оч.
Дистанционное зондирование	Аэрофотоснимки и спутниковые снимки с высоким разрешением	Интерпретация изображений для картирования и характеристики местоположений оползней, геоморфологии, разломов, линеаментов, типов землепользования / почвенно-растительного покрова, объектов, подверженных риску	площ., полн.	труд.	возм.	возм.	возм.	крит.	крит.	крит.
	Мультиспектральные изображения	Методы классификации изображений для картирования оползней, типов землепользования / почвенно-растительного покрова, стандартизованного индекса различий растительного покрова, индекса листовой поверхности	площ., полн.	возм.	возм.	возм.	возм.	умер.	оч.	умер.
	Цифровые данные по рельефу	Воздушная стереофотограмметрия, космическая стереофотограмметрия, лазерное дистанционное зондирование лидаром (LiDAR), дистанционное зондирование интерферометрическим радаром с синтезированной апертурой (InSAR)	полн.	возм.	возм.	возм.	возм.	крит.	крит.	крит.

\* Сокращения, использованные в таблице: по методу сбора пространственных данных: точ. – точечные данные, привязанные к конкретным объектам (например, к оползням), выб. – выборочные точки (точки выборки), характеризующие территориальные единицы (например, по типам почв, по типам растительности), интерп. – точки сетки, которые необходимо интерполировать, площ. – данные по площадным объектам (например, по полигонам оползней, зданиям), полн. – данные с полным покрытием территории; лин. – линейные данные; по масштабу: нац. – национальный, рег. – региональный, лок. – локальный (для конкретной местности), дет. – детальный (для конкретного участка); по механизмам оползней: камн. – камнепады; негл. – неглубокие оползни и обломочные потоки; круп. – крупные медленно движущиеся оползни; по значимости источника: крит. – критически важный (важнейший), оч. – очень важный, умер. – умеренно важный, мен. – менее важный; по потенциальной возможности сбора этой информации в разных масштабах: возм. – возможно, труд. – трудно, невозм. – невозможно.

часто ограничивается одним оползнем и требует большего его мониторинга.

Для того чтобы создать надежную карту, которая прогнозирует оползневые опасности и риски на определенной территории, крайне важно иметь представление о пространственной и временной частоте оползней – следовательно, каждое изучение опасностей или рисков должно начинаться с инвентаризации оползней, которая является максимально полной как в пространстве, так и во времени и которая соответствует международной номенклатуре [7].

Инвентаризация оползней может проводиться с помощью разных методов. Сравнительно недавний (на момент написания статьи – *Ред.*) обзор методов, используемых для составления оползневых карт, был представлен в работе [52]. Наиболее широко применяемым методом остается визуальная интерпретация стереоскопических изображений (либо аэрофотоснимков, либо оптических спутниковых изображений с очень высоким разрешением), которая позволяет проводить инвентаризацию с высоким разрешением [53] при особых местных условиях (например, при ограничениях из-за растительного покрова), если ее выполняют опытные интерпретаторы. В настоящее время хорошей альтернативой для многих областей является использование данных сервиса Google Earth, где многие части мира охвачены изображениями с высоким разрешением, которые могут быть загружены в ГИС и объединены с цифровыми моделями рельефа для получения стереоскопических изображений, необходимых для интерпретации оползней. Одним из наиболее важных достижений является возможность визуальной интерпретации оползней по изображениям с оттененным рельефом на основе ЦМР, полученных с помощью съемки лидаром (LIDAR), с которых были удалены объекты (например, растительность), расположенные на поверхности Земли [54–57].

Составление карт инвентаризации оползней с использованием визуальной интерпретации стереоизображений является трудоемкой задачей и требует обширных навыков, профессиональной подготовки и настойчивости. Во многих случаях такие опытные интерпретаторы отсутствуют или же инвентаризацию оползней необходимо выполнить в течение короткого периода времени после инициирующего события, что требует применения автоматизированных методов выявления, основанных на дистан-

ционном зондировании. В работах [49, 50] даются полные обзоры различных методов и инструментов дистанционного зондирования, которые могут быть использованы для (полу-) автоматизированного картирования и мониторинга оползней. В большом количестве методов применяются инструменты пассивного оптического дистанционного зондирования, такие как пиксельно-ориентированные классификация или обнаружение изменений по космическим снимкам [58–60] либо объектно-ориентированные классификация или обнаружение изменений по космическим снимкам [61, 62].

Многие методы, используемые для картирования и мониторинга оползней, основаны на цифровых измерениях высотных отметок, которые возможны с помощью широкого спектра инструментов, таких как наземные фотографии [63], наземные видеозаписи, аэрофотоснимки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [64], воздушная стереофотограмметрия и космическая стереофотограмметрия [65]. Кроме того, очень успешным оказалось применение лидарных данных (данных как воздушного, так и наземного лазерного сканирования) [66]. Помимо лидара (LiDAR – лазерного локалятора) наиболее полезным инструментом для картирования и мониторинга оползней с использованием дистанционного зондирования является интерферометрический радар с синтезированной апертурой (InSAR), который широко используется для измерения смещений поверхности. Для измерения смещений постоянных отражателей (рассеивателей), например зданий, с точностью до миллиметра может применяться анализ данных такого радара для одной и той же территории, полученных в разные моменты времени, с использованием метода постоянных отражателей (PS) [67] и метода малых базовых расстояний (SB) [68]. Это позволяет проследить историю деформаций [69].

### Предрасполагающие факторы ►

Поскольку топографическая информация и ее различные производные играют важную роль в анализе оползневой опасности, решающее значение имеет применение цифровых моделей рельефа с высоким разрешением.

ЦМР могут быть получены большим количеством методов, таких как оцифровка горизонталей с существующих топографических карт, топографическое нивелирование, измерение расстояний

электронными дальномерами, измерения с помощью дифференциальной глобальной системы позиционирования, (цифровая) фотограмметрия с использованием изображений, полученных с земли или с широкого спектра платформ, дистанционное зондирование лидаром (лазерным локатором LiDAR) и интерферометрическим радаром с синтезированной апертурой (InSAR).

ЦМР теперь доступны из нескольких источников, таких как глобальные цифровые модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 2000 года [70] и ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 2009 года [71]. В ближайшем будущем (после написания настоящей статьи. – *Ред.*) ожидается более точная глобальная ЦМР по данным дистанционного зондирования земли с немецкого радиолокационного спутника TanDEM-X (являющегося копией спутника TerraSAR-X, специально настроенной для цифровых измерений рельефа). Эти данные обеспечат создание ЦМР для всей поверхности Земли с вертикальной точностью 2 м и пространственной точностью 12 м [72, 73]. Многие типы карт (например, крутизны, ориентации, длины, кривизны, площади склонов) могут быть получены на основе ЦМР с использованием операций в геоинформационных системах (ГИС).

Стандартными компонентами эвристических и статистических методов оценки оползневой опасности традиционно являются геологические карты [74–76]. Рекомендуется преобразовать традиционную легенду геологической карты, в которой основное внимание уделяется литостратиграфическому подразделению на формации, в инженерно-геологическую классификацию с уделением большего внимания четвертичным отложениям и дополнительной информацией по составу скальных пород и прочности их массивов. В ходе детальных исследований опасностей составляются специальные инженерно-геологические карты и определяются типы скальных пород с использованием полевых испытаний и лабораторных измерений [77]. Для детального (сайт-специфического) анализа применялись трехмерные геологические карты, хотя объем собранной информации по обнажениям и скважинам позволяет применять этот метод лишь для масштабов 1:5000 или крупнее. В настоящее время (на момент написания настоящей статьи. – *Ред.*) его применение, как правило, ограничивается исследованиями на уровне участка (например, [78]), хо-

тя можно ожидать, что это изменится в будущем, когда станет доступна более подробная информация по скважинам и геофизическим исследованиям, поскольку компьютерные технологии и доступность данных изменили нашу способность создавать цифровые трехмерные модели неглубоких подповерхностных условий (например, [79]).

Для оценки оползневой опасности помимо литологической очень важна структурная информация. В средних и крупных масштабах предпринимались попытки создать карты с указанием направления и угла падения, основанные на полевых измерениях, но успех этого очень сильно зависит от количества структурных измерений и сложности геологического строения [80].

Ключевой проблемой при использовании физически обоснованных моделей устойчивости склонов для оценки оползневой опасности является представление свойств дисперсных грунтов, особенно для неглубоких нарушений, таких как сходы обломочных потоков и оползания, а также глубоких оползней из дисперсных грунтов [81]. Глубина залегания коры выветривания материнской породы, которую геоморфологи и инженеры часто называют глубиной залегания подошвы (толщиной, мощностью) дисперсных грунтов, определяется как глубина от поверхности до более или менее консолидированного материала. Несмотря на то что это основной фактор при моделировании оползней, в большинстве исследований проигнорирована его пространственная изменчивость и при анализе использованы постоянные значения для обобщенных частей территорий [82–86].

Толщину дисперсных грунтов можно смоделировать с помощью физически обоснованных методов, которые моделируют скорости выветривания, денудации и аккумуляции [87, 88], либо эмпирических методов, которые определяют корреляции с топографическими факторами, такими как уклон; или же ее можно предсказать с помощью геостатистических методов [89–92]. Такие методы также использовались для моделирования распределений соответствующих геотехнических и гидрогеологических свойств дисперсных грунтов [93]. Однако точное моделирование толщины и параметров дисперсных грунтов на больших территориях остается сложным из-за их высокой пространственной изменчивости. Это означает, что окончательный прогноз гидрогеологии и устойчивости склона все

же будет иметь значительную долю случайности.

Помимо ограничений по точности определения пространственной изменчивости есть два других существенных источника ошибок, которые будут распространяться на окончательные результаты моделирования гидрогеологии и устойчивости склона, – это точность измерений и временная изменчивость параметров [94].

Дополнительную информацию о глубине залегания подошвы дисперсных грунтов и о рельефе кровли коренных пород дают образцы грунтов, отобранные на разных глубинах при бурении скважин, и анализ кривых их гранулометрического состава, что также важно для определения гидрогеологических условий.

Геоморфологические карты создаются в различных масштабах, чтобы показать участки территорий в зависимости от их формы, материалов, процессов и генезиса. Хотя в некоторых странах, таких как Германия, Нидерланды, Польша и Бельгия, с этой целью созданы системы условных обозначений [95], общепринятых условных обозначений для геоморфологических карт не существует и в них могут быть значительные вариации в зависимости от опыта геоморфолога.

Важной областью геоморфологии является количественный анализ форм рельефа с помощью ЦМР, называемый геоморфометрией, или цифровым (морфометрическим) анализом рельефа. Она сочетает в себе элементы наук о Земле, инженерии, математики, статистики и информатики [96]. Часть этой работы сосредоточена на автоматической классификации геоморфологических единиц территории на основе морфометрических характеристик в небольших масштабах [97] или на выделении «граней» склонов в средних масштабах, которые могут быть использованы в качестве основных картографических единиц при статистическом анализе [53].

Землепользование при изучении оползневой опасности часто рассматривается как статический фактор. И лишь при относительно немногих исследованиях изменения в землепользовании рассматривались как фактор анализа [98, 99]. Однако появляется все больше работ, в которых анализируется влияние изменений в землепользовании на оценку предрасположенности территорий к оползням [100]. Для моделирования, основанного на физических дан-

ных, очень важно иметь временные карты землепользования / почвенно-растительного покрова и определять изменения в механическом и гидрогеологическом воздействиях растительности. Карты землепользования составляются обычным путем на основе спутниковых снимков со средним разрешением. В приложениях для землепользования широко применяются такие методы обнаружения изменений, как сравнение после классификации, поиск и анализ различий в изображениях, полученных в разное время, и их соотношений, а также байесовские вероятностные методы, однако несмотря на это проделанная работа по включению карт изменений в землепользовании, составленных в разное время, в исследования оползневой опасности была достаточно ограниченной [101].

### Иницирующие факторы ►

Еще один важный набор исходных данных для оценки оползневой опасности относится к иницирующим (провоцирующим, триггерным) факторам.

Информация по атмосферным осадкам, сейсмичности и деятельности человека имеет очень важные временные компоненты, знание которых необходимо при преобразовании карт предрасположенности территорий к оползням в карты опасностей.

Для определения вероятности возникновения оползней, вызванных конкретным триггером, используется соотношение «величина – частота» (повторяемость) для этого вида иницирующего события. Такие соотношения могут быть связаны с возникновением оползней несколькими способами, что будет рассмотрено в обзоре позднее.

Данные по атмосферным осадкам и температуре собираются на метеорологических станциях, а затем путем интерполяции выводятся их величины для всей исследуемой территории. После этого находят корреляции между датами исторических оползней и количествами осадков, чтобы установить пороговые значения последних [44]. Хорошим примером в этом отношении является Европейский проект по оценке климата и набору соответствующих данных (European Climate Assessment & Dataset project, <http://eca.knmi.nl/>).

Многообещающим подходом при изучении оползней является использование метеорологических радиолокационных станций (РЛС) для прогнозирования атмосферных осадков, поскольку он дает возможность отслеживать гро-

зовые очаги с высоким пространственным разрешением, что, в свою очередь, позволяет составлять краткосрочные прогнозы или давать своевременные предупреждения (например, [102]).

Физически обоснованные модели предрасположенности территорий к оползням могут включать количество атмосферных осадков в качестве динамического компонента, что позволяет составлять карты предрасположенности для будущих сценариев изменений климата [103–105].

Методы анализа предрасположенности территорий к оползням, вызванным землетрясениями, все еще не очень хорошо разработаны из-за трудностей, связанных с определением возможных сценариев землетрясений, например в отношении предшествующих влажностных условий и распределения связанных с ними косейсмических оползней [106–108]. Чтобы лучше установить взаимосвязи между сейсмическими, геологическими и связанными с рельефом факторами для прогнозирования распределения косейсмических оползней, необходимо выполнить цифровые инвентаризации реальных косейсмических оползней для различных сред, магнитуд землетрясений и механизмов разломов.

Еще один подход к картированию предрасположенности территорий к оползням, вызванным землетрясениями, – это использование основанной на эвристических правилах работы в ГИС с картами факторов, связанных с крутизной и высотой склона, типом и влажностью слагающего его материала, формами рельефа и интенсивностью сотрясений, например с применением данных USGS ShakeMap (карт движений грунта и интенсивности сотрясений, предоставляемых почти в режиме реального времени после значительных землетрясений, – продуктов программы Геологической службы США по оценке сейсмической опасности совместно с данными региональных сейсмических сетей. – *Ред.*) [109].

### Объекты, подверженные риску ►

Объекты, подверженные риску, – это все объекты (население, имущество, окружающая среда), которые могут испытать воздействие опасных явлений. Последствия схода оползня и соответствующий риск зависят от типа таких объектов, присутствующих на территории. Их инвентаризация может проводиться на разных уровнях в зависимости от целей исследования [110].

Данные об объектах, подверженных риску, следует собирать для определенных базовых территориальных единиц, которые могут быть ячейками сетки, административно-территориальными единицами или однородными участками территорий, обладающими схожими характеристиками с точки зрения типа и плотности объектов, на которые могут воздействовать потенциальные оползни. Риски также могут быть проанализированы для линейных сооружений (например, транспортных линий) или конкретных площадок (например, мест строительства плотин).

Информацию о зданиях можно получить несколькими способами. В идеале она доступна в виде карт пятен застройки с соответствующей вспомогательной информацией о типологии, конструктивных системах, высоте, типах фундаментов зданий, а также об их стоимости и содержимом [45]. Эта информация также может быть получена из существующих кадастровых баз данных и карт (градостроительного) территориального планирования или может быть доступна в агрегированной форме в виде данных по количеству и типам зданий для каждой территориально-административной единицы. Если такие данные недоступны, то могут быть созданы карты пятен застройки с помощью экранной оцифровки изображений с высоким разрешением или с помощью автоматизированного картирования зданий с использованием мультиспектральных спутниковых изображений с высоким разрешением и изображений, полученных с помощью лидара (LiDAR) [111].

Наборы данных о населении имеют статические и динамические компоненты. Статический компонент относится к числу жителей на единицу картирования и к их характеристикам, а динамический – к характеру их деятельности и распределению в пространстве и во времени. Распределение может быть выражено либо в виде абсолютного количества людей на единицу картирования, либо в виде плотности населения. Очевидным источником такой информации являются результаты переписи. Однако для многих районов данные переписей населения бывают недоступными, устаревшими или ненадежными. Поэтому для моделирования распределения людей наряду с дистанционным зондированием и ГИС могут быть использованы и другие подходы в целях улучшения пространственного разрешения данных по населению на основе доступной ин-

формации (составление так называемых карт плотности [112]).

### Качество данных ►

Возникновение оползней определяется сложными взаимосвязями между факторами, некоторые из которых невозможно определить в деталях, а некоторые – лишь с большой степенью неопределенности. Важными аспектами в этом отношении являются в том числе погрешность, точность, неопределенность и прецизионность входных данных, а также объективность и воспроизводимость исходных карт (оценка эффективности карт оползневого районирования будет рассмотрена позже).

*Точность (accuracy) входных данных* относится к степени близости измеренных или отображенных на карте значений или классов карты к их фактическим (истинным) величинам или классам в полевых условиях. *Погрешность* определяется как разница между отображенным на карте значением или классом и истинной величиной. *Прецизионность (precision) измерений* – это степень близости друг к другу результатов повторных измерений при неизменных условиях. *Неопределенность* относится к степени, в которой фактические характеристики местности могут быть пространственно представлены на карте.

Погрешность на карте можно оценить только в том случае, если доступна другая карта или другая полевая информация, в которой нет погрешностей и которая может быть использована для верификации (например, в отношении высотных отметок). Источники таких неточностей в ЦМР были описаны в работах [96, 113]. Они могут быть связаны с возрастом данных, неполной плотностью наблюдений или пространственной выборки, ошибками обработки, такими как численные ошибки в компьютере, ошибки интерполяции или проблемы классификации и обобщения, а также с ошибками измерений, такими как погрешность позиционирования (в направлениях  $x$  и  $y$ ), ошибки при вводе данных или смещение наблюдателя.

Обзоры неопределенностей, связанных с ЦМР, приведены в работах [73, 114, 115].

Качество входных данных, используемых для анализа оползневых опасностей и рисков, связано со многими факторами, такими как масштаб анализа, время и деньги, выделенные на сбор данных, размер исследуемой территории, опыт исследователей, а также доступность и надежность существующих

карт. Кроме того, имеющиеся базы данных по оползням часто характеризуются несколькими недостатками [116, 117], связанными с их пространственной и (особенно) временной полнотой (или неполнотой), а также с тем, что их полнота смещена в сторону оползней, которые затронули инфраструктуру, такую как дороги.

## **ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ ТЕРРИТОРИЙ К ОПОЛЗНЯМ** ▶

Карта предрасположенности делит территорию на зоны с различной возможностью возникновения оползней определенного типа.

Оценка предрасположенности к оползням может рассматриваться как начальный шаг на пути к оценке оползневых опасностей и рисков. Но она сама по себе также может быть конечным продуктом, который можно использовать при планировании землепользования и при оценке воздействий на окружающую среду. Это особенно актуально при проведении мелкомасштабного анализа или в ситуациях, когда для оценки пространственной и временной вероятности возникновения оползней недостаточно информации о таких событиях в прошлом.

Карты предрасположенности содержат информацию о видах оползней, которые могут произойти, и о пространственной возможности их возникновения (о наиболее вероятных зонах их инициации на основе сочетания географических, топографических условий и вида почвенно-растительного покрова), а также о вероятном типе их развития (ретроградного развития вверх или перемещения вниз по склону). Возможность возникновения оползней может быть количественно отражена с помощью показателей плотности их распространения (их количества на 1 км<sup>2</sup> или затронутой ими площади на 1 км<sup>2</sup>).

Методы, используемые для анализа предрасположенности территорий к оползням, обычно основаны на двух допущениях. Первое заключается в том, что прошлые условия являются индикаторами будущих условий, то есть что зоны, в которых происходили оползни в прошлом, вероятно, столкнутся с ними и в будущем, поскольку в этих зонах сохраняются те же условия окружающей среды (например, топографические, геологические, грунтовые, геоморфологические, а также связанные с землепользованием). Второе допуще-

ние состоит в том, что участки местности, имеющие сходные условия окружающей среды (например, топографические, литологические, геоморфологические, инженерно-геологические, а также связанные с землепользованием) и пострадавшие от оползней в прошлом, вероятно, столкнутся с оползнями и в будущем. Такой подход подчеркивает необходимость сбора подробных данных по оползням до проведения какой-либо оценки предрасположенности территории к их возникновению.

С точки зрения визуализации карта предрасположенности должна включать:

- зоны с разными классами предрасположенности к инициации и перемещению оползней для конкретных типов последних (для большей ясности количество классов должно быть менее пяти);
- результаты инвентаризации прошлых оползней, которые позволят пользователям сравнить классы предрасположенности с реальными историческими оползневыми событиями;
- условные обозначения по классам предрасположенности, в том числе по ожидаемым показателям плотности распространения оползней.

Поскольку карты предрасположенности в первую очередь дают информацию по предлагаемому рейтингу участков местности с точки зрения пространственной вероятности возникновения оползней, они не содержат в явном виде данных по периодам повторяемости таких событий.

## **Оценка предрасположенности территорий к оползням** ▶

Обзоры доступных методов оценки предрасположенности территорий к оползням (рис. 2) можно найти в работах [1, 12, 35, 74–76, 118, 119]. Эти методы могут быть качественными (основанными на инвентаризации и знаниях) или количественными (основанными на данных и физически обоснованных моделях), как показано на рисунке 2. Они будут по отдельности описаны в статье позже. Следует подчеркнуть, что применение методов, основанных на инвентаризации, должно предшествовать использованию всех других методов, поскольку они дают наиболее важную исходную информацию и необходимы для проверки правильности (валидации) полученных карт. Эти методы и некоторые соответствующие ссылки приведены в таблице 4.

Есть разница между методами оценки предрасположенности к оползням для территорий, где ранее происходили

такие события, и для территорий, где могут произойти оползни, но ранее их не было. Следует отметить, что существует прямая связь между масштабом карты зонирования и сложностью метода оценки предрасположенности, причем более сложные методы применяются в более крупных масштабах из-за большего объема требуемых данных.

При использовании основанных на знаниях или эвристических методов карта предрасположенности может быть подготовлена непосредственно в полевых условиях специалистами по геоморфологии или же создана в камеральных условиях на основе геоморфологической карты. Этот метод является прямым, поскольку специалист интерпретирует предрасположенность местности к оползням непосредственно в полевых условиях, основываясь на наблюдаемых явлениях и геоморфологических/геологических условиях. При таком прямом методе используется ГИС – в качестве инструмента для создания окончательной карты без обширного моделирования.

Методы, основанные на знаниях, могут быть применены также и косвенно с помощью ГИС – путем объединения ряда карт факторов, которые считаются важными для возникновения оползней.

На основе своих экспертных знаний о прошлых случаях возникновения оползней и их причинных факторах для той или иной территории эксперт присваивает определенные веса определенным комбинациям факторов.

При использовании методов, основанных на знаниях, предрасположенность к оползням выражается в качественной форме. Однако далее в статье будут обсуждаться только количественные методы.

## **Методы оценки предрасположенности территорий к оползням на основе данных**

При использовании методов оценки предрасположенности территорий к оползням на основе данных статистически оцениваются комбинации факторов, которые вызывали оползни в прошлом, и делаются количественные прогнозы для районов с аналогичными геологическими, топографическими и почвенно-растительными условиями, в которых до настоящего времени оползни не происходили. Никакая информация об историчности элементов рельефа в отношении множественных оползневых событий не рассматривается. Результаты могут быть выражены через вероятность.

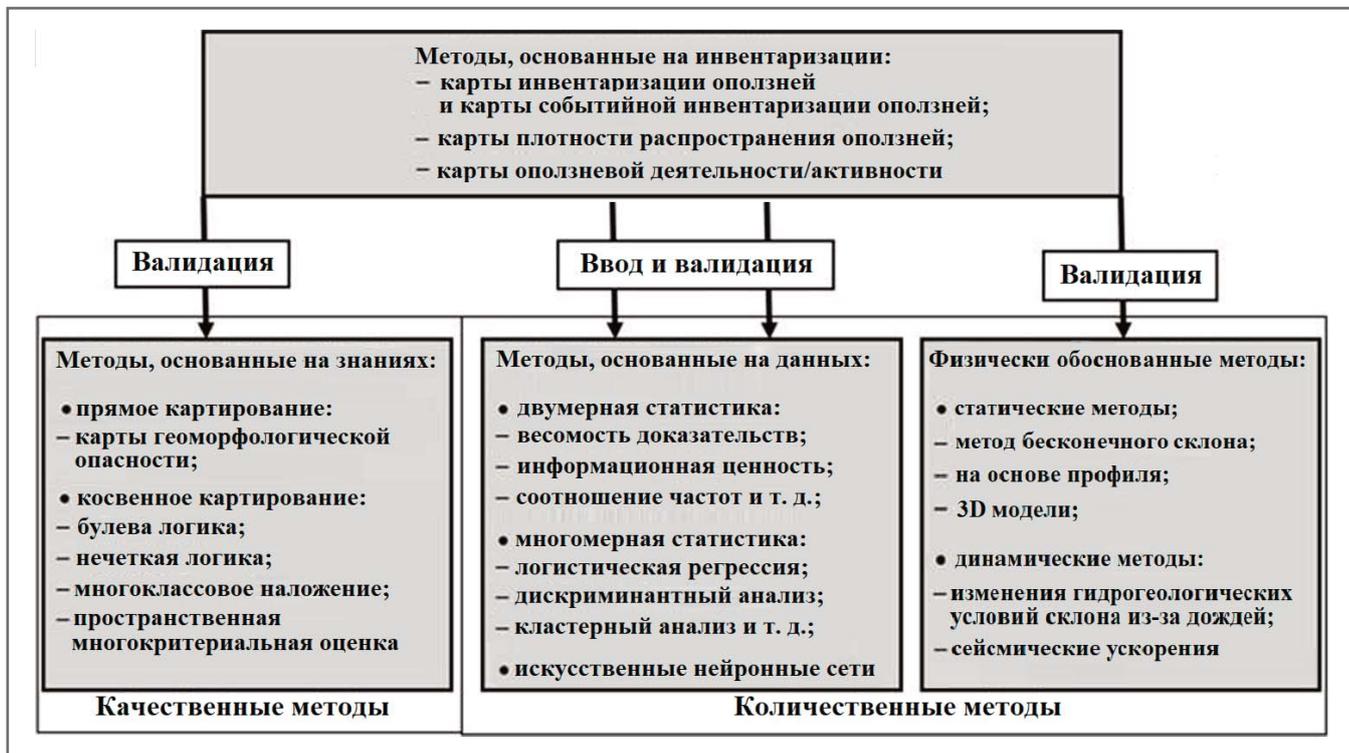


Рис. 2. Методы оценки предрасположенности территорий к оползням

Таблица 4. Рекомендуемые методы анализа предрасположенности территорий к оползням на основе инвентаризации

№	Подход	Ссылки
1	Карты распределения оползней на основе интерпретации изображений. Регистрация и описание оползней, произошедших в результате определенного инициирующего события, например ливня или землетрясения (так называемая событийная инвентаризация оползней), или многократного возникновения региональных оползневых событий (MORLE – multiple occurrence of regional landslide events)	[120, 121]
2	Карты оползневой деятельности/активности на основе интерпретации изображений, полученных в разное время	[106, 122]
3	Инвентаризация на основе исторических записей/регистраций	[123, 124]
4	Инвентаризация оползней на основе радиолокационной интерферометрии	[125, 126]
5	Представление инвентаризации оползней в виде информации о пространственной плотности их распределения	[127–129]

Эти методы называются основанными на данных, поскольку для получения информации об относительной важности карт факторов и их классов используются данные по прошлым оползням. Обычно применяют три основных подхода, основанных на данных: двумерный статистический анализ, многомерный статистический анализ и активный статистический анализ с использованием методов машинного обучения (таблица 5).

При использовании двумерных статистических методов карта каждого фактора объединяется с картой распределения оползней и для каждого класса параметров рассчитываются веса (весовые коэффициенты) на основе плотности распределения оползней. Для вычисления весовых коэффициентов может быть применено несколько статистических методов, таких как метод

ценности информации, моделирование весомости свидетельств, байесовские правила комбинирования свидетельств, использование показателей/коэффициентов достоверности, метод Демпстера – Шейфера (Dempster-Shafer) и нечеткая логика. Двумерные статистические методы являются хорошим инструментом обучения, который аналитик может использовать для определения того, какие факторы или их комбинации играют роль в инициировании оползней. Такой инструмент не учитывает взаимозависимость переменных, и он должен служить ориентиром при изучении набора данных перед использованием многомерных статистических методов.

Многомерные статистические модели оценивают совокупную взаимосвязь между зависимой переменной

(возникновением оползней) и рядом независимых переменных (факторами, влияющими на инициирование оползней). При этом типе анализа все релевантные факторы отбираются либо на основе расчетной сетки, либо на основе морфометрических показателей склонов. Для каждого из элементов выборки определяется наличие или отсутствие оползней. Затем полученная матрица анализируется с помощью множественной регрессии, логистической регрессии, дискриминантного анализа, метода случайного леса (random forest) или активного статистического анализа с использованием методов машинного обучения. Результаты могут быть выражены через вероятность.

На результаты использования методов оценки предрасположенности тер-

**Таблица 5. Рекомендуемые методы оценки предрасположенности территорий к оползням на основе данных**

Группа методов	Метод	Ссылки
Двумерные статистические методы	Модель отношений правдоподобия (likelihood ratio model, LRM)	[130]
	Метод ценности информации (information value method)	[131]
	Моделирование весомости свидетельств (weights of evidence modelling)	[132–134]
	Функции благоприятности (favourability functions)	[135, 136]
Многомерные статистические методы	Дискриминантный анализ (discriminant analysis)	[137, 138]
	Логистическая регрессия (logistic regression)	[139, 140]
ИНС	Искусственные нейронные сети (artificial neural networks, ANN)	[141–143]

**Таблица 6. Примеры физически обоснованных методов оценки предрасположенности территорий к оползням (мест разрушений склонов)**

Тип методов	Метод	Ссылки
Методы предельного равновесия на основе ГИС	Статическое моделирование бесконечного склона	[87, 144]
	Динамическое моделирование бесконечного склона с выпадением атмосферных осадков в качестве триггера	[90, 145–147]
	Моделирование бесконечного склона с землетрясением в качестве триггера (например, модель Ньюмарка (Newmark))	[148, 149]
Кинематический анализ кальных склонов	Анализ разрывов сплошности с использованием стереосетей и ГИС	[150]
Двумерный анализ методом предельного равновесия	Метод предельного равновесия в 2D постановке с анализом потоков грунтовых вод и напряжений	[151]
Трехмерный анализ методом предельного равновесия	3D анализ устойчивости склона	[152, 153]
Численное моделирование	Континуальное моделирование (моделирование движения сплошной по строению среды)	[154, 155]
	Дискретное моделирование (моделирование движения дискретной по строению среды), например методом отдельных элементов, методом дискретных элементов	[155, 156]

риторий к оползням на основе данных могут влиять следующие недостатки:

1) общее допущение того, что оползни происходят из-за воздействия одной и той же комбинации факторов по всей исследуемой территории;

2) игнорирование того, что на возникновение определенных типов оползней влияют определенные причинные факторы, которые следовало бы проанализировать/исследовать индивидуально;

3) степени влияния со стороны некоторых пространственных факторов могут широко варьировать в районах со сложными геологическими и структурными условиями;

4) отсутствие подходящего экспертного заключения по различным типам оползней, процессам и причинным факторам.

Эти методы стали стандартными при оценке предрасположенности территорий к оползням в региональном масштабе.

#### **Физически обоснованные методы оценки предрасположенности территорий к оползням**

Физически обоснованные методы оценки предрасположенности к оползням базируются на моделировании процессов разрушения склонов. На больших территориях эти методы применимы только при достаточно однородных геологических и геоморфологических условиях и простых типах оползней (таблица 6).

В большинстве физически обоснованных моделей, применяемых в локальном масштабе, используется модель бесконечного склона/откоса, поэтому они применимы только для анализа неглубоких оползней (с глубиной подошвы менее нескольких метров). В них учитываются различные триггеры, такие как сейсмическое воздействие или нестационарный режим грунтовых вод в результате выпадения атмосферных осадков. Динамические модели позво-

ляют делать прогнозы с помощью применения правил, основанных на причинно-следственных связях, для имитации временных изменений в ландшафтах. В динамической модели предрасположенности учитываются пространственные и временные вариации при инициировании оползней.

Физически обоснованные модели применимы даже к районам с неполной инвентаризацией оползней. Параметры, используемые в таких моделях, чаще всего измеримы и считаются переменными состояниями, которые имеют уникальное значение в заданной точке времени и пространства.

Большинство физически обоснованных моделей по своей природе являются динамическими. Это подразумевает, что они работают во времени вперед или назад, постоянно вычисляя значения переменных состояний на основе включенных уравнений. При реализации в пространственной систе-

**Таблица 7. Рекомендуются количественные методы анализа предрасположенности территорий к оползням в разных масштабах**

Масштабы	Количественные методы	
	Статистические на основе данных	Детерминистические физически обоснованные
Национальные (<1:250 000)	Нет	Нет
Региональные (1:25 000–1:250 000)	Да	Нет
Локальные (1:5 000–1:25 000)	Да	Да
Детальные, т.е. специфичные для конкретных участков (>1:5 000)	Нет	Да

ме координат (с использованием ГИС) такие модели также способны вычислять изменения значений с течением времени для каждой единицы анализа (пикселя).

Результаты использования таких моделей более конкретны и последовательны, чем результаты эвристических и статистических моделей, с учетом подхода «белый ящик» к описанию лежащих в основе физических процессов, которые приводят к моделируемым явлениям. Они обладают более высокой прогностической способностью и являются наиболее подходящими для количественной оценки влияния отдельных параметров, которые способствуют возникновению неглубоких оползней. Однако параметризация этих моделей может оказаться сложной задачей из-за трудностей с получением доступа к критическим параметрам, таким как мощность дисперсных грунтов, либо при моделировании нестационарных гидрогеологических процессов в массивах склонов, таких как потоки через макропоры и изменения гидравлических свойств во времени.

Преимущество этих моделей заключается в том, что они основаны на моделях устойчивости склона, позволяющих количественно рассчитать его стабильность (то есть определить коэффициенты устойчивости или вероятность разрушения).

Основные недостатки данного метода – степень его упрощения и необходимость в больших объемах надежных входных данных.

#### **Выбор наиболее подходящего метода анализа**

При оценке предрасположенности территорий к оползням существует четкая связь между масштабом анализа и типом метода, который может быть использован, что в основном связано с возможностью получения требуемых исходных данных (таблица 7).

При выборе наиболее подходящего метода следует учитывать несколько аспектов.

1. Выбор должен соответствовать имеющимся данным и масштабу анализа. Например, не рекомендуется использовать подход с физически обоснованным моделированием для анализа в небольших масштабах, если недостаточно геотехнических данных и данных по мощности дисперсных грунтов, поскольку это приведет либо к значительному упрощению результирующей карты опасностей и рисков, либо к бесконечному сбору информации.

2. Следует избегать использования данных, масштаб или детализация которых не соответствуют выбранному методу оценки опасности.

3. Разные типы оползней контролируются разными комбинациями факторов окружающей среды и триггеров, и это должно быть отражено при анализе. Инвентаризацию оползней следует разделить (по возможности) на несколько подгрупп, каждая из которых относится к определенному механизму разрушения и связана с определенной комбинацией причинных факторов.

4. Следует избегать использования карт факторов, которые не относятся к периоду возникновения оползня. Например, для того чтобы иметь возможность соотнести такое событие с изменениями в землепользовании и/или почвенно-растительном покрове, важно отобразить ситуацию, которая существовала тогда, когда произошел оползень, а не условия, которые сложились после его схода.

5. И наконец, многие оценки предрасположенности основываются на допущении того, что «прошлое является ключом к будущему» и что исторические оползни и связанные с ними причинно-следственные связи могут быть использованы для прогнозирования будущих таких событий. Однако можно было бы также провести аналогию с инвестиционным рынком, заявив, что «ре-

зультаты, полученные в прошлом, не являются гарантией на будущее». Несмотря на то что в прошлом при определенных условиях могли происходить оползни, условия меняются, поэтому актуальные карты предрасположенности создаются с учетом текущих ситуаций. Когда происходят изменения в причинных факторах (например, если дорога имеет крутые откосы в местах подрезок склона, который до ее строительства считался малоопасным, или если годовое количество атмосферных осадков либо их распределение по месяцам значительно меняется из-за изменений климата), необходимо адаптировать к этому информацию о предрасположенности территории к оползням.

#### **Дальность перемещения оползней**

В этом разделе описываются доступные методы оценки дальности перемещения (максимального расстояния, пройденного оползневыми массами) для различных типов оползней в количественном выражении и их применимость к разным масштабам работ.

Оценка дальности перемещения оползней редко выполняется для карт регионального или более мелкого масштаба (из-за низкого разрешения соответствующего анализа), за исключением очень крупных событий [157]. Величина (например, объем), механизм распространения и характеристики траектории оползня являются основными факторами, влияющими на дальность его перемещения. Методы определения последней можно разделить на эмпирические и рациональные [158]. И те, и другие широко используются, поскольку могут быть интегрированы в ГИС-платформы.

#### **ЭМПИРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**

Эмпирические методы базируются на полевых наблюдениях и на анализе взаимосвязи между морфометрическими параметрами оползня (например,

Таблица 8. Эмпирические методы оценки дальности перемещения оползней

№	Группа методов	Метод, действия	Ссылки
1	Геоморфологические	Картирование старых и недавних оползневых отложений с помощью аэрофотоснимков, спутниковых изображений и/или наземной съемки. Оценка пределов перемещения (наибольшего вероятного расстояния, пройденного каждым типом оползня)	[159]
2	Геометрические	Использование эмпирических методов, основанных на угле дальности перемещения (пояснение см. в тексте. – <i>Ред.</i> ), угле тени (пояснение см. в тексте. – <i>Ред.</i> ) или среднем наклоне траектории оползня, для оценки дальности его перемещения	[160–164]
		Использование эмпирических методов, основанных на угле дальности перемещения (пояснение см. в тексте. – <i>Ред.</i> ) или угле тени (пояснение см. в тексте. – <i>Ред.</i> ), для оценки дальности перемещения с учетом неопределенности (вероятности достижения)	[165]
		Оконтуривание участков долин, охваченных лахарами или обломочными потоками, на основе статистического анализа (соотношений «объем – площадь») предыдущих траекторий	[166–169]
3	Изменений объема	Расчет дальности перемещения оползня путем установления баланса между объемами вовлеченного и отложенного материала	[170]

объемом), характеристиками его траектории (например, местной морфологией, наличием препятствий) и пройденным им расстоянием.

В основе эмпирических подходов лежат упрощающие допущения, поэтому их применимость для количественного анализа может быть ограниченной.

Методы прогнозирования дальности перемещения оползней можно разделить на геоморфологические, геометрические и изменений объема. Их неполный список представлен в таблице 8. Неопределенности, связанные с источниками, размерами и подвижностью будущих оползней, не позволяют точно определять расположение границ опасных зон.

### 1. Геоморфологические свидетельства ►

Картирование оползневых отложений позволяет непосредственно измерять расстояния, пройденные оползнями в прошлом.

Размеры как древних, так и недавних оползневых отложений используются для определения дальности перемещений будущих оползней.

Геоморфологический анализ может использоваться для того, чтобы определить: самые большие расстояния, пройденные предыдущими оползнями; была ли проведена инвентаризация достаточного количества оползней; достаточно ли статистических данных по дальности перемещений и по связанным с ними вероятностям.

Полная идентификация отложений исторических оползней не всегда возможна. Старые отложения могли быть погребены под новыми, удалены в ре-

зультате эрозии (либо полностью, либо частично) или замаскированы особенностями аккумулятивных форм, образовавшихся в результате других процессов.

Геоморфологический подход годится для анализа оползней крупных масштабов и низкой частоты, отложения которых из-за аномально больших размеров могут сохраняться в течение длительного времени и могут помочь в определении возможных максимальных дальностей перемещений для будущих подобных событий. Однако неопределенности, связанные с источниками, размерами и мобильностью будущих таких оползней, мешают точному определению границ опасных зон. Кроме того, геометрия склона может измениться и полный набор причинных обстоятельств, связанных с прошлыми оползнями, может уже отсутствовать. Поэтому результаты, полученные на данном участке, не могут быть экстраполированы для других мест.

### 2. Геометрические подходы ►

Оценка дальности перемещения может быть проведена путем анализа геометрических соотношений между параметрами оползня и пройденным им расстоянием [171]. Наиболее часто используемыми показателями являются *угол дальности перемещения* (reach angle, angle of reach, travel distance angle) [172] и *угол тени* (shadow angle) [173].

*Угол дальности перемещения*  $\alpha$  – это угол наклона линии, соединяющей самую высокую точку оползня с его самым дальним фронтальным краем (многие авторы в определении этого угла говорят о линии, соединяющей бровку срыва с самым дальним фронтальным краем.

Скорее всего, это более точно. – *Ред.*). Эмпирические наблюдения показывают зависимость угла  $\alpha$  от объема оползня  $V$ . График зависимости тангенса угла  $\alpha$  (отношения между перепадом высот по вертикали  $H$  и горизонтальной составляющей дальности перемещения  $L$ ) от объема  $V$  показывает, что у крупных оползней углы дальности перемещения меньше, чем у мелких [174]. Эта зависимость может быть выражена в виде следующего уравнения регрессии:

$$\lg(\operatorname{tg} \alpha) = A + B \lg V, \quad (2)$$

где  $A, B$  – константы.

Максимальное расстояние, пройденное оползнем, также можно получить графически, учитывая связь между углом дальности перемещения и потенциальным объемом оползня, для чего можно провести соответствующую линию от источника. Пересечение с топографической поверхностью даст как  $H$ , так и  $L$  [160, 175, 176].

*Тень камняпада* – это область за краем осыпного склона, куда могут попасть падающие камни, подпрыгивая и перекачиваясь. Авторы работ [173, 177] использовали концепцию *угла тени*  $\beta$  для определения максимального расстояния от источника до самого дальнего из упавших камней. Он определяется как угол наклона линии, соединяющей верх осыпного склона с обломком, достигшим самой дальней точки. Подножие осыпного склона используется в качестве контрольной границы, от которой определяется расстояние до отдельных упавших камней в зоне тени.

Для обломочных потоков были разработаны эмпирические методы прогнози-

Таблица 9. Рациональные методы оценки дальности перемещения оползней

Тип моделей	Метод, подход, модель	Типы оползневых явлений, к которым применимы модели	Ссылки
Дискретные модели	Метод сосредоточенной массы	Камнепады	[192, 193]
	Гибридный метод / метод твердого тела	Камнепады	[188, 190]
	Метод дискретных элементов	Каменные лавины	[191]
Континуальные (непрерывные) модели	Модели бесконечных оползней и модель скольжения-консолидации	Каменные лавины, обломочные потоки, грязевые потоки, лахары, оползни-потоки	[194]
	Модели многоблочных оползней (термомеханические)	Быстро движущиеся оползни	[195, 196]
	Модели, интегрированные по глубине	Каменные лавины, обломочные потоки, грязевые потоки, лахары, оползни-потоки	[197–200]
	3D модели	Каменные лавины, обломочные потоки, грязевые потоки, лахары, оползни-потоки	[201, 202]

рования проходимых ими расстояний и охваченных ими зон в конусах выноса. Для оценки полной дальности перемещения использовались объем, высотные отметки и наклон русла [168, 178] или их определяли на основе среднего наклона русла [164]. Рассматривались критерии баланса объема, которые определяют площадь поперечного сечения и площадь покрытия в плане [167, 169, 179].

Эти эмпирические методы могут использоваться в ГИС для проведения локального и детального (сайт-специфического) анализа [169, 180, 181]. Применение огибающих для наиболее экстремальных событий является консервативным, но возможным, поскольку оно основано на наблюдавшихся случаях. Это представляется целесообразным для предварительных исследований по оценке дальности перемещения. При наличии достаточного количества данных можно смоделировать неопределенность дальности перемещения, проследив линии, соответствующие различным процентилем (99, 95, 90% и т.д.) пространственной вероятности [176]. Такие подходы могут быть применены к картам предрасположенности территорий к оползням и оползневой опасности локальных масштабов, но, поскольку они не содержат кинематических параметров (таких как скорость, кинетическая энергия), они на самом деле не подходят для использования при детальном (сайт-специфическом) анализе.

### 3. Метод изменений объема ►

Метод изменений объема [170] позволяет оценить потенциальную даль-

ность перемещения обломочного потока путем установления баланса между объемами вовлеченных в движение и отложенных масс. Траектория потока делится на однородные в геометрическом плане участки (reaches – это английское слово было использовано авторами по аналогии с участками между двумя поворотами реки. – *Ред.*), для каждого из которых измеряются длина, ширина и наклон. В модели учитываются стесненные (confined), не стесненные (unconfined) бортами долины и промежуточные (transitional) участки и определяются условия, при которых материал из потока не осаждается на стесненных участках и не увлекается потоком на промежуточных. С использованием исходного объема и геометрии последовательных участков в качестве входных данных в модели устанавливается усредненная формула изменений объема путем деления объема перемещаемого материала на длину отложений потока. Затем начальный мобилизованный объем постепенно уменьшается по мере движения потока вниз по склону до тех пор, пока движение не прекратится (то есть пока объем активно движущегося обломочного материала не станет незначительным). Результаты показывают вероятность превышения пройденного расстояния, которое сравнивается с дальностями перемещения для двух наблюдавшихся событий.

### РАЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ►

Рациональные методы основываются на использовании аналитических или численных моделей различной степени

сложности. Их можно подразделить на использование дискретных и континуальных моделей.

### 1. Дискретные модели ►

Дискретные модели используются в тех случаях, когда важна степень гранулированности оползня.

Если материал по своей структуре является гранулированным, то отдельные частицы можно представить как отдельные дискретные элементы. Простейшим случаем является падение блока вниз по склону. Его геометрию можно либо смоделировать с точностью, либо аппроксимировать в виде более простой формы. Модель проверяет наличие ударов о базальную поверхность, применяя подходящий коэффициент restitution, то есть коэффициент восстановления энергии при ударе (coefficient of restitution – коэффициент, который соответствует отношению конечной энергии к начальной после столкновения двух объектов. – *Ред.*). Этот подход используется для моделирования камнепадов с использованием либо метода сосредоточенной массы (lumped) [182–185], либо гибридного (hybrid) метода [186–188], либо метода твердого тела (rigid body) [189, 190].

С другой стороны, для моделирования каменных лавин использовался метод дискретных элементов (discrete-element-based). Каменная лавина приближенно представляется в виде набора частиц простых геометрических форм (сфер, дисков), а для описания контактных усилий используются специальные законы. Количество материальных па-

раметров, как правило, невелико (трение, начальное сцепление, упругие свойства контакта). Во многих случаях невыполнимо воспроизвести все блоки лавины, поэтому она упрощенно представляется в виде набора меньшего числа блоков. Сферы (3D) или диски (2D) могут объединяться для генерации более сложных форм, и могут быть получены различные гранулометрические составы. Главным преимуществом этих методов является их способность воспроизводить эффекты (например, обратную сегрегацию), которые далеко выходят за рамки возможностей континуальных моделей [191].

Дискретно-элементные модели подходят для моделирования каменных лавин, но их использование не рекомендуется в других ситуациях, например для оползней-потоков, лахаров, грязевых потоков и т.д., из-за сложной реологии текущего материала.

## 2. Континуальные модели ►

Континуальные (непрерывные) модели основываются на механике движения сплошной среды и могут включать связь механического поведения с гидравликой и термомеханикой. Здесь рассматриваются четыре следующие группы (таблица 9).

*3D-модели, основанные на теории смесей* (которая используется для моделирования многофазных систем с использованием принципов механики нескольких взаимопроникающих сплошных сред, многофазных течений. – *Ред.*). Модели этой наиболее сложной категории включают все фазы, присутствующие в текущем материале, в виде твердых частиц, жидкости и газа. Относительные перемещения здесь могут быть значительными, и эта группа моделей может быть применена к самому общему случаю. Из-за большого количества неизвестных и уравнений, используемых в таких моделях, они применялись только при рассмотрении смесей, что является правильным подходом для грязевых потоков и каменных лавин. Поскольку геометрия здесь является довольно сложной, аналитического решения нет и необходимо дискретизировать уравнения, используя подходящую численную модель. Модели этой категории очень дороги с точки зрения вычислительного времени, но их необходимо использовать в ситуациях, когда важны 3D эффекты, например в случаях создаваемых оползнями волн или воздействий текущего материала на здания и сооружения [202]. Такие мо-

дели могут быть применены ко всем типам движения, за исключением тех, на которые оказывает большое влияние гранулометрия смеси.

*Модели зависимости «скорость – давление»* (Бюо – Зенкевича, *Biot-Zienkiewicz*). Во многих случаях можно принять, что движение поровых флюидов относительно скелета грунта внутри его частиц невелико. Тогда модель может быть построена с учетом скорости движения твердых частиц и давлений флюидов между ними. Это классический подход, используемый в геотехнике [201]. Он может быть применен к каменным лавинам и обломочным потокам. Получаемая модель является трехмерной, и для решения требуются большие вычислительные усилия [203]. Одним из важных моментов является то, что могут быть полностью описаны давления флюидов между частицами.

*Модели, интегрированные по глубине*. Учитывая геометрию большинства быстро движущихся оползней, можно использовать интегральную аппроксимацию по глубине. Этот метод использовался в гидравлической и береговой инженерии для описания течений в каналах, длинных волн, приливов и т.д. В отношении анализа оползневых процессов он был представлен в работе [197] и с тех пор широко используется инженерами и специалистами по наукам о Земле. Также возможно включить информацию о базальном поровом давлении (например, [199, 200]).

Важно отметить следующее: даже если результаты, полученные с помощью этих моделей, можно изобразить в 3D виде, создав впечатление, что это полноценное трехмерное моделирование, такие модели все же являются двумерными. Кроме того, давления и силы, действующие на сооружения, являются гидростатическими. Поэтому, если требуется такая информация, необходимо связать 2D модель, интегрированную по глубине, с полной 3D моделью в непосредственной близости от препятствия.

Модели, интегрированные по глубине, представляют собой отличный компромисс между желаемыми компьютерным временем и точностью. Они использовались для описания каменных лавин, лахаров, грязевых потоков, обломочных потоков и оползней-потоков [152, 192, 197, 198, 201, 202, 204, 205].

*Модели, интегрированные по глубине, могут быть еще больше упрощены*, например в случае подхода «бесконечные оползни». Действительно, при блочном анализе, выполняемом во многих слу-

чаях, рассматривается непрерывный ряд бесконечных оползней, развивающихся на изменяющемся рельефе. В такие модели может быть включено рассеивание порового давления (например, [194]).

## ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ►

Оценка оползневой опасности направлена на определение пространственной и временной вероятности возникновения оползней в интересующей области, а также способа их распространения, размера и интенсивности. Полный анализ должен учитывать все возможные механизмы разрушения склонов, реактивизацию спящих и ускорение движения активных оползней.

Хорошо известное определение оползневой опасности относится к вероятности возникновения оползня заданной величины [206]. Величина – это мера размера оползня, которая обычно выражается либо через площадь, либо через объем. Однако величина оползня не является подходящим дескриптором опасности. Хотя и можно ожидать, что чем больше оползень, тем выше потенциальный ущерб, это не всегда так. Крупный оползень объемом в сотни миллионов кубических метров, ползущий со скоростью всего несколько миллиметров в год, нанесет лишь очень небольшой ущерб зданиям или другим объектам инфраструктуры и будет представлять незначительную угрозу для людей. Напротив, камнепад объемом в несколько сотен кубических метров, движущийся со скоростью в десятки метров в секунду, способен нанести значительный ущерб зданиям и сооружениям и привести к человеческим жертвам.

Разрушительность оползней лучше всего определяется через их интенсивность [207]. Интенсивность выражается по-разному в зависимости от механизма распространения. Для оползней, которые оказывают локальные воздействия (таких как камнепады), можно использовать скорость в сочетании с объемом или кинетической энергией. Для медленно движущихся оползней применяют дифференциальное смещение или полное смещение (которое может привести к повреждению или смещению конструктивных элементов). Для характеристики интенсивности движения обломочного материала, подобного потоку, могут быть использованы толщина, максимальный расход материала на единицу ширины или давление при ударе.

Оценить интенсивность оползня не просто, поскольку она не является его

неотъемлемой характеристикой. Она изменяется вдоль траектории и должна быть либо измерена, либо рассчитана с использованием динамических моделей, в которых в качестве входного параметра берется объем оползня. Для территорий, затронутых медленно движущимися оползнями, в качестве показателя интенсивности использовалась их величина [208]. Хотя концептуально это и не является правильным, но может быть практическим способом выбора между различными вариантами планирования землепользования.

Независимо от масштаба работ, оценка опасности должна определять временные рамки возникновения оползней всех потенциальных типов и их интенсивность в любом рассматриваемом месте. Это наиболее сложная часть оценки, поскольку:

1) разные типы оползней могут происходить в течение разных периодов времени;

2) интересующий район может подвергнуться воздействию оползней, возникших в разных по расположению зонах зарождения;

3) частота оползней, наблюдаемая в любой рассматриваемой местности или на любом участке, будет меняться с расстоянием от зоны зарождения.

Более подробно эти вопросы будут рассмотрены позже.

### Время возникновения оползней ▶

Время возникновения оползней обычно выражается через частоту, период повторяемости или вероятность превышения (exceedance probability).

Частота представляет собой количество событий за определенный промежуток времени (например, за год для годовой частоты). Ее можно легко оценить на основе эмпирических данных.

Период повторяемости – это величина, обратная годовой вероятности. Он относится к среднему интервалу времени, в течение которого ожидается событие определенной величины.

Вероятность превышения можно рассматривать как вероятность того, что одно или несколько событий произойдут в определенный период независимо от их величины [209]. Или же, если учитывать величину, ее можно рассматривать как вероятность того, что оползень размером, равным или превышающим определенное значение, произойдет в течение определенного периода. Вероятность превышения предпочтительна в качестве пока-

зателя возможного времени возникновения оползней для количественного вероятностного анализа опасности. Она может быть получена на основе частоты (или периода повторяемости) с использованием соответствующей вероятностной модели (биномиальной модели или модели Пуассона) [209] или с применением степенного распределения [210].

Частота оползней может быть абсолютной или относительной [43]. Абсолютная частота выражает количество наблюдаемых событий в территориальной единице (например, на склоне, конусе выноса, водоразделе и т.д.). Она может включать либо повторяющиеся первые разрушения склона, либо случаи реактивизации спящих оползней, либо эпизоды ускорения активных оползней (всплесков оползневой активности). Типичные оползневые события, которые рассматриваются как повторяющиеся, – это камнепады и обломочные потоки.

Относительная частота – это нормализованная частота. Обычно она выражается как отношение числа наблюдаемых оползней к единице площади (то есть как количество оползней на квадратный километр в год) или длины. Относительная частота уместна при работе с большими территориями и/или с небольшими масштабами карт, особенно при многократном возникновении региональных оползневых событий (MORLE – multiple occurrence of regional landslide events) [121]. Карты масштабов менее 1:25 000 не могут эффективно отражать частоту возникновения небольших оползней (до нескольких тысяч кубических метров), поскольку они слишком малы для того, чтобы данные о них можно было наносить на карту и обрабатывать по отдельности.

Теперь опишем подходы, традиционно применяемые для оценки вероятности возникновения оползней.

### Эвристические методы (оценочный подход)

Эвристические методы основаны на экспертных оценках группы специалистов, мнения которых могут быть количественно оценены путем присвоения вероятностей.

Одним из способов систематизации эвристических оценок является использование деревьев событий. Анализ с помощью такого дерева – это графическое представление всех событий, которые могут произойти в системе. Используя логическую модель, можно

определить и количественно оценить вероятности возможных последствий исходного события. По мере увеличения числа возможных последствий это изображение разрастается подобно ветвям дерева [211]. Чтобы количественно оценить вероятности различных альтернатив, необходимо определить вероятности узлов ветвления. Вероятность того, что тот или иной путь по дереву приведет к определенному последствию, такому как разрушение склона, является просто произведением соответствующих вероятностей узлов ветвления [27, 212, 213].

### Рациональные методы (геомеханический подход)

Вероятность разрушения склона может быть определена с помощью анализа его устойчивости и численного моделирования. Важно отметить, что результаты этих методов могут быть реализованы на ГИС-платформах и используются для подготовки карт, показывающих потенциальные вероятности возникновения оползней в зонах их зарождения на склонах. Однако эти результаты не предназначены для изображения путей движения оползней или зон их отложений.

Геомеханический подход предполагает, что разрушение склона зависит от пространства, времени и напряжений в грунте. Он позволяет рассчитать коэффициент устойчивости или вероятность разрушения склона. Принимается, что последняя представляет собой вероятность того, что коэффициент устойчивости будет меньше единицы. Для оценки этой вероятности было разработано несколько методов, таких как метод второго момента первого порядка (FOSM – First Order Second Moment), методы точечных оценок и моделирование методом Монте-Карло [214–216]. В них учитываются неопределенности во входных параметрах. Чтобы определить вероятность возникновения оползня, необходимо четко связать анализ устойчивости склона с триггерным фактором с помощью известной вероятности.

Устойчивость склона можно связать с гидрогеологическими моделями для моделирования влияния дождей на стабильность грунтов. Для отдельных оползней местного или регионального масштаба могут применяться динамические гидрогеологические 2D модели (моделирующие неустановившееся движение подземных вод) либо 3D конечноэлементные или конечноразностные модели [217–220]. Для неглубоких

оползней можно провести анализ в региональном масштабе, используя упрощенные гидрогеологические методы, которые могут быть реализованы в рамках ГИС-анализа пространственного распределения [85, 102, 144, 221–223].

### Эмпирическая вероятность

Вероятностные модели могут быть разработаны на основе наблюдаемой частоты прошлых оползневых событий. Этот подход реализуется сходно с гидрогеологическим анализом и позволяет получить годовые вероятности возникновения оползней. В этом случае оползни считаются повторяющимися событиями, которые происходят случайным образом и независимо. Эти допущения не полностью справедливы, в частности в том, что эти события являются независимыми и что внешние (например, климатические) условия являются статичными. Однако такие допущения можно принять в качестве подхода первого порядка – и довольно часто анализ частот является единственным возможным методом оценки временной вероятности возникновения оползней.

Для получения вероятности схода оползня обычно используют биномиальное распределение или распределение Пуассона [209]. Биномиальное распределение может быть применено в случаях, когда рассматриваются дискретные интервалы времени и за каждый интервал (обычно за год) выполняется только одно наблюдение, как это обычно бывает при анализе частоты наводнений. Годовая вероятность оползневых событий заданной величины, которое происходит в среднем один раз в  $T$  лет, определяется так:

$$P(N = 1; t = 1) = \frac{1}{T} = \lambda, \quad (3)$$

где  $T$  – период повторяемости события;  $\lambda$  – ожидаемая частота будущих событий.

Распределение Пуассона получается как предельный случай биномиального распределения, когда приращения времени очень малы (стремятся к нулю). Поэтому его можно считать распределением с практически непрерывным временем. Годовая вероятность возникновения оползней  $n$  по пуассоновской модели определяется в соответствии с формулой:

$$P(N = n; t = 1) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – ожидаемая частота будущих оползней.

С другой стороны, вероятность возникновения одного или нескольких оползней за  $t$  лет:

$$P(N \geq 1; t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

что в значительной степени зависит от величины оползня.

Следовательно, для количественной оценки оползневой опасности необходимо установить зависимости между величиной и частотой (выполнить анализ повторяемости «величина – частота»). Необходимо учитывать, что разные типы оползней происходят с разной периодичностью. Если одно и то же место потенциально подвержено воздействию различных типов оползней из разных источников, то вероятность оползневых событий там будет больше и необходимо рассчитать их совокупную частоту.

### Непрямые (косвенные) подходы

В последние десятилетия стало вызывать большой интерес определение пороговых количеств осадков и сейсмических воздействий, вызывающих оползни. Если построить характерные для того или иного региона кривые «интенсивность – продолжительность» для атмосферных осадков и сопоставить их с наблюдаемыми оползневыми событиями, то можно определить соотношения интенсивности и длительности дождей, вызывающие неглубокие оползни и обломочные потоки [224, 225].

После определения критического количества осадков (или сейсмического воздействия) принимается, что период повторяемости оползней равен периоду повторяемости критического триггера. Такие типы зависимостей дают оценку того, как часто на исследуемой территории происходят оползни, но не того, какие склоны разрушатся, и не того, какими будут размеры разрушений. В этом случае вероятность дождей, вызывающих оползни, позволяет рассчитать относительную частоту оползневых событий (то есть количество оползней на квадратный километр в год), что полезно для регионального анализа по оползням сходных размеров [122].

Региональные события, вызывающие оползни, могут сосуществовать с другими региональными (например, с таянием снега) или локальными (например, с речной эрозией) триггерами. В этом случае период повторяемости, полученный на основе регионального триггера, является лишь минимальной оценкой частоты оползневых событий.

### Зависимости между величиной и частотой оползней

Основой количественной оценки оползневой опасности является зависимость между величиной и частотой оползней.

Без обоснованной оценки вероятности возникновения оползней, выраженной в терминах ожидаемой годовой частоты оползневых событий заданной величины или превышающих пороговую величину, количественная оценка оползневой опасности невыполнима. В этом случае проблема может быть решена только в терминах предрасположенности участков к возникновению оползней (например, с определением пространственной вероятности [226]).

Определенные зависимости «величина – частота» наблюдались для разных опасных природных событий (например, для землетрясений, наводнений). Первая хорошо установленная зависимость «величина – частота» была предложена в сейсмологии – для связи между магнитудой землетрясения и совокупной частотой (общим числом землетрясений для заданного региона и определенного промежутка времени) по закону Гутенберга – Рихтера:

$$\lg N(m) = a - bM, \quad (6)$$

где  $N(m)$  – совокупное число землетрясений с магнитудой  $m$ , равной или большей, чем  $M$ ;  $a$ ,  $b$  – константы.

Функция плотности вероятности в соответствии с уравнением (6) может быть рассчитана как производная соответствующей совокупной функции плотности. Н при моделировании землетрясений используются ограниченные версии зависимости Гутенберга – Рихтера, которые учитывают нижний предел для магнитуды землетрясения, а также ожидаемый верхний предел [227].

Ранее проводившиеся исследования [228, 229] показали, что зависимость между величиной и совокупной частотой оползневых событий не зависит от масштаба и что для широкого диапазона величин оползней эта зависимость следует степенному закону, который формально эквивалентен уравнению Гутенберга – Рихтера:

$$N_{CL} = CA_L^{-\alpha}, \quad (7)$$

где  $N_{CL}$  – совокупное количество оползней величиной, равной или большей, чем  $A$ ;  $A_L$  – величина оползня (обычно выражаемая в виде его объема или площади);  $C$ ,  $\alpha$  – константы.

**Таблица 10. Действия, которые надо выполнить для получения пространственно не приуроченных зависимостей «величина – частота» для оползней**

Подходы, источники данных		Ссылки
Возникновение событий (триггеров), вызывающих множественные оползни	Плотность распределения оползней зависит от интенсивности ливня-триггера	[122]
	Плотность распределения оползней (величина) зависит от интенсивности землетрясения-триггера	[106]
	Фактор, связанный с безопасностью, зависит от количества осадков или пьезометрического уровня	[237]
Совокупное количество оползней за известные промежутки времени	Анализ зарегистрированных сведений по оползням и архивов исторических данных	[124]
	Идентификация и инвентаризация оползней по аэрофотоснимкам или спутниковым изображениям	[234, 238]
	Получение информации об оползнях путем датирования оползневых отложений и полевых работ	[239–241]
	Получение информации об оползнях с использованием косвенных данных от «молчаливых свидетелей» (например, по повреждениям деревьев)	[242]

**Таблица 11. Действия, которые надо выполнить для получения пространственно приуроченных зависимостей «величина – частота» для оползней**

Подходы, источники данных		Ссылки
Зоны зарождения оползней	Информация о случаях реактивизации оползней, полученная путем датирования соответствующих признаков	[243]
	Размеры стенок срыва оползней	[229]
	Вероятностный анализ темпов отступления стенок срыва оползней	[244]
Контрольный участок линейного объекта или место расположения	Базы данных об инцидентах, связанных с обслуживанием автомобильных и железных дорог	[234, 245, 246]
	Пространственная вероятность возникновения оползней в сочетании с ожидаемой вероятностью их возникновения на каждом склоне	[208]
	Получение информации об оползнях с использованием косвенных данных от «молчаливых свидетелей» (например, по повреждениям деревьев)	[247–250]
	Получение информации об оползнях путем датирования оползневых отложений и полевых работ	[251–253]
Комбинированный подход	Частота возникновения оползней в зоне зарождения в сочетании с моделями дальности их перемещения позволяет получить частоты для оползней разной величины на данном контрольном участке	[254]
	Частота возникновения оползней в зоне зарождения в сочетании с моделями дальности их перемещения позволяет получить пространственные распределения оползней разной величины	[255]

Сходное распределение можно использовать для некумулятивного распределения оползней [185]:

$$N_L = C' A_L^{-\beta}, \quad (8)$$

где  $N_L$  – несуммарное число оползней величиной, равной или большей, чем  $A$ ;  $A_L$  – величина оползня (обычно выражаемая в виде его объема или площади);  $C'$ ,  $\beta$  – константы.

Построение и интерпретация связей «величина – частота» обсуждались несколькими исследователями (например, [185, 230–233]). Степенные законы обычно можно скорректировать с уче-

том распределения частот событий в заданном классе величины выше определенной пороговой. Ниже этого порога может возникнуть характерный эффект «ролловера (перегиба)» (rollover), что приведет к отклонению от степенного закона и нереалистичной недооценке более мелких событий. В то же время некоторые исследователи считают, что эффект «ролловера» обычно не наблюдается в случае полной инвентаризации и что уположивание кривых «величина – частота» в сторону малых значений величины связано с эффектами цензурирования (усечения) выборки [231, 234, 235]. Другие полагают, что эффект

«ролловера» является результатом фактических физиографических (природоописательных) ограничений [229, 232] или удерживающего эффекта корневых систем (effect of root cohesion) [236].

#### *Производные от зависимостей «величина – частота»*

В зависимости от того, в региональном или локальном масштабе были получены соотношения «величина – частота», могут применяться разные подходы. В таблицах 10 и 11 приведены списки возможных работ по подготовке соотношений «величина – частота» с использованием различных подходов или на-

боров данных. Величина может быть выражена либо в терминах многократного возникновения региональных оползневых событий (MORLE – multiple occurrence of regional landslide events), либо в виде размера отдельного оползня.

При анализе в региональном масштабе может быть установлена зависимость между интенсивностью триггерного воздействия (количеством атмосферных осадков, интенсивностью дождей, силой землетрясения) и величиной многократного возникновения региональных оползневых событий (MORLE – multiple occurrence of regional landslide events), которая определяется либо общим числом оползней, либо, предпочтительно, плотностью распределения оползней на рассматриваемой территории (то есть количеством оползней на квадратный километр) [256]. Такие зависимости были получены для некоторых задокументированных случаев сильных ливней [122] и землетрясений [106]. Зависимости «величина – частота» также могут быть установлены на основе анализа аэрофотоснимков или спутниковых изображений, полученных через известные промежутки времени. Эти зависимости могут быть справедливы на региональном уровне, но не для какого-либо конкретного склона или субрегиона. Важно отметить, что при анализе путем вышеупомянутых региональных подходов не учитывается дальность перемещения оползней (см. таблицу 10).

При анализе в локальном масштабе зависимость «величина – частота», рассчитанная для зоны зарождения, может существенно отличаться от зависимости, рассчитанной для зоны ниже по склону, поскольку объем оползня влияет на дальность его перемещения и на площадь, покрываемую оползневymi отложениями. Следовательно, частота оползней на любом участке местности обусловлена как возникновением разрушений склонов, так и вероятностью влияния соседних участков.

Таким образом, вероятность того, что данный участок склона будет затронут оползнем, зависит от частоты инициирования, которая должна быть масштабирована в соответствии с частотой дальности перемещения, в свою очередь зависящей от динамики оползня, описываемой подходящими моделями [257]. Для зонирования опасных мест такое масштабирование может рассматриваться как неважное для оползней с маленькой дальностью перемещения – и тогда опасность может оцениваться в

зависимости от зоны зарождения. И наоборот, в случае оползней с большой дальностью перемещения в локальном или детальном (сайт-специфическом) масштабе зависимости «величина – частота», полученные для зоны зарождения, должны быть скомбинированы с моделями дальности перемещения для получения пространственно зависимых частот оползней разной величины (см. таблицы 10, 11).

#### **Ограничения для зависимостей «величина – частота»**

Кривые «величина – частота» должны применяться с осторожностью. Ограничения в отношении их достоверности и практической применимости включают статистическую надежность и степень, в которой процессы, используемые для их определения, отражают соответствующие реальные физические процессы.

На статистическую надежность этих кривых влияет то, что редко бывают доступны базы исторических данных и инвентаризации оползневых событий (предпочтительные источники информации для этих кривых), а также то, что в реальности может оказаться невыполнимым сбор детальных (сайт-специфических) данных для больших территорий или при бюджетных ограничениях.

Более того, размеры оползней, представленные в базах исторических данных, могут быть неполными или оценочными [253] – с точностью до порядка их величины [234]. Данные могут быть неполными как в пространственном (если выборка данных производилась только в определенных подобластях), так и во времени (если данные регистрировались только для определенных промежутков времени) отношении.

Недостаточность выборки для оползней малой величины может быть связана с наличием порога обнаружения (например, при камнепадах со склонов вдоль дорог очень маленькие упавшие блоки могут не считаться оползнями или, даже если они считаются таковыми, их могут не регистрировать, о них могут не сообщать) или с «системной цензурой» из-за факторов, влияющих на физические процессы, связанные с оползнем (например, эффективных контрмер, принятых выше по склону от границы территории сбора данных).

Не следует использовать кривые «величина – частота», полученные на основе одного аэрофотоснимка или спутникового изображения или в ходе одной полевой кампании. Инвентаризации та-

кого типа не отражают фактические частоты возникновения оползней разной величины, поскольку многие небольшие оползни исчезли из-за эрозии, и поскольку они неадекватно учитывают случаи реактивизации крупных оползней [43].

Ключевой вопрос – можно ли экстраполировать частоту возникновения небольших оползней в регионе на прогнозирование частоты возникновения крупных оползней, и наоборот. Ответ на этот вопрос не является очевидным. Как указали авторы работы [258], основываясь на анализе обломочных потоков и обломочных лавин, кривая «величина – частота», полученная для региона, занижала бы реальные размеры, если бы применялась к меньшему субрегиону с относительно высокими склонами, и завышала бы их, если бы применялась к соседнему субрегиону с более низкими склонами. Еще большая ошибка может возникнуть, если попытаться оценить вероятность схода оползней определенной величины на определенном участке склона известной высоты.

#### **Зависимости между интенсивностью и частотой оползней**

Комбинации пар «величина – частота» сами по себе не дают нужной информации по оползневой опасности, поскольку размеры оползней не подходят для построения кривых уязвимости объектов при анализе рисков. Чтобы определить вероятность или частоту оползневых событий, приводящих к определенной степени ущерба (оцениваемой с помощью кривых уязвимости), необходимо оценить их интенсивность. Параметр интенсивности, который следует выбрать, зависит от типа оползней и характера объекта, подверженного риску. Например, для описания камнепадов наиболее часто используемым параметром является кинетическая энергия [254, 255], тогда как для обломочных потоков используются максимальные расход [259], скорость [207, 260, 261], толщина [262, 263] и скорость в квадрате, умноженная на толщину [253]. Для крупных оползней скольжения и земляных потоков подходящими параметрами могут быть смещение или скорость перемещения [264, 265].

Методы определения зависимостей «интенсивность – частота» для каждого участка вдоль склона могут быть разными в зависимости от типа оползня и масштаба анализа. Для анализа отдельных оползней в локальном масштабе

можно моделировать различные сценарии с разными объемами и связанными с ними вероятностями (например, для связей «величина – частота») с помощью численных моделей, чтобы определить пространственное распределение интенсивности во время движения оползня [180, 266, 267]. Следовательно, для каждого места на склоне можно построить кривые «интенсивность – частота», беря значения частоты из зависимостей «величина – частота» и значения интенсивности, рассчитанные с использованием моделей [268].

Интенсивность в каждом месте вдоль склона, потенциально подверженного воздействию оползней, которые могут начаться в разных зонах зарождения, представляет собой не одно значение для каждого частотного сценария, а некое распределение значений. Чтобы охарактеризовать такое распределение, обычно применяют простые статистические методы, такие как определение среднего арифметического [255] или максимального значения [261, 269], а кривые «интенсивность – частота» строят с использованием этого значения интенсивности и частоты, полученной из зависимостей «величина – частота».

Однако этот подход требует сильного допущения о распределении интенсивностей, поскольку среднее арифметическое подходит только для нормального распределения, а для определения максимума учитываются только значения, резко выделяющиеся на фоне распределения (выбросы), что приводит к сильному завышению фактической опасности.

Альтернативный подход к расчету зависимости «интенсивность – частота» для камнепадов заключается в учете распределения вероятностей кинетической энергии для данного места вдоль склона и данного сценария объема [180]. Используя 3D модели камнепадов, можно также проанализировать сходимость различных траекторий в одном и том же месте, тем самым охарактеризовав частотное распределение кинетической энергии [270].

## Оценка оползневой опасности ▶

### Объекты анализа опасности

Цель анализа оползневой опасности определяет используемые масштаб, метод и получаемые результаты. Для него могут быть выбраны разные территории и их пространственное расположение [43]. Рассмотрим типы этого анализа.

1. *Территориальный анализ* обычно проводится или для регионального, или для локального планировочного зонирования. Потенциал разрушения склона оценивается для каждого отдельного элемента местности (пикселя, ячейки, полигона, бассейна), а возникновение оползневой события во времени в отношении может быть выражено в относительном виде – как количество оползней (заданной величины) на единицу площади (квадратный километр, пиксель и т.д.) в год или как вероятность превышения. Позже путем объединения выходных данных с результатами анализа дальности перемещения может быть оценена интенсивность.

2. *Линейный анализ* выполняется для протяженных сооружений инфраструктуры (автомобильных и железных дорог, трубопроводов и т.д.). Анализ может выполняться в зонах зарождения [271], но обычно он фокусируется на оползнях, которые потенциально могут оказать воздействие на инфраструктуру. Опасность может быть выражена как количество оползней заданной величины, которые достигают объекта инфраструктуры, на единицу длины в год или как общее количество оползней в год на всем протяжении объекта. Частота в обоих случаях выражается в относительном виде и должна определяться отдельно для разных объемов оползней (например, [124, 272]).

3. *Объектно-ориентированный (точечный) анализ* выполняется на конкретных участках (таких как конусы выноса, осыпные склоны) или для объекта или группы объектов, подверженных опасности. Анализ опасности ограничивается оползнями, которые потенциально могут затронуть данный участок. Частота может быть выражена в абсолютном виде как количество оползней заданной величины, которые достигают интересующего участка в течение года, или как величина, обратная периоду повторяемости.

В зависимости от того, что показано – точное место разрушения склона, дальность перемещения или и то, и другое, анализ считается пространственно приуроченным или пространственно не приуроченным.

### Учет дальности перемещения оползней

Территориальный анализ опасности может быть выполнен с учетом или без учета мобильности оползней.

Оползни с небольшим смещением хорошо локализируются географически и

остаются в зоне зарождения или очень близко к ней. В этом случае при оценке опасности и ее картировании учитываются потенциальные возможности разрушения склонов или реактивизации возникших ранее оползней на каждом элементе местности, но интенсивность не рассчитывается [53].

Оползни с большой дальностью перемещения могут распространяться на значительные расстояния от зоны их зарождения. В этом случае помимо потенциальной возможности разрушения склона необходимо определить частоту оползней (и, следовательно, уровень их интенсивности) вдоль предполагаемой траектории, то есть выполнить пространственно приуроченный анализ. Разные величины оползней приведут к разным дальностям их перемещения и разным интенсивностям.

Можно рассмотреть два подхода к учету дальности перемещения [273]. При первом подходе сначала определяется вероятность разрушения каждого склона, отдельно рассчитывается перемещение оползня, а затем они математически объединяются. Для достижения этой цели требуется зависимость «величина – частота» для каждого склона или элемента местности, а после этого – оценка дальности перемещения для каждой величины оползня. При альтернативном втором подходе опасность рассчитывают непосредственно для каждой комбинации режима неустойчивости склона и дальности перемещения – например, получают зависимость «величина – частота» для затронувших дорогу камнепадов на основе статистики прошлых таких событий (например, [234, 245]) или для конусов выноса обломочного материала [274].

### Пространственно не приуроченный анализ опасности

Национальные и региональные карты, масштаб которых, как правило, не позволяет выполнить точный анализ устойчивости склонов и дальностей перемещения, не отражают пространственную приуроченность опасности. Оценить опасность в этих случаях не получается в полной мере, поскольку не учитывается интенсивность. Такой анализ обычно проводится для неглубоких оползней, для которых принимается то, что они являются повторяющимися событиями, происходящими в пределах региона в виде разрушений, разбросанных по исследуемой территории и во времени, или вызванных конкретными триггерами (например, сильными лив-

Таблица 12. Пространственно не приуроченная региональная оценка оползневой опасности

Метод	Дескриптор опасности	Ссылки
Период повторяемости оползней устанавливают на основе наборов аэрофотоснимков и/или спутниковых изображений, полученных через известные промежутки времени. Затем определяют частоту оползней	Количество оползней/км <sup>2</sup> /год	[208, 280]
	Количество оползней/пиксель/год	
	Общая площадь оползней/км <sup>2</sup> /год	
Триггеры разных интенсивностей/величин связывают с плотностью оползней. Затем для триггеров рассчитывают периоды повторяемости или вероятности превышения	Вероятность наличия	[122]
	Количество оползней/км <sup>2</sup>	
	Количество оползней/пиксель	
Определяют вероятность сейсмических сотрясений за заданные промежутки времени в сочетании с вероятностью оползнеобразования на основе моделей Ньюмарка	Общая площадь оползней/км <sup>2</sup>	[281]
	Вероятность возникновения оползней	

ниями или землетрясениями), действующими на большой площади (речь идет о многократном возникновении региональных оползневых событий).

Оползневая опасность за определенные интервалы времени может быть оценена на основе инвентаризаций оползней, выполненных путем анализа последовательных аэрофотоснимков или спутниковых изображений. Частота оползней рассчитывается путем определения числа новых оползней между съемками. Опасность выражается как количество произошедших оползней на единицу площади за определенный промежуток времени. Этот метод позволяет получить достоверные оценки краткосрочной средней частоты. Его можно использовать для оценки средне- и долгосрочной средней частоты только в том случае, если период выборки включает среднее распределение событий, вызывающих оползни [43].

В случае рассмотрения многократного возникновения региональных оползневых событий сначала необходимо установить зависимость между возникновением оползней и их триггером, будь то ливневые осадки (например, [225]) или сейсмические воздействия (например, [148, 275]). При достаточном пространственном разрешении зарегистрированных данных по ливневым осадкам или магнитудам землетрясений знание распределения оползней по территории должно позволить установить функции связи интенсивности дождей и плотности оползней или связи расстояния до эпицентра землетрясения и плотности оползней. На втором этапе вероятность превышения либо интенсивности осадков, либо магнитуды землетрясения может быть связана с плотностью распределения оползней (например, с количеством оползней на квадратный километр) [106, 122]. Однако на

некоторых территориях плотность оползней в зависимости от количества осадков изменяется нелинейно – и тогда нельзя установить надежную связь [276]. Этот тип зависимости позволяет оценить, как часто происходят оползни на всей исследуемой территории, но не конкретно там, где будут разрушаться склоны. Однако, если ее объединить с картами предрасположенности к оползням или вероятностей оползневых событий, то можно определить части исследуемой территории, где ожидается возникновение оползней, с учетом количества дождевых осадков, превышающего пороговое значение [277].

Определение опасности, рассчитываемой на основе частоты триггеров оползней, по крайней мере для водоразделов с неограниченным поступлением воды, не требует полной регистрации прошлых оползней, но требует установления надежной связи между триггером, его величиной и возникновением оползней. Важно учитывать, что региональные события, вызывающие оползни, могут сосуществовать с другими региональными триггерами (например, либо с таянием снега, либо с выпадением дождя на снег, либо с разрушением оползневых плотин на ручьях, где возможно возникновение обломочных потоков и паводковых обломочных наносов), а также с локальной оползневой деятельностью (например, с речной эрозией). Следовательно, периоды повторяемости, полученные на основе региональных триггеров, являются лишь минимальной оценкой частоты оползней.

Обратное может произойти, если оползни удаляют покровные отложения, предрасположенные к оползнеобразованию, обнажая, по сути, устойчивую остаточную поверхность (этот процесс рассматривают как сопротивление дальнейшим оползневым событиям или

ограничением в количестве материала для них [278]).

Некоторые авторы предлагают ввести минимальный «безопасный» порог для дождевых осадков, которые исторически приводили к незначительному количеству оползней, и «обильный» порог для осадков, которые вызывали многочисленные оползни [279].

Избранные работы по вышеупомянутым подходам к пространственно не приуроченному анализу оползневых опасностей приведены в таблице 12.

#### *Пространственно приуроченный анализ опасности*

В локальном и детальном (сайт-специфическом) масштабах разрешение ЦМР обычно позволяет рассчитать вероятность возникновения оползней в каждой анализируемой элементе площади (например, в пикселе). Анализ может быть выполнен путем или включения, или исключения анализа дальности перемещения и последующего расчета интенсивности (таблица 13). Далее эти два варианта рассматриваются более подробно.

#### **Оценка опасности без расчета интенсивности оползней** ▶

Этот тип анализа обычно проводится для географически ограниченных оползней (например, для медленно движущихся оползней с малой дальностью перемещения) со смещениями, которые не могут быть представлены за пределами анализируемой территориальной единицы (например, ячейки или пикселя). Он также выполняется для линейных или практически точечных объектов, расположенных далеко от зоны зарождения оползней, для которых оползневая опасность определяется на основе наблюдений за прошлыми событиями. В обоих случаях интенсивность не рассчитывает-

Таблица 13. Пространственно приуроченный анализ оползневой опасности

Метод		Величина/ интенсивность	Частота	Дескриптор опасности	Ссылки	
Не рассчитывают интенсивность оползней	Площадной анализ	Комбинирование пространственной вероятности (предрасположенности территории к оползням) с вероятностью схода оползня заданной величины и вероятностью возникновения	Размер оползня (площадь, объем)	Частота оползней усредняется на основе промежутка времени между наборами изображений	Вероятность превышения возникновения оползня заданной величины в течение установленного периода	[208]
		Комбинирование моделей устойчивости с пространственно распределенными гидрогеологическими моделями и вероятностью возникновения критического триггерного события	Плотность распределения оползней	Периоды повторяемости или вероятность превышения пороговой величины	Вероятность превышения для триггера в течение установленного периода	[237, 282, 283]
	Объектно-ориентированный анализ (линейный или практически точечный)	Выполнение оценки опасности на контрольном участке (например, на участке дороги)	Величина оползня	Частота оползней разных классов величины усредняется в пределах зарегистрированного промежутка времени	Вероятность возникновения $x$ оползней заданного размера в год (может быть нормализована в отношении протяженности)	[234, 245, 272, 284]
		Выполнение оценки опасности в контрольном месте (то есть там, где находится объект, подверженный воздействию оползней)	Величина оползня/ протяженность	Из исторических каталогов для сочетаний «величина – частота»	Для величины обломочного потока и для установленных периодов	[251]
Рассчитывают интенсивность оползней	Площадной анализ	Комбинирование вероятности возникновения оползней в идентифицированных зонах зарождения с эмпирическими моделями дальности перемещения	Объем/ кинетическая энергия/ протяженность оползня	Из исторических каталогов для сочетаний «величина – частота»	Пределы кинетической энергии для разных величин камнепадов и для установленных периодов	[180, 285–287]
	Объектно-ориентированный анализ (линейный или практически точечный)	Комбинирование вероятности возникновения оползней с эмпирико-статистическими моделями дальности перемещения	Объем блока	Из распределений частот для углов наклона	Количество событий не менее заданной величины в год	[254, 255, 271]
		Комбинирование вероятности возникновения оползней с физически обоснованными моделями дальности перемещения	Объем/скорость обломочного материала	Из исторических каталогов для сочетаний «величина – частота»		[288, 289]

ся, а риск оценивается с учетом упрощающих допущений относительно уязвимости объектов, которые могут подвергнуться воздействию оползней. Рассмотрим эти случаи подробнее.

1. *Анализ опасности схода географически ограниченных оползней.* Для расчета вероятностей воздействия оползней на территориальные единицы (например, такие как пиксель, бассейн) при анализе или в региональных, или в локальных масштабах используются комбинации пространственно распределенных гидрогеологических моделей и моделей устойчивости, включающих как зону зарождения, так и зону аккумуляции оползневой массы. Опасность выражается как годовая вероятность либо разрушений склонов, либо реактивизации существующих оползней в каждой единице территории. Если более конкретно, то опасность рассчитывается как условная вероятность разрушения склона после триггерного события (например, критического количества дождей осадков или землетрясения). Для каждой территориальной единицы вычисляется коэффициент устойчивости

склона с использованием модели устойчивости бесконечного склона, в которой вероятность разрушения получается как годовая вероятность превышения критического количества дождей осадков [222, 237, 282]. Для разрушений, вызванных землетрясениями, применяется обычный анализ сейсмической опасности с определением пиковых ускорений грунта (PGA – peak ground accelerations) для разных периодов повторяемости, а устойчивость склонов, подверженных воздействиям землетрясений с разными периодами повторяемости, исследуется с использованием псевдостатического анализа [75]. В качестве альтернативы вероятность оползневой опасности может быть рассчитана на основе наблюдаемой частоты прошлых оползней [290]. Пример этого привели авторы работы [208], которые определили геоморфологические единицы и получили вероятность пространственно приуроченного возникновения оползней для каждой единицы территории с помощью дискриминантного анализа.

2. *Анализ опасности, выполняемый для контрольного отрезка линейного*

*объекта или для практически точечного объекта.* Для анализа опасности, который фокусируется на определенных отрезках линейных объектов или в определенных местах, не требуется расчет дальности перемещения оползней. Этот анализ обычно выполняется для транспортных коридоров, для которых имеются зарегистрированные данные об оползневых событиях, а подверженные возможному воздействию оползней объекты (автомобили, люди) крайне уязвимы для событий низкой интенсивности. В таких случаях ни скорость, ни кинетическая энергия не вычисляются. Величина события используется для определения, например, количества затронутых полос или ширины оползневой массы, а также для расчета вероятности воздействия на уязвимые объекты [124, 234, 245, 271, 284]. Опасность может быть выражена либо в относительном виде (то есть как годовая вероятность схода оползней заданной величины на единицу длины), либо в абсолютном виде (то есть как количество оползневых событий в год).

## Комбинированный анализ опасностей инициирования и дальности перемещения оползней ►

При комбинированном анализе опасностей инициирования и дальности перемещения учитывается пространственное распределение интенсивности оползня. При заданном объеме камнепада вдоль его пути будут изменяться скорость и кинетическая энергия (или энергия удара) [257]. Интенсивность камнепада зависит не только от его размера (величины), поскольку сходные значения кинетической энергии могут быть результатом разных сочетаний объемов и скоростей. Следовательно, картирование опасностей камнепадов должно выполняться с помощью моделей дальности перемещения, которые рассчитывают возможные пути камнепадов, расположение препятствий, которые могут останавливать падающие блоки, значения скорости и кинетической энергии камней, а также пространственное распределение кинетической энергии.

Критически важным вопросом является определение характерного объема камнепада. В случае камнепадов с фрагментацией отделившегося от склона материала [173] опасность возникает из-за отдельных камней, которые движутся по более или менее независимым траекториям. Однако зависимости «величина – частота», которые обычно определяются по данным инвентаризаций камнепадов, часто связывают частоту с объемом исходной отделившейся от склона массы, а не с размерами ее отдельных блоков, которые в конечном итоге достигают контрольного участка, а это может привести к завышению оценок энергии удара и к занижению вероятности удара по интересующему участку. К сожалению, в настоящее время в большинстве доступных программ не учитывается процесс фрагментации при камнепадах. Если при анализе дальности перемещения камнепадный процесс рассматривается как движение отдельного камня, то должны быть отражены наиболее вероятные будущие события. Репрезентативный размер блока может быть определен с использованием таких геометрических характеристик основных систем трещин в скальных породах, наблюдаемых на поверхности зоны зарождения, как длина трещин и расстояния между ними, и/или с применением распределения размеров фрагментов на склоне [255, 291].

Для обломочных потоков, как и для камнепадов, интенсивность направляю-

не коррелирует с общим объемом движущегося обломочного материала. Разные обломочные потоки в каждом случае приводят к разным распределениям интенсивности и вероятности воздействия на контрольный участок в зависимости от динамики перемещения. Поэтому согласно работе [207] карта интенсивности опасности должна отражать набор пар значений интенсивности и вероятности воздействия для разных типов обломочных потоков и классов их величин. Для оценки опасности обломочных потоков в детальном (сайт-специфическом) масштабе обычно применяются два разных подхода:

1) оценивается вероятность того, что определенный объем обломочного материала приведет к образованию обломочного потока, и используется физически обоснованная (2D или 3D) модель дальности перемещения для определения зоны воздействия и параметров интенсивности [288, 289];

2) оцениваются вероятности перемещения обломочных потоков разной величины через контрольные участки (и конусы выноса) ниже зоны их зарождения с использованием зависимостей «величина – частота» [251].

Используя ранние вероятности, можно затем составить карты опасностей для обломочных потоков для конкретных периодов повторяемости (например, 100, 500 и, возможно, 2 500 лет).

## Оценка множественных оползневых опасностей ►

В литературе часто используется термин «множественные опасности» [292, 293] для случаев, когда проводится параллельный анализ множества источников (причин) опасности, а в конечном итоге его результаты объединяются для анализа множественных рисков. Оценка множественных опасностей должна, строго говоря, относиться к совместной вероятности независимых событий, происходящих на одной и той же территории за определенный промежуток времени. Однако на практике она часто рассматривается исключительно в сочетании с анализом риска как оценка ожидаемых потерь. Это связано с тем, что уязвимость объектов зависит от типов и интенсивностей оползней и объединение вероятностей их возникновения на стадии опасностей в единое целое может помешать правильному определению риска на последующих стадиях.

При анализе нескольких невзаимодействующих источников опасности ее

оценка проводится независимо для каждого источника в соответствии с конкретными руководствами. В этом смысле не выполняется достоверная оценка множественных опасностей, а интеграция разных источников осуществляется на уровне риска (например, комбинирование кривых вероятностей количества жертв, суммирование ожидаемых потерь).

Оценка множественных опасностей становится актуальной, если источники опасности могут взаимодействовать с эффектом «домино», который возникает, когда опасное событие вызывает вторичное событие (например, когда оползень сходит на дно долины и перекрывает ее, а затем эта плотина разрушается).

В литературе есть несколько примеров учета комбинированных воздействий разных природных (или антропогенных) опасностей на определенные группы объектов риска [294–297]. Авторы работы [298] предлагают следующее уравнение для двух взаимодействующих опасностей с проявлениями  $E_1$  и  $E_2$  (где  $H_1$  – вероятность возникновения события  $E_1$ ):

$$H_1 = p(E_1) = p((E_1|E_2)p(E_2) + p(E_1|\bar{E}_2)p(\bar{E}_2)) \quad (9)$$

где  $\bar{E}_2$  означает, что событие  $E_2$  не происходит;  $p$  – вероятность или распределение вероятностей.

Обобщение уравнения (9) для более чем двух событий не является какой-либо особой концептуальной проблемой, хотя и может потребовать громоздких вычислений [298].

Несмотря на то что серьезные последствия таких последовательностей по принципу «домино» хорошо известны, до сих пор не существует хорошо обоснованной общепризнанной методики выявления и количественной оценки опасности, связанной с эффектами «домино».

Разными авторами предлагались критерии для проверки возможности возникновения «домино»-событий на качественном уровне, в то время как лишь в нескольких новаторских исследованиях рассматривалась проблема количественной оценки риска, связанного с эффектами «домино», обычно в связи с землетрясениями (например, [275, 299]).

Методики оценки «домино»-опасностей, связанных со стихийными бедствиями (например, оползнями, наводнениями, цунами и т.д.), могут быть по-

лучены и адаптированы на основе методик, разработанных для техногенных опасностей (в частности, в работе [300]). Частота вторичного события  $B$  рассчитывается по формуле:

$$f_B = f_A P_d, \quad (10)$$

где  $f_B$  – ожидаемая частота вторичного события  $B$ ,  $f_A$  – ожидаемая частота (событий в год) первого события  $A$ ;  $P_d$  – вероятность распространения (продвижения), выражаемая следующим образом:

$$P_d = P(B|A), \quad (11)$$

где  $P(B|A)$  – условная вероятность наступления события  $B$  при условии наступления события  $A$ .

Фундаментальный инструмент для работы с взаимосвязанными вероятностями (широко признанный в качестве стандартного для оценки воздействия на окружающую среду и анализа промышленных рисков) – дерево событий (ДС) или причинно-следственная сеть. ДС – это графическая или логическая схема, которая способна представлять прямые и косвенные причинно-следственные цепочки как следствия начального события, обычно называемого исходным.

Есть разные типы деревьев событий – начиная от чисто категориальных (в которых описательная или наглядная последовательность событий воспроизводится со всеми предсказуемыми ветвлениями) и заканчивая количественными (в которых численное представление условной вероятности или периода повторности для каждого отдельного узла цепочки вычисляется с использованием подходящих методов) [14]. Наиболее часто используемым типом ДС, основанным на условной вероятности, является байесовское дерево событий (БДС).

Разные подходы к оценке относительной или абсолютной вероятности для множественных источников опасности можно в общих чертах сгруппировать в следующие классы.

**А. Совместная вероятность (joint probability).** Вероятность одновременного возникновения событий можно рассчитать, объединив их вероятности с использованием подходящих правил и методов (в соответствии с основами теории вероятностей). Это очень простой, но важный инструмент, который не учитывает пространственные измерения, каскадные эффекты или динамику системы.

**Б. Дерево событий – байесовское дерево событий.** В эту катего-

рию входят описательные ДС, БДС и общие причинно-следственные сети распространения (продвижения). Ветвления могут быть множественными или бинарными. Каждой ветви может быть присвоена условная вероятность (в случае БДС). Этот подход явным образом принимает во внимание каскадные эффекты более высоких порядков, но не в полной мере учитывает пространственную размерность вероятностных траекторий. По этой причине в контексте анализа рисков такие методы более уместно называть байесовскими деревьями событий на основе сценариев.

**В. Пространственно усредненное ДС – БДС.** При работе с многими траекториями при множественных опасностях в заданном географическом пространстве может быть предусмотрена специальная пространственно приуроченная версия байесовского дерева событий. В зависимости от уровня пространственных и временных знаний об отдельных опасностях, это может быть:

1) *пространственное распределение отдельных независимых БДС:* когда карта опасностей показывает заданную вероятность возникновения  $H(I)$  за заданный промежуток времени в определенных местах;

2) *пространственное усреднение вероятностных результатов использования БДС путем статистического усреднения:* когда карта опасностей показывает пространственно усредненную (или статистически выведенную) степень опасности с точки зрения либо относительной вероятности, либо вероятности во времени;

3) *пространственное объединение разных БДС:* когда требуемые данные известны только для дискретных областей с постоянными значениями.

**Г. Пространственно усредненное функциональное БДС.** В данном случае физические объекты в географическом пространстве динамически взаимодействуют между собой и демонстрируют поведение, которое меняется во времени в результате эволюции системы. Это в явном виде не учитывается при использовании предыдущих методов, но может быть включено в анализ множественных опасностей путем применения методов, которые могут динамически изменять деревья событий в соответствии с правилами функционального поведения [301, 302]. Это новый и сложный подход, который практически не применялся в исследованиях оползней. Очевидно, что он тре-

бует необычайно большого количества доступных данных, что на данном этапе делает его более подходящим для исследований в локальном масштабе.

В практическом отношении для оценки множественной оползневой опасности можно основываться на четырех разных сценариях:

1) *несколько типов оползней:* когда несколько типов оползней происходят в одном и том же месте, но не взаимодействуют друг с другом и не вызывают каскадного эффекта или эффекта «домино» и не обязательно происходят в одно и то же время;

2) *комбинированные (composite) по характеру движения оползни:* когда сложный оползень одновременно проявляет по крайней мере два типа движения в разных частях смещающейся массы (согласно работе [4]);

3) *комплексные (complex) по характеру движения оползни:* когда сложный оползень проявляет по крайней мере два типа движения во временной последовательности, что приводит к своего рода каскадному эффекту (согласно работе [4]);

4) *множество взаимодействующих оползней:* когда оползни разных типов (или оползни одного типа), которые происходят в одном и том же месте или в разных местах, взаимодействуют так, что имеется точка во времени и пространстве (confluence point – «точка пересечения»), в которой эффекты суммируются с использованием подходящих концепций.

В случае первого сценария оценка опасности проводится независимо для каждого типа оползня, а объединяются результаты только на уровне риска. При втором сценарии для оценки множественной опасности может быть рассмотрен подход с определением совместной вероятности. В третьем случае, если оползень скольжения по ходу движения превращается в оползень-поток, можно использовать ДС или БДС. При четвертом сценарии требуется распределенное использование ДС или БДС либо одного ДС/БДС для учета кумулятивных/каскадных эффектов вниз по долине от «точки пересечения». Наиболее подходящий для использования вариант ДС или БДС из перечисленных ранее зависит от масштаба анализа и выбранных дескрипторов опасности.

В таблицах 14 и 15 приведены предлагаемые методы оценки оползневой опасности для ее разных масштабов и типов на основе только что перечисленных категорий методов.

Таблица 14. Предлагаемые методы оценки множественных опасностей в региональном масштабе

Тип анализа	Характеристика		Дескриптор опасности	Методы и рекомендации
	Величины оползней	Частоты оползней		
Площадной (areal)	Плотность распределения; размер (площадь, объем)	Частота, рассчитываемая на основе среднего промежутка времени между наборами изображений	Количество оползней/км <sup>2</sup> /год; количество оползней/пиксель/год; общая площадь оползней/км <sup>2</sup> /год	Пространственно усредненные совместная вероятность и деревья событий на основе сценариев
	Плотность распределения	Периоды повторяемости или вероятность превышения пороговой (триггерной) величины	Вероятность наличия; количество оползней/км <sup>2</sup> ; количество оползней/пиксель; общая площадь оползней/км <sup>2</sup>	Пространственно усредненные совместная вероятность и деревья событий; пространственно приуроченные деревья событий
	Количество (нормализованное по расстоянию)	Периоды повторяемости или вероятность превышения сейсмического воздействия	Вероятность возникновения оползней	Пространственно усредненные совместная вероятность и деревья событий; пространственно приуроченные деревья событий

Таблица 15. Предлагаемые методы оценки множественных опасностей в локальном масштабе

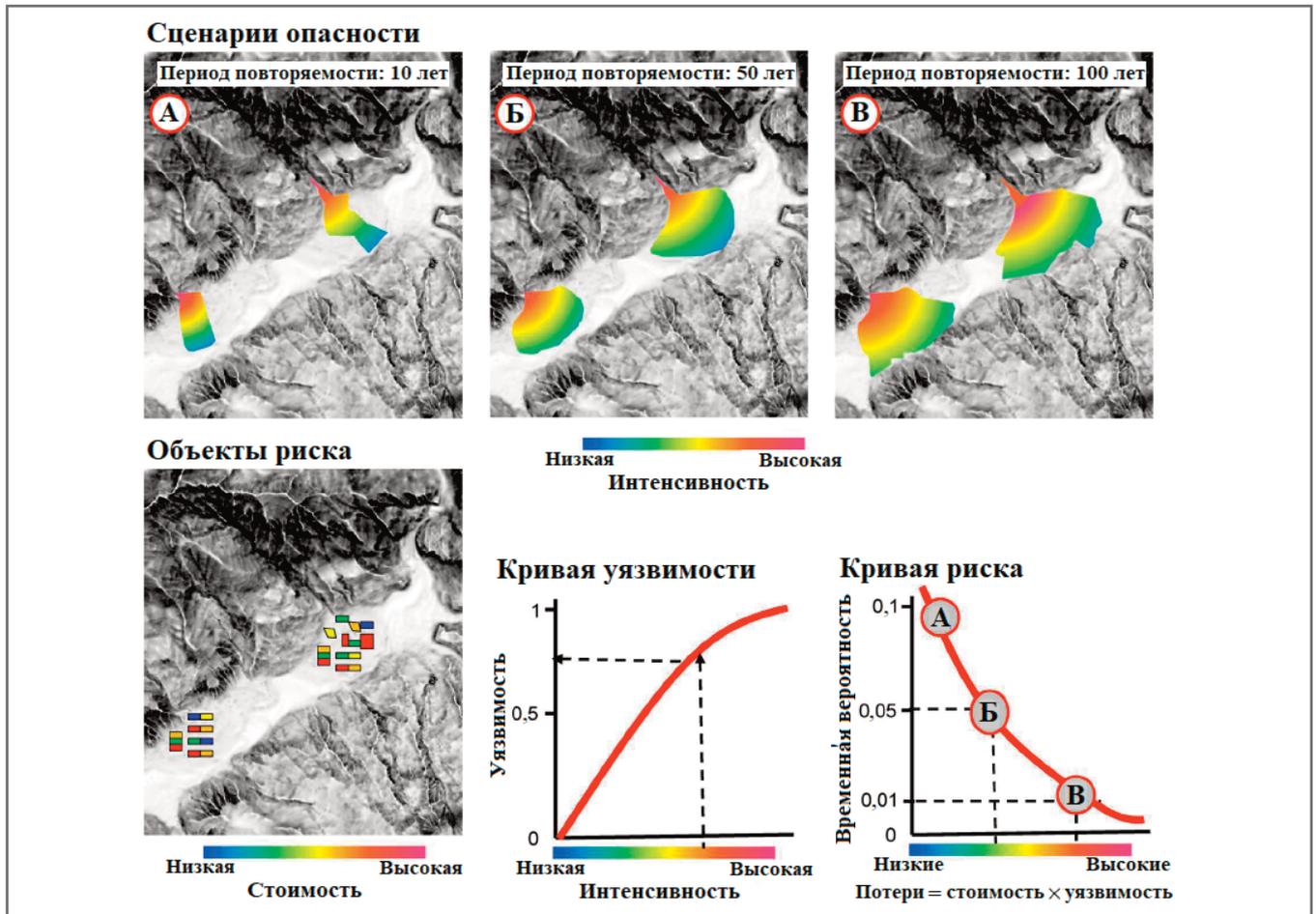
Тип анализа	Учет дальности перемещения	Характеристика		Дескриптор опасности	Методы и рекомендации
		Величины оползней	Частоты оползней		
Площадной	Не учитывается	Размер (площадь, объем) оползня	Частота, рассчитываемая на основе среднего промежутка времени между наборами изображений	Вероятность превышения для возникновения оползня заданной величины в течение установленного периода	Деревья событий на основе сценариев; пространственно усредненные совместная вероятность и деревья событий; пространственно приуроченные функциональные деревья событий
		Плотность распределения оползней	Периоды повторяемости или вероятность превышения пороговой (триггерной) величины	Вероятность превышения для триггера возникновения оползня в течение установленного периода	Пространственно усредненные совместная вероятность и деревья событий; пространственно приуроченные функциональные деревья событий
	Учитывается	Объем блока/кинетическая энергия	Из исторических каталогов (отношения «величина / частота»)	Пределы кинетической энергии для разных величин камнепадов и для установленных периодов Пределы кинетической энергии для разных величин камнепадов или обломочных потоков и для установленных периодов	Деревья событий на основе сценариев; пространственно усредненные совместная вероятность и деревья событий; пространственно приуроченные функциональные деревья событий
Неплощадной	Не учитывается	Размер (объем) оползня или его интенсивность	Частоты для классов величин оползней, рассчитываемые на основе среднего зарегистрированного промежутка времени	Вероятность для $x$ оползней заданного размера в год (она может быть нормализована по протяженности)	Пространственно приуроченные функциональные или нефункциональные деревья событий

### ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ ►

Этот раздел посвящен количественному анализу риска с учетом оползневой опасности в качестве входной информации. Часто возникает необходимость рассчитать все параметры, вклю-

ченные в уравнение (1), для каждого класса величины, поскольку оползни каждого класса характеризуются определенными значениями вероятности возникновения, дальности перемещения, интенсивности, вероятности воздействия. Затем можно установить глобальный риск для всей интересующей

площади, объединив конкретные риски для разных величин оползней или их интенсивностей и для всех подверженных их воздействиям объектов. Однако для анализа регионального (или меньшего) масштаба этот подход неприменим из-за недостатка или отсутствия подробных входных данных, поэтому



**Рис. 3.** Пример получения кривой риска, отображающей временные вероятности для разных сценариев опасности с разными соотношениями «периоды повторяемости – потери». Для каждого из сценариев можно построить свои карты интенсивности (например, силы удара). Каждый объект риска (например, здание) характеризуется своим типом, местоположением и стоимостью замены. Уязвимость объекта риска определяется с использованием кривой уязвимости для данного конкретного типа строительных конструкций, а также интенсивности для конкретного сценария опасности. Общие потери определяются путем умножения уязвимостей на стоимость замены для всех объектов риска. После определения количества точек можно построить кривую риска. Площадь под кривой риска представляет собой годовые потери

уравнение риска в этом случае будет более простым и более общим.

Помимо прямого риска (например, физической потери имущества или гибели людей) необходимо также учитывать косвенный риск (например, нарушение экономической деятельности, эвакуацию населения и т.д.), но это выходит за рамки данной статьи, в которой основное внимание уделяется прямым потерям.

Дескрипторы оползневой риска варьируют в зависимости от цели оценки, характера и типа каждого объекта риска, а также способов описания степени ущерба. Они могут быть:

- 1) одномерными, например 1 млн евро/год;
- 2) многомерными, например (кумулятивная) вероятность 0,0001 для заданного уровня потерь.

Для второго случая следует установить репрезентативные сценарии риска.

Дескрипторы риска для объекта или территории могут быть показаны гра-

фически путем построения (кумулятивных) кривых «частота (или вероятность) – последствие» или путем представления отдельных значений.

Для расчета риска могут использоваться два альтернативных типа анализа – детерминистический или вероятностный. При детерминистическом анализе рисков используются средние или наименее благоприятные (при наилучшем сценарии) значения компонентов риска (переменных уравнения риска) и получается одномерный результат, показывающий средний или максимальный риск соответственно. Напротив, для вероятностного анализа принимается, что все или некоторые компоненты риска соответствуют распределениям вероятностей, поэтому результаты представляются вероятностно – с использованием пар значений или графиков (кумулятивной) вероятности и последствий. Моделирование методом Монте-Карло может облегчить вероятностный расчет риска, если известны

функции плотности вероятности, которые лучше всего соответствуют распределениям компонентов риска.

### Оценка уязвимости ►

Несмотря на то что проводились обширные исследования по количественной оценке оползневой опасности, разработки по анализу последствий и оценке уязвимости были ограниченными. Далее будут описаны различные виды ущерба от разных типов оползней для разных объектов риска и приведены указания по выбору подходящих методов оценки уязвимости в зависимости от объекта риска, типа оползня и масштаба анализа.

### Типы уязвимости ►

В разных дисциплинах используются разные определения и концептуальные парадигмы для уязвимости.

С точки зрения естественных наук, уязвимость может быть определена как степень потерь для определенного объ-

екта или ряда объектов на территории, подверженной оползневому риску. Для имущества ущербом будет его величина в отношении стоимости. Для людей это будет вероятность их гибели. Уязвимость может также относиться к предрасположенности к потерям (или к вероятности потерь), а не к их степени.

В социальных науках существует множество определений и аспектов для термина «уязвимость» в зависимости от масштаба и цели анализа. Некоторые из них рассмотрены в публикациях [263, 303].

Количественная оценка уязвимости может быть получена: в денежном выражении (абсолютном или относительном касательно величины подверженных риску объектов), в процентах от валового внутреннего продукта на душу населения, в количестве смертельных исходов или с использованием других типов шкал показателей (последнее особенно актуально для социальной уязвимости, как описано в работе [304]). Степень ущерба, причиненного тем или иным событием, представляет собой сумму прямых и косвенных потерь. Здесь мы рассмотрим физическую уязвимость и уязвимость людей.

1. *Физическая уязвимость* относится к прямому ущербу для зданий, инженерных сетей и других объектов инфраструктуры. Финансовые последствия ущерба зданию или сооружению могут быть легко оценены и поняты. Кроме того, уязвимость физических объектов может быть выражена в отношении степени ущерба или стоимости восстановления в результате события.

2. *Уязвимость людей* (гибель, травмы) относится к тому, приведет ли оползневое событие к травмам или смертельным исходам или нет. Опять же, в случаях травм или гибели людей (в пересчете на страховую стоимость) или снижения качества жизни может быть дана денежная оценка. Модели, которые используются для определения таких денежных значений, как правило, учитывают стоимость спасения, госпитализации и лечения, а также потерю потенциальных заработков (как на ближайшее время в случае травмы, так и в долгосрочной перспективе). Гибель людей или получение ими травм в результате схода оползня приводят также и к социальным последствиям, которые нелегко поддаются количественной оценке.

Обзор типов потенциального ущерба, которые классифицируются в зависимости от типа оползня, объектов риска и расположения этих объектов по от-

ношению к оползню, представлен в публикации [17].

### *Уязвимость зданий*

Опыт показывает, что степень ущерба для зданий весьма различна в зависимости от характеристик здания, механизма оползня, а также его величины и интенсивности. Уязвимость может быть выражена в виде степени ущерба, варьирующей от неконструктивных повреждений до обширного разрушения/обрушения. Повреждения могут быть конструктивными/структурными или неконструктивными/неструктурными с нарушением инженерных систем.

Тип уязвимого объекта – ключевой фактор при оценке его уязвимости тем или иным методом. Основные типологические параметры, которые определяют способность зданий противостоять оползням – это конструктивная система, геометрия, свойства материалов, состояние технического обслуживания, уровни проектных норм, детали фундамента и наземной части, количество этажей и др. Стоимость ущерба зависит от типа здания, его расположения и использования. Для облегчения сбора данных в местном и региональном масштабах во многих случаях удобно рассматривать более агрегированные уровни в виде однородных объектов. Они должны включать группы зданий, характеризующихся относительной однородностью по типу конструкций, строительным материалам, возрасту, количеству этажей и распределению в отношении землепользования.

Дополнительным важным фактором является географическое расположение объектов по отношению к телу потенциального оползня (на уровне бровки срыва, зоны перемещения, фронтальной части и т.д.) с учетом вариаций движения и последующего взаимодействия со зданиями. Важными параметрами также являются место удара и его важность для устойчивости объекта. Основные места воздействия – крыша, фасад (включая структурные и неструктурные элементы) и фундамент. Для малых масштабов в силу небольшого разрешения анализа может быть принято упрощение, заключающееся в том, что события схожей величины вызывают повреждения одинакового уровня. При детальном масштабе оценки, особенно для камнепадов и обломочных потоков, следует учитывать точку удара по зданию, особенно по элементам, которые важны для его устойчивости. В особенности это касается каркасных конструк-

ций, где, например, повреждение несущей колонны может инициировать каскад разрушений. В каменных конструкциях (из каменной, кирпичной или другой кладки) повреждения обычно носят локальный характер, поскольку легко находятся альтернативные пути для передачи нагрузки благодаря гиперстатической (с избыточными связями) несущей системе.

Один из основных параметров, способных существенно повлиять на повреждение здания в случае обломочного потока, – «иерархия сопротивлений» между основными конструктивными (несущими) и второстепенными неконструктивными (ненесущими) элементами.

Ущерб, наносимый застроенной среде в результате возникновения быстрых оползней, таких как обломочные потоки и камнепады, как правило, является самым большим и серьезным, поскольку он может привести к полному разрушению любого здания. Однако медленно движущиеся оползни также оказывают неблагоприятное воздействие [265]. Ущерб, наносимый зданию медленно движущимся оползнем, в основном объясняется кумулятивным долговременным (абсолютным или дифференциальным) смещением и тем, что оно сосредоточено в пределах неустойчивой зоны. Тип реакции здания на долговременное общее и дифференциальное деформирование грунта зависит в первую очередь от типа фундамента. Глубокие фундаменты менее уязвимы, чем неглубокие. Жесткие фундаменты, которые допускают вращение здания как жесткого тела, могут быть менее уязвимыми, чем гибкие [305].

### *Уязвимость автомобильных и железных дорог и транспортных средств*

Уязвимость системы автомобильных или железных дорог может быть обусловлена как частичной или полной блокировкой их трасс, так и структурными повреждениями, включая нарушение покрытия, что связано с уровнем эксплуатационной пригодности.

Для оценки уязвимости транспортной инфраструктуры и транспортных средств (из-за прерывания движения) по отношению к различным оползневым опасностям необходима информация о типе (автомагистраль, асфальтированная или грунтовая дорога или др.), ширине дороги и интенсивности движения. В этих целях можно использовать среднегодовой показатель ежедневного движения (анпу-

Таблица 16. Эвристические (основанные на суждениях экспертов) методы оценки уязвимости

Объекты риска	Типы оползней по механизмам	Масштабы оценки	Метод	Ссылки
Здания, дороги и другие объекты инфраструктуры, люди внутри и снаружи зданий	Обломочные потоки, камнепады	Локальный, региональный	Прямое приписывание фиксированных значений событиям с разными периодами повторяемости	[314]
Люди на открытых пространствах, в транспортных средствах или внутри зданий	Обломочные потоки, камнепады	Локальный, региональный	Получение фиксированных значений из архивных данных, зарегистрированных в Гонконге	[315]
Дороги	Обломочные потоки	Региональный	Статистический анализ данных инвентаризации для построения кривых уязвимости	[316]

Таблица 17. Методы оценки уязвимости, основанные на данных

Объекты риска	Типы оползней по механизмам	Масштабы оценки	Методы	Ссылки
Здания	Камнепады	Детальный, локальный	Обратный анализ данных по повреждениям в результате реальных событий. Оценка уязвимости, связанной с энергией удара и выражаемой сигмоидной функцией	[243, 255]
Здания	Обломочные потоки	Детальный, локальный	Обратный анализ с использованием данных по повреждениям в сочетании с информацией по результатам моделирования. Оценка уязвимости, связанной или с толщиной оползневой массы (height of accumulation), или с силой удара, или с кинематической вязкостью и выражаемой сигмоидной функцией	[268, 317]
Здания, люди	Разные типы	Региональный	Вероятностный анализ на основе аппроксимации неопределенностей методом второго момента первого порядка с получением значения уязвимости	[306, 318–320]
Здания	Обломочные потоки	Локальный, региональный	Вычисление функции, полученной с помощью регрессии данных реальных событий и корреляции с толщиной обломочного материала (debris height)	[263, 321–323]

Таблица 18. Аналитические методы оценки уязвимости (основанные на физических моделях)

Объекты риска	Типы оползней по механизмам	Масштабы оценки	Методы	Ссылки
Здания (каркасные)	Камнепады	Детальный, локальный	Оценка устойчивости (сопротивляемости) несущих колонн. Применение метода конечных элементов для оценки потенциала прогрессирующего обрушения. В результате получают матрицу уязвимости и кривые уязвимости, связанные с энергией удара и неопределенностью места удара	[324, 325]
Здания (каркасные)	Медленные оползни	Детальный	Расчет ущерба от оползней, вызванных сейсмическим воздействием, с использованием модели конечного склона и метода конечных разностей. Параметрический анализ и статистическая оценка для построения кривых уязвимости	[313, 326]
Здания (каркасные)	Медленные оползни	Детальный	Применение численного моделирования и концепций анализа сейсмических воздействий для расчета кривых уязвимости, связанных с неравномерными осадками	[327]
Здания	Обломочные потоки	Детальный, локальный, региональный	Использование принципов динамических откликов простых конструкций на сейсмическое воздействие. Получение кривых уязвимости, связанных с силой удара	[328]
Здания (каркасные и каменные)	Обломочные потоки	Детальный, локальный, региональный	Вероятностная оценка повреждений путем расчета устойчивости (сопротивляемости) элементов/объектов с использованием метода Монте-Карло для различных типов конструкций. Расчет кривых уязвимости	[329]

al average daily traffic – AADT), который является репрезентативным для типичного транспортного потока.

Для движущихся объектов, таких как транспортные средства, точная оценка уязвимости требует хорошей регистрации прошлых оползневых событий и связанного с ними ущерба [75]. Уязвимость транспортного средства на дороге зависит от его положения по отношению к оползню в определенное время и от того, пострадает ли оно непосредственно от удара, врежется ли в уже отложенный материал или сойдет с рельсов из-за повреждения инфраструктуры. Кроме того, важными способствующими факторами являются: тип транспортного средства (в части его средней скорости), величина оползня и плотность (интенсивность) движения в определенное время на определенном участке дороги. Таким образом, уязвимость транспортного средства по отношению к оползням привязана к пространству и времени и может быть количественно определена с использованием статистических данных и/или стохастических подходов.

#### **Уязвимость людей**

Физическая уязвимость людей относится к вероятности того, что из-за оползня будет потеряна конкретная жизнь [11]. Она зависит от многих факторов: типа оползня, его размера и интенсивности; сопротивляемости и подвижности людей, подверженных оползневому риску; их относительного положения в зоне воздействия. Считается, что сопротивляемость человека воздействию оползней также является функцией его интеллектуальной зрелости (например, в отношении восприятия риска) и его физических данных (например, в силу возраста) [306]. Этот тип уязвимости может быть весьма важным в случае быстрого оползня (обломочного потока, камнепада), но, как правило, незначителен для медленных оползней. Из-за сложного и динамичного характера человеческой популяции такая уязвимость меняется во времени. Учитывая большие неопределенности и сложности, связанные с физической уязвимостью людей по отношению к оползням, все существующие методики ее анализа основываются на экспертных оценках и эмпирических данных.

#### **Количественная оценка уязвимости** ▶

Уязвимость объекта риска может быть количественно оценена с помощью

индексов или кривых уязвимости. Индекс уязвимости отражает степень ущерба по относительной шкале от нуля (отсутствие повреждений) до единицы (полное разрушение). Кривые уязвимости показывают условную вероятность достижения или превышения определенного уровня ущерба (например, незначительного, умеренного, обширного, полного) в результате схода оползня определенного типа и определенной интенсивности. Таким образом, в подход к моделированию уязвимости явно можно включить как эпистемологические (основанные на знаниях), так и случайные неопределенности (например, для структурной типологии, сопротивления материалов, возраста, состояния технического обслуживания и т.д.).

Большинство процедур построения кривых уязвимости, описанных в литературе (например, [307–311] и др.), первоначально было предложено в отношении землетрясений, но их также можно модифицировать так, чтобы применять при рассмотрении воздействий оползней. Для представления кривой уязвимости для заранее заданного уровня повреждений (или предельного состояния) обычно используется функция двухпараметрического логнормального распределения из-за ее простой параметрической формы [312, 313].

Методы, используемые для количественной оценки уязвимости, в соответствии с типом входных данных и оценкой параметров динамического отклика объекта можно разделить на три группы: эвристические (основанные на суждениях экспертов) (таблица 16); основанные на данных, то есть использующие данные прошлых событий (таблица 17); аналитические, то есть использующие физические модели (таблица 18). Наличие и качество входных данных также играют фундаментальную роль.

#### **Эвристические (основанные на суждениях экспертов) методы** ▶

Эвристические (основанные на суждениях экспертов) методы обычно дают дискретные значения для диапазона интенсивностей оползней. Основываясь на экономической ценности зданий, дорог и других объектов инфраструктуры в заданном районе, авторы работы [314] установили фиксированные значения уязвимости в зависимости от периода повторяемости обломочных потоков и камнепадов. Таким же образом они определили значения уязвимости для людей внутри и снаружи зданий. Для людей, находящихся на открытых про-

странствах, в транспортных средствах или в зданиях в оползнеопасных зонах, на основе наблюдений за реальными событиями авторы публикации [315] дополнительно получили значения, которые могут быть использованы для оценки рисков в Гонконге.

В работе [316] был предложен метод определения физического ущерба дорогам из-за обломочных потоков на основе статистического анализа данных из анкет (заполненных признанными экспертами в области оценки опасностей и рисков в связи с обломочными потоками) для расчета кривых уязвимости.

#### **Методы, основанные на данных** ▶

Методы, основанные на данных, являются наиболее часто используемыми для оценки уязвимости, поскольку они отличаются простотой и надежностью, хотя и привносят определенную степень субъективности. Степени их сложности и учета неопределенностей значительно различаются, и их применимость ограничена необходимостью в наличии данных инвентаризации для исследуемой территории. Уязвимость с помощью этих методов рассчитывается как функция интенсивности оползня.

Авторы статьи [255] выполнили обратный анализ данных по повреждениям в результате реальных событий для получения корреляций между интенсивностью камнепадов и уязвимостью зданий с помощью регрессии. Результатом стала эмпирическая функция уязвимости для оценки в детальном масштабе, полученная путем подбора значений повреждений и энергий удара с помощью сигмоидной функции. Аналогичным образом в работе [317] были использованы данные инвентаризации ущерба, нанесенного зданиям обломочными потоками, для расчета сигмоидной функции, которая может быть использована для определения уязвимости в зависимости от толщины оползневой массы (height of accumulation), силы удара и кинематической вязкости.

В статьях [306, 318] в количественную оценку уязвимости были включены неопределенности. Была предложена вероятностная оценка уязвимости с помощью подхода, основанного на аппроксимации неопределенностей методом второго момента первого порядка (FOSM – first-order second moment), который использовался также в работе [319]. Схожая вероятностная модель была предложена и в публикации [320].

Для обломочных потоков авторы работ [263, 321–323] получили функцию уязвимости, которая связывает интенсивность (толщину обломочного материала) со значениями уязвимости.

Авторы статьи [268] разработали индекс интенсивности обломочного потока, который учитывает высоту и скорость потока, чтобы рассчитать вероятность ущерба.

### **Аналитические методы** ▶

Аналитические методы применяются реже из-за их сложности по сравнению с описанными выше методами и из-за отсутствия/нехватки детальных входных данных. При использовании таких методов обычно проводятся различия между зданиями, имеющими разные типы конструкций.

Уязвимость нижней части железобетонной конструкции к воздействиям камнепадов может быть проанализирована с помощью методики, представленной в публикациях [324, 325]. При ее использовании учитывается потенциальная возможность прогрессирующего обрушения, когда в результате камнепада разрушаются ключевые элементы конструкции (анализ выполняется с применением метода конечных элементов). Эта методика позволяет получить дискретные вероятностные значения уязвимости для разных интенсивностей событий и кривые уязвимости, учитывающие неопределенность места удара.

Авторы статей [313, 326] разработали аналитический метод оценки уязвимости железобетонных зданий, подверженных воздействию медленных оползней, вызванных землетрясениями. Кривые уязвимости были получены с помощью определения пиковых ускорений грунта или перманентных смещений в скальном основании, находящемся в сейсмически активной зоне, и вероятности превышения каждого предельного состояния на основе двухэтапного численного моделирования в несвязанной постановке. Этот метод применим к различным типам грунта, геометрия склонов и конфигурация зданий, что позволяет явно учитывать разные источники неопределенности. В работе [327] также были рассчитаны кривые уязвимости в зависимости от неравномерных осадок железобетонного каркасного здания.

Кривые уязвимости могут быть получены для неармированных и армированных каменных конструкций, подверженных воздействию обломочных пото-

ков, с помощью метода, предложенного в публикации [328], в пакете программ HAZUS [330]. В этом методе используются принципы динамического отклика простой конструкции на сейсмическое воздействие. Кроме того, авторы работы [329] представили другой аналитический метод расчета кривых уязвимости – основанный на оценке устойчивости (сопротивляемости) железобетонного каркаса и заполняющей его стены в вероятностных терминах и использующий моделирование методом Монте-Карло. При этом учитывается иерархия устойчивостей отдельных элементов конструкции.

### **Анализ рисков** ▶

Риск, как и опасность, может относиться к территории, линейному сооружению или отдельному строительному объекту.

Площадной анализ обычно нужен местным и региональным органам власти в целях землеустройства или разработки мер защиты. Он отличается большей потребностью в данных, необходимых для расчета опасности и параметров уязвимости, и множеством ограничений в отношении детального анализа дальности перемещения оползней, который можно выполнить, а также в отношении учета их кинематики. Площадной анализ обычно выполняется в региональном масштабе и реализуется на платформах ГИС, при этом для иллюстрации рисков используются карты [255]. Эти риски могут выражаться как годовые денежные потери на пиксель или на единицу площади либо через вероятность заданного сценария риска [280].

Анализ рисков для линейных объектов, например автомобильных или железных дорог, является очень распространенной процедурой. Риск в таких случаях может быть рассчитан или для всей линии, или для некоторых ее выбранных участков, особенно для тех, которые подвергаются наибольшему риску. Этот анализ не обязательно требует оценки частоты в зоне зарождения, но данные по инвентаризации событий, которые достигали инфраструктуры, должны быть как можно более полными. С другой стороны, если возникновение оползня оценивается в зоне зарождения, все равно необходим анализ его распространения (перемещения, продвижения) [273]. Несмотря на то что интенсивность оползня лучше всего говорит о потенциальном ущербе от него, она редко учитывается при таком типе анализа [234, 245].

Объектно-ориентированный анализ выполняется для зданий, небольших участков дорог или других конкретных объектов. Оползневый анализ обычно проводится с использованием аналитических и/или численных моделей и включает в себя расчет пространственных параметров, которые влияют на вероятность того, что оползень заданной величины или с заданной скоростью достигнет незащищенного объекта. Ограничения в этом случае могут быть вызваны нехваткой данных, необходимых для правильной оценки вероятности или частоты события. Риск может быть выражен в виде годовых денежных потерь на объект либо годовой вероятности повреждения имущества или гибели людей при разных сценариях риска.

### **Подверженность риску**

Подверженность является атрибутом людей, имущества, систем или других объектов, присутствующих на территориях, которые потенциально могут быть затронуты оползнями. Она рассчитывается как временная и пространственная вероятность того, что объект риска находится на пути оползня, и ее также необходимо учитывать в уравнении риска. Расчет степени подверженности зависит главным образом от масштаба анализа и типа потенциально подверженного объекта. Подвержен объект риску или нет, определяется его расположением по отношению к траектории оползня, которая варьирует в зависимости от механизма события. Для подверженности есть важное различие между статическими (зданиями, дорогами, другими объектами инфраструктуры и т.д.) и движущимися (транспортными средствами, людьми и др.) объектами.

### **Статические объекты**

При камнепаде затрагиваемые им объекты находятся на его пути. Объекты, подверженные воздействию камнепада с фрагментацией отделившегося от склона материала, имеют ограниченное количество пространственных пересечений с траекториями падающих камней, а для каменных лавин и обвалов скальных пород число пересечений больше. Для камнепадов с фрагментацией и при малых масштабах анализа с низким разрешением принимается, что все объекты рядом с предрасположенными к камнепадам скальными склонами и обрывами подвержены возможному воздействию таких событий. При детальных (сайт-специфичных) и локаль-

ных масштабах и когда учитывается траектория анализ подверженности ограничивается только объектами, которые расположены в пределах потенциального пути камнепада. В последнем случае компонент подверженности варьирует в зависимости от размера падающего блока.

Вероятность воздействия может быть получена путем учета процентной доли площади, содержащей здания/сооружения в одном или нескольких контрольных участках, достигаемых камнепадом [254, 331]. В случае анализа в большом масштабе, при котором требуется детальная информация о пространственной вероятности достижения камнями зданий, могут быть вычислены вероятности траекторий отдельных падающих блоков. При камнепадах из некоторых зон их зарождения возникают траектории, которые имеют более высокие вероятности воздействий на одни здания, чем на другие, – и это необходимо учитывать.

Обломочные потоки могут воздействовать на большие территории, чем камнепады, из-за их повышенной подвижности и возможности затопления. В некоторых случаях они затрагивают целые городские районы. Пространственная подверженность территории воздействию для таких случаев может быть рассчитана как отношение затронутой потоком площади к общей площади. Будет ли это отношение рассчитываться как функция кинематики потока (например, расхода) или нет, зависит от доступности информации о распространении (продвижении) обломочного потока в рассматриваемом масштабе анализа, как уже упоминалось ранее.

В случае медленного оползня подверженные его воздействию объекты могут располагаться на нем, рядом с бровкой отрыва или на его пути. Из-за этого применяемые действия и причиненный ущерб могут быть разными. Опять же, подверженность каждого объекта может быть рассчитана как функция кинематики оползня, если масштаб и разрешение анализа позволяют это сделать.

Кинематический анализ необходим для расчета подверженности воздействию для линейных сооружений, таких как автомобильные и железные дороги, когда рассчитываются частота или вероятность возникновения оползня в зоне зарождения. Если же этот анализ проводится для точек непосредственного пересечения траектории оползня с

инфраструктурой, то подверженность равна единице.

### *Движущиеся объекты*

Количественная оценка временных и пространственных вероятностей движущихся объектов должна учитывать характеристики их движения. Транспортные средства могут подвергаться воздействию оползней по-разному. Они могут быть затронуты во время остановки или движения, поражены камнем или массой дисперсного грунта, могут врезаться в камень или массу грунта, которые уже оказались на дороге. Также следует учитывать транспортные средства, засыпанные или вовлеченные в обломочный поток или оползень скольжения и ставшие частью движущейся массы.

Вероятность воздействия может быть рассчитана для прямого удара камнями или массой дисперсного грунта по транспортным средствам. Это зависит, помимо прочих факторов, от интенсивности (частоты) транспортного потока, размера фрагментов скальных пород либо геометрических характеристик обломочного потока или оползня скольжения, а также от длины транспортных средств. Основные упрощающие допущения, которые обычно принимаются для подверженности транспортных средств, заключаются в том, что эти движущиеся объекты равномерно распределены во времени и в пространстве и что все они имеют одинаковую длину [245].

Временная и пространственная вероятность того, что движущаяся масса скальных или дисперсных грунтов пересечется с определенным неподвижным транспортным средством, пропорциональна длине этого объекта. Для множественных событий вероятность того, что ни одно транспортное средство не будет задето, определяется по формуле:

$$P(S) = 1 - (1 - P(S : H))^{N_r}, \quad (12)$$

где  $P(S:H)$  – вероятность того, что транспортное средство окажется на участке дороги, затронутом оползнем;  $N_r$  – количество событий.

Для конкретного движущегося транспортного средства временная вероятность пересечения с оползневым материалом также рассчитывается как функция времени пребывания, которое зависит от интенсивности (частоты) движения транспорта, а также от средней длины и скорости движущихся объектов.

Шириной скальной или дисперсной грунтовой массы обычно пренебрегают.

Люди также подвергаются воздействию оползней, находясь на открытых пространствах, в зданиях или в транспорте. В этом контексте временная и пространственная вероятность пересечения траекторий движения (или места нахождения) человека и оползня рассчитывается как функция подверженности здания или транспортного средства, в котором находится человек, и процента времени и/или пространства нахождения человека там [34]. Таким образом, для людей внутри зданий вероятность пересечения зависит от их использования здания и их нахождения в нем в течение определенных промежутков времени. В некоторых случаях (например, на горнолыжных курортах), где численность населения меняется в зависимости от сезона, следует также учитывать сезонную подверженность. Анализ риска может быть выполнен либо для наиболее подверженных людей, либо для людей со средней степенью подверженности оползневому воздействию.

### *Вычисление рисков*

Примеры применения количественного анализа рисков обобщены в таблице 19. Хотя в некоторых из представленных случаев компоненты риска не рассчитываются строго количественно, предлагаемые методы дают количественные результаты.

Практические примеры при детальном масштабе оценки приводятся в литературе для людей внутри транспортных средств во время камнепадов [34] и обломочных потоков [213, 266]. Авторы работы [334] рассматривают как прямой удар обломочного материала по транспортным средствам, так и риск того, что транспорт натолкнется на уже отложенный обломочный материал. В публикации [336] на конкретном примере также описывается расчет кривых «частота – смертность» для людей, уязвимость рассчитывается эмпирически (на основе прошлых данных) как функция расхода обломочного материала. Процедура, представленная в статье [314], в основном основана на эвристических и эмпирических данных и может использоваться в региональном масштабе для анализа риска для зданий в отношении как обломочных потоков, так и камнепадов.

Если говорить о более детальном масштабе, то авторы публикаций [243, 255] разработали аналитическую про-

Таблица 19. Примеры применения количественного анализа рисков

Типы оползней по их механизмам	Учет интенсивности оползня	Объекты риска	Особые характеристики	Ссылки
Обломочные потоки и неглубокие оползни скольжения	Нет	Люди, линейные сооружения и здания	Рассчитывается риск в каждом пикселе	[332, 333]
		Люди внутри транспортных средств	Рассчитывается риск по отношению к конкретным участкам дороги в виде вероятности	[213, 266, 334]
	Да	Здания, люди	Эвристическая (основанная на суждениях экспертов) или эмпирическая оценка параметров риска	[314, 335]
		Люди	Уязвимость является функцией расхода обломочного материала	[336]
Камнепады	Да	Здания, люди внутри зданий	Рассчитывается интенсивность на контрольном участке	[254]
		Здания	Рассчитывается интенсивность для каждого объекта риска	[243, 255, 337]
	Нет	Движущиеся объекты (люди, транспортные средства)	Одинаковым образом для всех объектов риска рассчитывается подверженность риску	[234, 245, 284]
Медленные оползни	Да	Здания	Уязвимость и риск выражаются через экономические показатели	[290]
Различные типы	Нет	Люди, линейные сооружения и здания	Практические примеры – в детальном, локальном и региональном масштабах	[34, 338–341]

цедуру для количественного анализа рисков, относящуюся к камнепадам, на основе результатов обратного анализа реального камнепадного события, которые включали данные о повреждениях зданий. В статье [254] рассмотрен пример количественной оценки рисков попадания камней в людей внутри зданий. Авторы работы [337] предложили методику анализа рисков для зданий в отношении камнепада в детальном (сайт-специфическом) масштабе, которая включала аналитическую оценку вероятностной уязвимости зданий как функции места удара камнем. В статье [284] представлена методика расчета риска, которому подвергаются люди, находящиеся внутри движущихся по дороге транспортных средств.

Для медленных оползней (среди прочих их типов) авторы работы [290] предложили метод, который дает результаты в виде ожидаемых экономических потерь, связанных со зданиями, с использованием данных дистанционного зондирования.

И наконец, в статьях [14, 26] представлены практические примеры расчета рисков для разных объектов риска и типов оползней, уделив особое внимание расчету кривых вероятности количества жертв.

### Сценарии рисков ►

На исследуемой территории с определенными геоэкологическими условиями разные стадии движения суще-

ствующих или потенциальных оползней заданного типа контролируются механизмами, которые часто являются взаимосвязанными [342]. Их геометрические и кинематические характеристики могут, в свою очередь, различаться в зависимости от факторов, которые вызывают и сопровождают процессы, связанные с неустойчивостью склона [343, 344], что приводит к разным сценариям риска. Поэтому, независимо от масштаба анализа риска оползней и принятого зонирования, необходимо понимать механизмы оползней, которые могут возникнуть на изучаемой территории. Таким образом, можно рассмотреть несколько сценариев оползневой опасности (не обязательно наихудший случай) вместе с их потенциальными последствиями, чтобы можно было количественно оценить соответствующие прямые и косвенные компоненты риска.

Общий риск должен быть получен при объединении рисков, связанных с рядом оползневых опасностей [34, 345]. Суммирование значений разных рисков по нескольким сценариям подразумевает гипотезу о том, что каждый рассматриваемый сценарий реализуется независимо. На основе этого часто принимается, что схожие механизмы оползней с очень разными величинами и вероятностями возникновения дают разные сценарии.

Общая формулировка риска на основе сценария приводится в работе [273], при этом особое внимание в ней уделяется анализу последствий. Примеры,

относящиеся к этой теме, приведены в публикациях [207, 346].

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КАРТ ОПОЛЗНЕВОГО ЗОНИРОВАНИЯ ►

Оценка неопределенностей, устойчивости (робастности – *robustness*) и достоверности карты оползневое зонирования является сложной задачей.

Поскольку карты предрасположенности территорий к оползням, оползневых опасностей и рисков прогнозируют будущие события, наилучшим методом оценки было бы «подождать и посмотреть», проверить эффективность зонирования на основе событий, которые произошли после того, как были составлены карты. Однако это непрактичное решение, несмотря на то что последующие события могут обеспечить качественную степень уверенности для пользователей карт при условии, что понятны ограничения рассматриваемого периода времени, который неизбежно очень короток.

Проверка эффективности моделей является многокритериальной задачей, охватывающей:

- 1) адекватность (концептуальную и математическую) модели при описании системы;
- 2) ошибкоустойчивость (робастность) модели при небольших изменениях во входных данных (например, чувствительность к данным);
- 3) точность модели при прогнозировании данных [347, 348].

На практике эффективность модели оценивается с использованием данных инвентаризации оползней за определенный период времени и путем проверки результата с помощью другой инвентаризации за более поздний период. Однако сами инвентаризационные оползневые карты могут характеризоваться высокими уровнями неопределенности [52, 349].

Другой способ оценки эффективности модели – сравнение карт одной и той же территории, составленных независимо разными командами, хотя это оказалось довольно сложным [56, 350].

Чтобы охарактеризовать прогностическую эффективность карты зонирования, результаты инвентаризации оползней должны быть разделены на две группы (одна из которых используется для создания карты, а вторая – для анализа ее точности). Это можно сделать, используя случайную выборку оползней или применяя две карты инвентаризации, различающиеся по времени составления. Хорошее представление о прогностической точности также может дать сравнение карт зонирования, созданных разными методами.

В этом разделе представлен обзор методов, которые можно использовать для оценки эффективности карт предрасположенности территорий к оползням и карт оползневой опасности. Термин «эффективность» (performance) здесь применяется для отражения того, насколько правильно карты зонирования проводят различия между территориями, потенциально предрасположенными и не предрасположенными к возникновению оползней.

### Неопределенности и ошибкоустойчивость (робастность) карт оползневого зонирования ▶

Природа неопределенностей и тенденции к использованию более сложных моделей (например, путем перехода от эвристических к статистическим и основанным на процессах моделям) обуславливают необходимость в усовершенствованных инструментах идентификации и оценки моделей [351, 352] для доказательства того, что повышенная сложность действительно обеспечивает более хорошие результаты моделирования.

Для оценки оползневых моделей обычно учитываются алеаторные (связанные с внутренними свойствами системы – со случайным характером изучаемых процессов и явлений) и эпи-

стемические (связанные с недостатком знаний или данных) неопределенности. Различия в интерпретации данных специалистами, участвующими в зонировании, относятся к эпистемическим неопределенностям.

Термин «ошибкоустойчивость» («робастность» – robustness) относится к изменению точности классификации из-за пертурбаций (нарушений, изменений) в процессе моделирования [353]. Анализ ошибкоустойчивости часто фокусируется только на нарушениях в работе модели из-за ошибок во входных параметрах [354]. В этом контексте термин «чувствительность» (sensitivity) [355] используется для идентификации ключевых неопределенных параметров, которые больше всего влияют на неопределенность выходных данных (для глобального анализа чувствительности), и для выделения параметров, которые оказывают наибольшее влияние на сами выходные данные, но не на их неопределенность (для локального анализа чувствительности).

Для оценки качества зонирования оползней можно рассмотреть использование количественных методов, основанных на дисперсии, для анализа глобальной чувствительности (например, для исследования влияния масштаба и формы распределения параметров) и применение графических методов для анализа локальной чувствительности [104]. Для внесения изменений в различные входные параметры используются вероятностные методы, основанные на теории моментов, поскольку они позволяют получать результаты в виде математических функций, а не уникальных значений [356]. Такие подходы дают возможность получать выходные данные на основе нескольких теоретических наборов входных данных и выводить доверительные интервалы, охватывающие эти обратные пути.

Авторами работ [289, 357–359] был выполнен анализ чувствительности входных параметров при оценке качества оползневого зонирования в детальном (сайт-специфическом) и локальном масштабах. В региональном масштабе анализ чувствительности возможен как для многомерных статистических моделей, так и для моделей процессов. Связанные гидрологические модели и модели устойчивости склонов, которые применяют метод «бутстреп» (bootstrap, bootstrapping – компьютерный метод, основанный на многократной генерации выборок методом Монте-Карло на базе имеющейся выборки и позволяющий

оценивать статистические характеристики для сложных моделей. – Ped.), показывают, что физическое моделирование, основанное на средних значениях, не всегда может быть практичным [360]. В статьях [90, 104, 361] представлены другие примеры. В отношении многомерных статистических моделей только несколько статей посвящено оценке ошибкоустойчивости (робастности) путем создания ансамблей моделей, откалиброванных для разных выборок оползней из одного и того же инвентаризационного набора [56, 362, 363] или путем калибровки моделей для разных инвентаризаций оползней для одного и того же региона [364]. В нескольких работах изучалось влияние разных классификаций независимых переменных, полученных по литологическим, почвенным картам или картам почвенно-растительного покрова [365]. А, например, авторы статьи [354] определили показатель робастности (ошибкоустойчивости), отражающий чувствительность к изменениям в наборе данных независимых (предикторных) переменных.

### Точность карт зонирования ▶

Ни одна из представленных в литературе методик оценки точности моделей оползневого зонирования не учитывает экономические издержки из-за неправильной классификации, которые становятся важными, когда зонирование применяется на практике для планирования использования земель. Это является существенным ограничением для анализа предрасположенности территорий к оползням, поскольку расходы из-за неправильной классификации варьируют в зависимости от типов ошибок. Последние могут быть следующими.

1. *Ошибка типа I (ошибочно положительная классификация)* – когда реальная территориальная единица без оползней классифицируется в модели как неустойчивая (есть или могут быть оползни) и, следовательно, имеющая ограничения в использовании и экономическом развитии. Следовательно, стоимость потерь из-за ошибочно положительной классификации соответствует потере экономической ценности таких территориальных единиц. Эта стоимость различна для разных единиц, поскольку является функцией экологических и социально-экономических характеристик.

2. *Ошибка типа II (ошибочно отрицательная классификация)* – когда реальная территориальная единица с

**Таблица 20. Таблица сопряженности, используемая для оценки эффективности предсказаний по модели оползневого зонирования**

Предсказание по модели	Положительный результат наблюдений (есть или может быть оползень, неустойчивая территориальная единица)	Отрицательный результат наблюдений (нет или не может быть оползень, устойчивая территориальная единица)	-
Положительное предсказание (есть или может быть оползень, неустойчивая территориальная единица)	Истинно положительное предсказание (True Positive, TP)	Ошибочно положительное предсказание (False Positive, FP)	> Положительное прогностическое значение
Отрицательное предсказание (нет или не может быть оползень, устойчивая территориальная единица)	Ошибочно отрицательное предсказание (False Negative, FN)	Истинно отрицательное предсказание (True negative, TN)	> Отрицательное прогностическое значение
-	$\frac{TP}{TP+FP}$ Чувствительность	$\frac{TN}{TN+FP}$ Специфичность	-

оползнями классифицируется в модели как устойчивая (нет или не может быть оползней) и, следовательно, может использоваться без ограничений. Стоимость потерь из-за ошибочно отрицательной классификации соответствует потере объектов, которые могут быть затронуты оползнями в пределах таких территориальных единиц.

В моделях оползневого зонирования издержки, связанные с ошибками типа II, обычно намного больше, чем затраты, связанные с ошибками типа I. Например, размещение такого общественного объекта, как здание школы, на территориальной единице, которая ошибочно определена как устойчивая (то есть сделана ошибка типа II), может привести к очень большим социальным потерям и экономическим затратам.

Далее представлены различные методы оценки эффективности оползневых моделей.

#### **Статистические характеристики точности, зависящие от порогового значения**

Точность оценивается путем анализа соответствия между выходными данными модели и результатами наблюдений. Поскольку результаты наблюдений говорят о наличии или отсутствии оползней в пределах определенной территориальной единицы, более простой метод оценки точности модели заключается в сравнении этих данных с двоичной классификацией предрасположенности территории к оползням на устойчивые и неустойчивые единицы. Такая классификация требует порогового (cutoff) значения предрасположенности, которое делит зоны на устойчивые (с предрасположенностью меньше пороговой) и не-

устойчивые (с предрасположенностью больше пороговой).

Сопоставление результатов наблюдений и модельных данных после их переклассификации на эти два класса представляют в виде таблиц сопряженности признаков (contingency tables) (таблица 20). Статистические характеристики точности оценивают эффективность модели путем объединения правильно (истинно) и неправильно (ошибочно) классифицированных положительных и отрицательных по оползневой опасности случаев (таблица 21).

Эффективность, которая выражается через процент случаев, правильно классифицированных моделью, не достоверна, поскольку на ее оценку сильно влияет наиболее распространенный класс (обычно «устойчивая единица площади»), и она не является объективной (например, получается одинаковая оценка для разных типов неклассифицированных выполненных классификаций). Это необходимо учитывать.

Истинно положительный (True Positive, TP) и ошибочно положительный (False Positive, FP) показатели – недостаточные статистические характеристики эффективности модели, поскольку они игнорируют ошибочно положительные и ошибочно отрицательные результаты соответственно. Они не являются объективными и полезны только при использовании в сочетании с чем-то еще (например, с «кривыми ошибок оценки», то есть ROC-кривыми, отражающими зависимость «чувствительность – частота ошибочно положительных заключений» и показывающими прогностическую ценность модели).

Показатель успешности оценки угрозы (threat score) [367] показывает долю наблюдаемых и/или классифицирован-

ных событий, которые были предсказаны правильно. Этот показатель не различает источники ошибок классификации. Более того, он зависит от частоты событий (поэтому более плохие оценки точности получаются для более редких событий, то есть обычно для более крупных оползней), поскольку некоторые истинно положительные предсказания могут получаться исключительно из-за случайности.

В качестве альтернативы можно использовать критерий Пирса (Peirce skill score), являющийся показателем дискриминирующей способности [368], или отношение шансов (odds ratio), то есть соотношение вероятностей наступления и ненаступления события [369].

Статистика точности требует разделения классифицированных объектов на несколько классов путем определения конкретных значений показателя предрасположенности территории к оползням, которые называются пороговыми (cutoff). Для статистических моделей существует статистически значимая пороговая вероятность ( $p[cutoff]$ ), равная 0,5. Когда группы устойчивых и неустойчивых единиц площади равны по размеру и приближаются к нормальному распределению, это значение максимизирует количество правильно предсказанных устойчивых и неустойчивых единиц. Однако порог, используемый для определения классов предрасположенности, выбирается произвольно и, если не принят стоимостный критерий [370], зависит от цели карты, количества классов и типа используемого подхода к моделированию.

Первое решение этой проблемы состоит в оценке эффективности модели в широком диапазоне пороговых значе-

Таблица 21. Обычно используемые статистические характеристики точности

Статистическая характеристика точности	Формула
Эффективность (точность или процент истинности)	$\frac{t_p + t_n}{T}$
Эффективность истинно положительных предсказаний (степень чувствительности)	$\frac{t_p}{t_p + f_n} = \frac{t_p}{P} = 1 - f_n$
Эффективность ошибочно положительных предсказаний (степень специфичности)	$\frac{f_p}{f_p + t_n} = \frac{f_p}{N} = 1 - t_n$
Критический показатель успешности оценки угрозы – показатель степени соответствия результатов прогнозов и наблюдений (threat score, critical success rate)	$\frac{t_p}{t_p + f_n + f_p}$
Критерий Пирса – показатель дискриминирующей способности (Peirce skill score, true skill statistic)	$\frac{t_p}{t_p + f_n} - \frac{f_p}{f_p + t_n}$
Критерий Хайде – показатель оправдываемости прогнозов [366] (коэффициент каппа Коэна) (Heidke skill score (Cohen's kappa))	$\frac{t_p + t_n - E}{T - E}$ , где $E = \frac{1}{T} [(t_p + f_n)(t_p + f_p) + (t_n + f_n)(t_n + f_p)]$
Отношение шансов – соотношение вероятностей наступления и ненаступления события (Odds ratio)	$\frac{t_p * t_n}{f_n * f_p}$
Коэффициент ассоциации Юла (Q) – показатель тесноты связи признаков из двух групп в перекрестной таблице (Yule's Q, Odds ratio skill score)	$\frac{t_p * t_n - f_p * f_n}{t_p * t_n + f_p * f_n}$

**Примечание:**  $t_p$  – количество истинно положительных прогнозов; количество случаев  $t_n$  – количество истинно отрицательных прогнозов,  $f_p$  – количество ошибочно положительных прогнозов (число ошибок типа I),  $f_n$  – количество ошибочно отрицательных прогнозов (число ошибок типа II);  $P$  – число положительных прогнозов ( $t_p + f_n$ ),  $N$  – число отрицательных прогнозов ( $f_p + t_n$ ),  $T$  – общее число наблюдений (см. также таблицу 20).

ний с использованием независимых от порога критериев эффективности.

Другой вариант состоит в поиске оптимального порогового значения путем минимизации стоимости.

### Статистические показатели точности, не зависящие от порогового значения: кривые ROC и SR

Наиболее часто используемые методы оценки эффективности моделей зонирования оползней, не зависящие от пороговых значений, – «кривые ошибок оценки» (кривые ROC – Receiver Operating Characteristic) и «кривые успешности оценки» (кривые SR – Success Ratio, Success Ratio).

ROC-анализ в свое время был разработан для оценки эффективности радиолокационных приемников при обнаружении целей, но с тех пор он был принят в различных научных областях [371, 372]. Площадь под ROC-кривой (area under curve, AUC) может использоваться как показатель общего качества модели [373]: чем больше эта площадь, тем лучше эффективность модели для всего диапазона возможных пороговых значений. Точки на ROC-кри-

вой соответствуют координатам (FP, TP), полученным из различных таблиц сопряженности, созданных путем применения разных пороговых значений (рис. 4, а). Точки, расположенные ближе к верхнему правому углу, соответствуют более низким порогам. Из двух ROC-кривых лучше та, которая расположена ближе к верхнему левому углу. Диапазон значений, для которых ROC-кривая лучше тривиальной модели (например, модели, классифицирующей объекты случайным образом и представленной в пространстве ROC прямой линией, соединяющей нижний левый и верхний правый углы; например, линия «1 – 1» на рисунке 4, а), определяется как рабочий диапазон. Когда точность модели оценивается с использованием данных, которые не применялись при разработке модели, модель является хорошей, если ROC-кривые для наборов оценочных и производственных данных расположены в ней близко друг к другу, а значения площади под кривой больше 0,7 (умеренная точность) или даже больше 0,9 (высокая точность) [374].

При построении SR-кривых [375, 376] для оценок оползневого зонирова-

ния (рис. 4, б) по оси Y обычно откладывается процент суммарной площади (или количество) правильно классифицированных оползней. В случае ячеек сетки, где оползни соответствуют отдельным ячейкам и все единицы площади одинаковы, оси Y соответствуют истинно положительные (TP) результаты (аналогично пространству ROC), а оси X соответствует число единиц, классифицированных как положительные.

### Стоимостные кривые

При оценке эффективности модели с помощью ROC-кривых можно учесть издержки в случае неправильной классификации, используя дополнительную процедуру [370]. Но получаемые при этом результаты трудно визуализировать и оценивать.

Стоимостные кривые [377] показывают нормализованную ожидаемую стоимость как функцию зависимости «вероятность – стоимость» (рис. 5), где ожидаемые издержки нормализованы по отношению к максимальным ожидаемым издержкам, которые возникают, когда все случаи классифицированы ошибочно (например, когда и FP, и FN равны единице). Максимальная

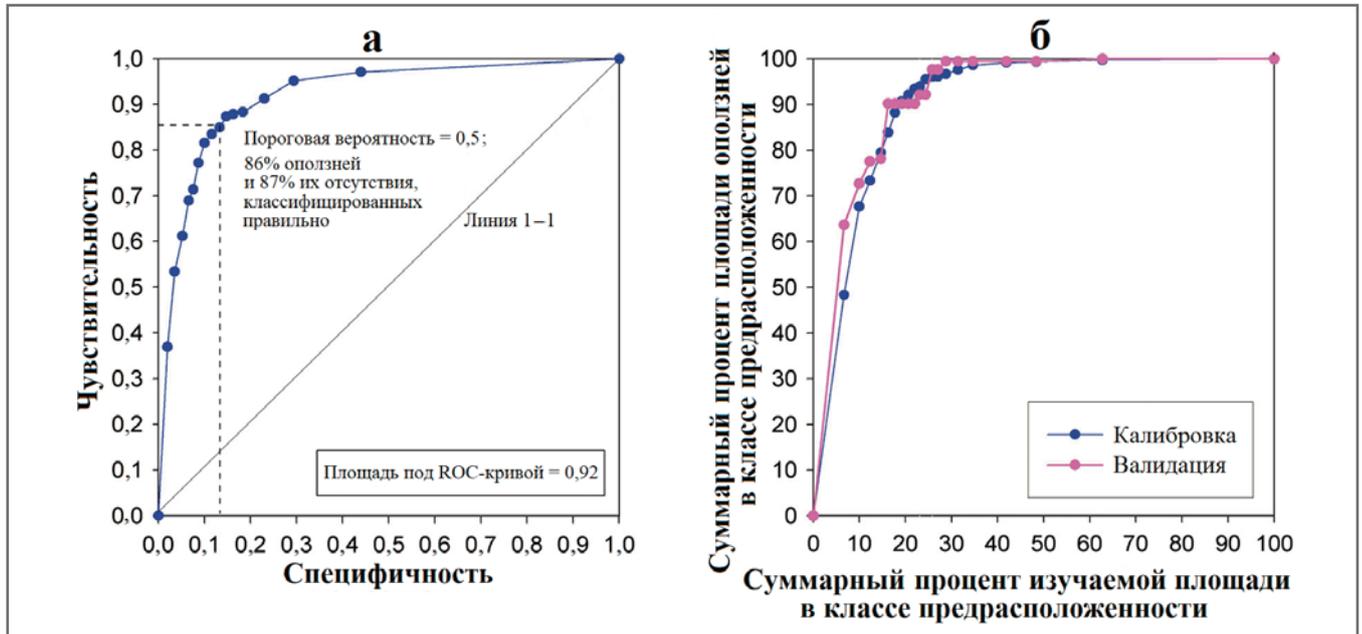


Рис. 4. Примеры ROC-кривой (а) и SR-кривой (б) (по [56])

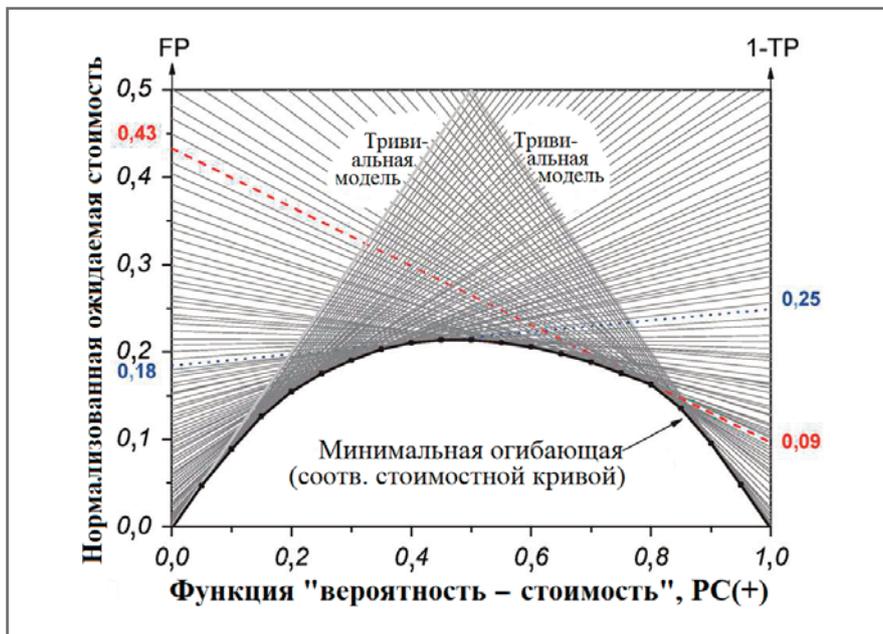


Рис. 5. Пример получения стоимостной кривой. Каждая прямая соответствует точке на ROC-кривой. Например, красная штриховая линия соответствует точке с чувствительностью (TP), равной 0,91, и разности «1 – специфичность» (FP), равной 0,43 [378]

нормализованная стоимость равна единице, а минимальная – нулю.

Таким образом, единственная модель классификации, которая представляла бы собой единственную точку с координатами (FP, TP) в пространстве ROC, соответствует прямой линии в представлении стоимостной кривой (см. рис. 5). Чем ниже стоимостная кривая, тем лучше точность модели, а разница между двумя моделями заключается просто в расстоянии по вертикали между соответствующими им кривыми.

Для получения стоимостных кривых необходимо определить значение функ-

ции «вероятность – стоимость», которая зависит как от априорной вероятности, так и от издержек в случае неправильной классификации. Для моделей оползневого зонирования при учете неопределенности в наблюдаемом распределении совокупности оползней, разумным выбором является условие равновероятности [378].

Издержки в случае ошибочной классификации зависят от участка и значительно различаются в пределах изучаемой территории. Строгий анализ мог бы позволить выполнить их независимую оценку для каждой территориальной

единицы и оценить общие издержки, суммируя затраты, возникающие в результате принятия каждой модели. Это потребует вклада администраторов и политиков из местных (муниципальных) и национальных органов власти.

Чтобы оценить среднюю стоимость для ошибочно отрицательных и ошибочно положительных прогнозов, можно использовать карту землепользования для расчета как площади, занимаемой объектами, потенциально подверженными риску (например, вносящими вклад в стоимость ошибочно отрицательных прогнозов), так и площади, потенциально пригодной для застройки (например, вносящей вклад в стоимость ошибочно положительных прогнозов) [378].

По этой причине карты прогнозируемой предрасположенности территорий к оползням должны быть тщательно проанализированы и критически рассмотрены перед обнародованием результатов. «Настройка» статистических методов и независимая валидация результатов уже признаны совершенно необходимыми этапами при любом исследовании природных опасностей для оценки точности и прогностической способности модели. Валидация может также позволить установить степень уверенности в модели и сравнить результаты, получаемые с помощью разных моделей. По этой причине также должна быть проверена пространственная согласованность карт подверженности территории к оползням, полученных с помощью разных моделей, особенно если эти модели характеризуются схожей прогностической способностью.

## Ограничения на использование статистических характеристик точности ►

Применение каждого статистического показателя надежно только при определенных условиях (например, при редких или при частых событиях). Их следует оценивать в каждом конкретном случае, чтобы выбрать наиболее подходящий метод [369]. Это – ограничение на общее применение статистических характеристик для оценок качества оползневых зонирования.

Для статистических моделей простым и научно правильным является использование показателей точности, зависящих от порогового значения, поскольку оно статистически значимо. Это верно, только если принимаются равные априорные вероятности и равные издержки в случае ошибочной классификации – условия, которые обычно нарушаются в оползневых моделях. Для других видов моделей зонирования (эвристических, физически обоснованных) нет теоретических оснований для выбора определенного порогового значения, поэтому применение статистических показателей точности не годится.

Оценка эффективности карт оползневых зонирования с не зависящими от порогового значения критериями имеет то преимущество, что априорное пороговое значение не требуется и эффективность может быть оценена для всего диапазона порогов. Кривые ROC и SR дают разные результаты, поскольку ROC-кривая основывается на анализе классификации статистических единиц и описывает способность статистической модели различать два класса объектов, в то время как SR-кривая основывается на анализе пространственного соответствия между фактическими оползнями и картами зонирования и, таким образом, учитывает площади как

оползней, так и территориальных единиц, а не только количество единиц, правильно или неправильно классифицированных.

SR-кривые связаны с некоторыми теоретическими проблемами, когда они применяются к моделям с ячейками сетки. Количество истинно положительных прогнозов фактически вносит вклад в значения, отложенные как по оси X, так и по оси Y. Увеличение числа истинно положительных прогнозов вызывает сдвиг кривой вверх (в сторону более хорошей эффективности) и вправо (в сторону более плохой эффективности). В некоторых случаях сдвиг вправо может происходить быстрее, чем вверх, вызывая кажущуюся потерю эффективности при увеличении количества истинно положительных прогнозов, а такая оценка эффективности явно обманчива. Более того, SR-кривая чувствительна к начальным соотношениям количеств положительных и отрицательных прогнозов. Следовательно, применение SR-кривых к территориям с низкой степенью опасности (например, с ровным рельефом лишь с небольшими крутыми участками) всегда даст более хорошие результаты, чем их использование для территорий с высокой степенью опасности (например, для горных долин с крутыми склонами), даже если качество классификации абсолютно одинаково.

Важным ограничением является то, что вышеупомянутые статистические показатели не являются пространственно явными и, соответственно, схожие формы кривых ROC и SR могут отражать разные пространственные случаи прогнозируемых устойчивых и неустойчивых территориальных единиц [379].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

В этой статье были рассмотрены ключевые компоненты количественно-

го анализа оползневых рисков (КолАР), который позволяет ученым и инженерам объективно и воспроизводимо оценивать риски и сравнивать результаты, полученные в разных местах (участках, регионах и т.д.). Важно понимать, что оценки рисков – это это всего лишь оценки. Ограничения на доступную информацию и использование чисел могут таить существенные потенциальные ошибки. В этом отношении результаты КолАР не обязательно являются более точными, чем качественные оценки, поскольку, например, вероятность может рассчитываться на основе личных суждений. Однако КолАР облегчает общение между специалистами в области наук о Земле, землевладельцами и лицами, принимающими решения.

Были представлены рекомендуемые методики количественного анализа оползневой опасности, уязвимости и риска в разных масштабах (детальном, локальном, региональном и национальном), а также методы верификации и валидации результатов. Рассмотренные методики сфокусированы на оценке вероятностей возникновения различных типов оползней с определенными характеристиками.

Также рассмотрены: методы определения пространственного распределения интенсивности оползней, объекты риска, оценка потенциальной степени ущерба, количественная оценка уязвимости объектов риска, а также КолАР.

Статья предназначена для ученых, инженеров-практиков, геологов и других специалистов по оползням. **И**

*Авторы выражают благодарность за поддержку проекта SafeLand (по грантовому соглашению 226479), финансируемого Европейской комиссией в рамках ее Седьмой рамочной программы.*

## ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

### (SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Corominas J., Van Westen C., Frattini P., Cascini L., Malet J.-P., Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M.G., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervás J., Smith J.T. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2014. Vol. 73. № 2. P. 209–263. DOI:10.1007/s10064-013-0538-8. URL: [https://www.researchgate.net/publication/259032330\\_Recommendations\\_for\\_the\\_quantitative\\_analysis\\_of\\_landslide\\_risk](https://www.researchgate.net/publication/259032330_Recommendations_for_the_quantitative_analysis_of_landslide_risk).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

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

1. Fell R., Corominas J., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes) // Eng. Geol. 2008. Vol. 102. P. 85–98.

2. TC32 – Technical Committee 32 (Engineering Practice of Risk Assessment and Management) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). Risk assessment – glossary of terms. 2004. URL: [http://www.engmath.dal.ca/tc32/2004Glossary\\_Draft1.pdf](http://www.engmath.dal.ca/tc32/2004Glossary_Draft1.pdf).
3. Terminology of disaster risk reduction. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UN-ISDR). 2004. URL: <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.htm>.
4. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // Landslides – investigation and mitigation: Transportation Research Board Special Report № 247 (ed. by A.T. Turner, R.L. Schuster). Washington, DC: National Academy Press, 1996. P. 36–75.
5. Hungr O., Evans S.G., Bovis M.J., Hutchinson J.N. A review of the classification of landslides of the flow type // Environ. Eng. Geosci. 2001. Vol. VII. № 3. P. 221–238.
6. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. Varnes classification of landslide types, an update // Eberhardt E., Froesse C., Turner A.K., Leroueil S. (eds.). Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding. Boca Raton: CRC Press, 2012. Vol. 1. P. 47–58.
7. IAEG Commission on Landslides. Suggested nomenclature for landslides // Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 1990. Vol. 41. P. 13–16.
8. Petley D.N. Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding // Eberhardt E., Froese C., Turner A.K., Leroueil S. (eds.). Landslides and engineered slopes. London: CRC, 2012. Vol. 1. P. 3–13.
9. OFAT, OFEE, OFEFP. Recommandations 1997: prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Berne: OCFIM, 1997. 42 p.
10. Assessment of landslide risk in natural hillsides in мащрабах Kong: Report № 191. Hong Kong: Hong Kong Geotechnical Engineering Office (GEO), 2006. 117 p.
11. AGS. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management // Aust. Geomech. Australian Geomechanics Society (AGS) Landslide Taskforce Landslide Zoning Working Group, 2007. Vol. 42. № 1. P. 13–36.
12. Fell R., Corominas J., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes) // Comment. Eng. Geol. 2008. Vol. 102. P. 99–111.
13. Corominas J. et al. (eds.). SafeLand Deliverable D2.1: overview of landslide hazard and risk assessment practices. 2010. URL: <http://www.safeland-fp7.eu/>.
14. Lee E.M., Jones D.K.C. Landslide risk assessment. London: Thomas Telford, 2004. 454 p.
15. Glade T., Anderson M., Crozier M.J. Landslide hazard and risk. Chichester: Wiley, 2005. 802 p.
16. Smith K., Petley D.N. Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster. London: Taylor & Francis, 2008.
17. Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? // Bull. Eng. Geol. Environ. 2005. Vol. 65. P. 167–184.
18. IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment. Quantitative risk assessment for slopes and landslides – the state of the art // Cruden D., Fell R. (eds.). Landslide risk assessment. Amsterdam: A.A. Balkema, 1997. P. 3–12.
19. Brabb E.E., Pampeyan E.H., Bonilla M.G. Landslide susceptibility in San Mateo County, California // Misc. Field Studies, map MF-360 (scale 1:62500). Reston: US Geological Survey, 1972.
20. Humbert M. Les mouvements de terrains // Principes de realisation d'une carte previsionnelle dans les Alpes // Bull. du BRGM. Sect. III. 1972. Vol. 1. P. 13–28.
21. Kienholz H. Map of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10000 // Artic Alp. Res. 1978. Vol. 10. P. 169–184.
22. Brand E.W. Special lecture: landslide risk assessment in Hong Kong // Proceedings of the V International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland. Amsterdam: A.A. Balkema, 1988. Vol. 2. P. 1059–1074.
23. Wong H.N., Chen Y.M., Lam K.C. Factual report on the November 1993 natural terrain landslides in three study areas on Lantau Island: GEO Report № 61. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office (GEO), 1997. 42 p.
24. Hardingham A.D., Ho K.K.S., Smallwood A.R.H., Ditchfield C.S. Quantitative risk assessment of landslides – a case history from Hong Kong // Proceedings of the seminar on geotechnical risk management. Geotechnical Division, Hong Kong, 1998. Hong Kong: Hong Kong Institution of Engineers, 1998. P. 145–152.
25. Wong H.N., Ho K.K.S. Overview of risk of old man-made slopes and retaining walls in Hong Kong // Proceedings of the Seminar on Slope Engineering in Hong Kong, Hong Kong, 1998. Hong Kong: A.A. Balkema, 1998. P. 193–200.
26. Ho K.K.S., Leroi E., Roberds B. Quantitative risk assessment – application, myths and future direction // Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng2000), Melbourne, Australia, 9–24 November 2000. Vol. 1. P. 269–312.
27. Wong H.N. Landslide risk assessment for individual facilities – state of the art report // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.) Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management. London: Taylor & Francis, 2005. P. 237–296.
28. AGS. Landslide risk management concepts and guidelines // Aust. Geomech. Australian Geomechanics Society (AGS), 2000. Vol. 35. № 1. P. 49–92.
29. Cascini L. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales // Eng, Geol, 2008. Vol. 102. P. 164–177.

30. Cascini L., Bonnard Ch., Corominas J., Jibson R., Montero-Olarte J. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development – state of the art report // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.). Landslide risk management. Amsterdam: A.A. Balkema, 2005. P. 199–235.
31. Nadim F., Kjeksta O. Assessment of global high-risk landslide disaster hotspots // Sassa K., Canuti P. (eds.). Landslides – disaster risk reduction. Berlin: Springer, 2009. P. 213–221.
32. Nadim F., Kjekstad O., Peduzzi P., Herold C., Jaedicke C. Global landslide and avalanche hotspots // Landslides. 2006. Vol. 3. № 2. P. 159–174.
33. Hong Y., Adler R., Huffman G. Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility // Nat. Hazards. 2007. Vol. 43. P. 245–256. J
34. Fell R., Ho K.K.S., Lacasse S., Leroi E. A framework for landslide risk assessment and management // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.). Landslide risk management. London: Taylor and Francis, 2005. P. 3–26.
35. Soeters R., Van Westen C.J. Slope instability recognition, analysis and zonation // Turner A.K., Schuster R.L. (eds.). Landslides investigation and mitigation: TRB Special Report 247. Washington, DC: National Academy Press, 1996. P. 129–177.
36. Leroi E., Bonnard Ch., Fell R., McInnes R. Risk assessment and management – state of the art report // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.). Landslide risk management. Amsterdam: A.A. Balkema, 2005. P. 159–198.
37. Van Westen C.J., Castellanos Abella E.A., Sekha L.K. Spatial data for landslide susceptibility, hazards and vulnerability assessment: an overview // Eng. Geol. 2008. Vol. 102. № 3–4. P. 112–131.
38. Crosta G.B., Agliardi F., Frattini P., Soso R. (eds.). SafeLand Deliverable 1.1: landslide triggering mechanisms in Europe – overview and state of the art. Identification of mechanisms and triggers. 2012. URL: <http://www.safeland-fp7.eu/>.
39. Glade T., Crozier M.J. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis // Glade T., Anderson M., Crozier M.J. (eds.). Landslide hazard and risk. London: Wiley, 2005. P. 75–138.
40. Turner A.K., Schuster L.R. (eds.). Landslides, investigation and mitigation: Transportation Research Board Special Report 247. Washington, DC: National Research Council, National Academy Press, 1996. 673 p.
41. Springman S., Seward L., Casini F., Askerinejad A., Malet J.-P., Spickerman A., Travelletti J. (eds.). SafeLand Deliverable D1.3: analysis of the results of laboratory experiments and of monitoring in test sites for assessment of the slope response to precipitation and validation of prediction models. 2011. URL: <http://www.safeland-fp7.eu/>.
42. Jongmans D., Garambois S. Geophysical investigation of landslides: a review // Bull. Soc. Geol. France. 2007. Vol. 178. P. 101–112.
43. Corominas J., Moya J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes // Eng. Geol. 2008. Vol. 102. P. 193–213.
44. Cepeda J., Colonnelli S., Meyer N.K., Kronholm K. SafeLand Deliverable D1.5: statistical and empirical models for prediction of precipitation-induced landslides. 2012. URL: <http://www.safeland-fp7.eu/>.
45. Pitolakis K., Fotopoulou S. et al. (eds.). SafeLand Deliverable D2.5: physical vulnerability of elements at risk to landslides: methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines. 2011. URL: <http://www.safeland-fp7.eu/>.
46. Metternicht G., Hurni L., Gogu R. Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments // Remote Sens. Environ. 2005. Vol. 98. № 23. P. 284–303.
47. Singhroy V. Remote sensing of landslides // Glade T., Anderson M., Crozier M.J. (eds.). Landslide hazard and risk. Chichester: Wiley, 2005. P. 469–492.
48. Kaab A. Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: new techniques and applications // Phys. Chem. Earth. Part B. 2010. Vol. 25. № 9. P. 765–770.
49. Michoud C., Abellan A., Derron M.H., Jaboyedoff M. (eds.). SafeLand Deliverable D4.1: review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring. 2010. URL: Available at <http://www.safeland-fp7.eu/>.
50. Stumpf A., Malet J.-P., Kerle N. SafeLand Deliverable D4.3: creation and updating of landslide inventory maps, landslide deformation maps and hazard maps as inputs for QRA using remote-sensing technology. 2011. URL: <http://www.safeland-fp7.eu/>.
51. WP/WLI. A suggested method for describing the activity of a landslide // Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 1993. Vol. 47. P. 53–57.
52. Guzzetti F., Mondini A.S., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chan K.T. Landslide inventory maps: new tools for an old problem // Earth. Sci. Rev. 2012. Vol. 112. P. 42–66.
53. Cardinali M. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risk in Umbria, Central Italy // Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. 2002. Vol. 2. P. 57–72.
54. Haugerud R.A., Harding D.J., Johnson S.Y., Harless J.L., Weaver C.S., Sherrod B.L. High-resolution LiDAR topography of the Puget Lowland. Washington – a bonanza for earth science // GSA Today. 2003. Vol. 13. P. 4–10.
55. Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F., Reichenbach P. Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar // Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. 2007. Vol. 7. P. 637–650.
56. Van Den Eeckhaut M., Reichenbach P., Guzzetti F., Rossi M., Poesen J. Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium // Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. 2009. Vol. 9. № 2. P. 507–521.
57. Razak K.A., Straatsma M.W., van Westen C.J., Malet J.-P., de Jong S.M. Airborne laser scanning of forested landslides characterization: terrain model quality and visualization // Geomorphology. 2011. Vol. 126. P. 186–200.

58. Hervás J., Barredo J.I., Rosin P.L., Pasuto A., Mantovani F., Silvano S. Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy // *Geomorphology*. 2003. Vol. 54. P. 63–75.
59. Borghuis A.M., Chang K., Lee H.Y. Comparison between automated and manual mapping of typhoon-triggered landslides from SPOT-5 imagery // *Int. J. Remote. Sens.* 2007. Vol. 28. P. 1843–1856.
60. Mondini A.C., Guzzetti F., Reichenbach P., Rossi M., Cardinali M., Ardizzone M. Semiautomatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using optical satellite images // *Remote Sens. Environ.* 2011. Vol. 115. № 7. P. 1743–1757.
61. Martha T.R., Kerle N., Jetten V., van Westen C.J., Kumar K.V. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods // *Geomorphology*. 2010. Vol. 116. № 1–2. P. 24–36.
62. Lu P., Stumpf A., Kerle N., Casagli N. Object-oriented change detection for landslide rapid mapping // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2011. Vol. 99. P. 701–705.
63. Travelletti J., Malet J.-P., Schmittbuhl J., Toussaint R., Delacourt C., Stumpf A. A multi-temporal image correlation method to characterize landslide displacements // *Ber. Geol. B.-A.* 2010. Vol. 82. P. 50–57.
64. Niethammer U., James M.R., Rothmund S., Travelletti J., Joswig M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results // *Eng. Geol.* 2012. Vol. 128. P. 2–11. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.03.012.
65. Martha T.R., Kerle N., Jetten V., van Westen C.J., Vinod Kumar K. Landslide volumetric analysis using Cartosat-1-derived DEMs // *Geosci. Remote Sens. Lett. IEEE*, 2010. Vol. 7. № 3. P. 582–586.
66. Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M.-H., Loye A., Metzger R., Pedrazzini A. Use of LIDAR in landslide investigations: a review // *Nat. Hazards*. 2012. Vol. 61. № 1. P. 5–28.
67. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *Trans. Geosci. Remote Sens. IEEE*, 2001. Vol. 39. № 1. P. 8–20.
68. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms // *Trans. Geosci. Remote Sens. IEEE*, 2002. Vol. 40. № 11. P. 2375–2383.
69. Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., Moretti S. Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project // *Eng. Geol.* 2006. Vol. 88. P. 200–217.
70. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission // *Rev. Geophys.* 2007. Vol. 45. Issue RG2004. DOI:101029/2005RG000183.
71. METI/NASA. ASTER Global Digital Elevation Model. Tokyo, Washington, DC: Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI), National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2009. URL: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>; <http://www.gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>.
72. Nelson A., Reute H.I., Gessler P. Chapter 3: DEM production methods and sources // Hengl T., Reute H.I. (eds.) *Developments in soil science*, vol. 33. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 65–85.
73. Smith M.J., Pain C.F. Applications of remote sensing in geomorphology // *Prog. Phys. Geogr.* 2009. Vol. 33. № 4. P. 568–582.
74. Aleotti P., Chowdhury R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 1999. Vol. 58. P. 21–44.
75. Dai F.C., Lee C.F., Ngai Y.Y. Landslide risk assessment and management: an overview // *Eng. Geol.* 2002. Vol. 64. P. 65–87.
76. Chacon J., Irigaray C., Fernandez T., El Hamdouni R. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2006. Vol. 65. P. 341–411.
77. Dobbs M.R., Culshaw M.G., Northmore K.J., Reeves H.J., Entwisle D.C. Methodology for creating national engineering geological maps of the UK // *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 2012. Vol. 45. № 3. P. 335–347.
78. Xie M., Tetsuro E., Zhou G., Mitani Y. Geographic Information Systems-based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2003. Vol. 129. № 12. P. 1109–1118.
79. Culshaw M.G. From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface // *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 2005. Vol. 38. P. 231–284.
80. Ghosh S., Gunther A., Carranza E.J.M., van Westen C.J., Jetten V.G. Rock slope instability assessment using spatially distributed structural orientation data in Darjeeling Himalaya (India) // *Earth Surf. Proc. Land.* 2010. Vol. 35. № 15. P. 1773–1792.
81. Guimaraes R.F., Montgomery D.R., Greenberg H.M., Fernandes N.F., Trancoso Gomes R.A., de Carvalho J., Osmar A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro // *Eng. Geol.* 2003. Vol. 69. № 1–2. P. 99–108.
82. Bakker M.M., Govers G., Kosmas C., Vanacker V., van Oost K., Rounsevell M. Soil erosion as a driver of land-use change // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2005. Vol. 105. № 3. P. 467–481.
83. Bathurst J.C., Moretti G., El-Hames A., Begueria S., Garcia-Ruiz J.M. Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijuez river catchment, Spanish Pyrenees // *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 2007. Vol. 11. № 1. P. 569–583.
84. Talebi A., Troch P.A., Uijlenhoet R. A steady-state analytical slope stability model for complex hillslopes // *Hydrol. Process.* 2008. Vol. 22. № 4. P. 546–553.

85. Montgomery D.R., Dietrich W.E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding // *Water Resour. Res.* 1994. Vol. 30. № 4. P. 1153–1171.
86. Santacana N., Baeza B., Corominas J., De Paz A., Marturia J. A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain) // *Nat. Hazards.* 2003. Vol. 30. P. 281–295.
87. Dietrich W.E., Reiss R., Hsu M.L., Montgomery D.R. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data // *Hydrol. Process.* 1995. Vol. 9. P. 383–400.
88. D’Odorico P. A possible bistable evolution of soil thickness // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. № B11. P. 25927–25935.
89. Tsai C.C., Chen Z.S., Duh C.T., Horng F.W. Prediction of soil depth using a soil-landscape regression model: a case study on forest soils in southern Taiwan // *Natl. Sci. Coun. Repub. China. Part B. Life. Sci.* 2001. Vol. 25. № 1. P. 34–39.
90. Van Beek L.H. Assessment of the influence of changes in landuse and climate on landslide activity in a Mediterranean environment: Ph.D. thesis. Utrecht: University of Utrecht, 2002. 363 p.
91. Penizek V., Boruvka L. Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: a comparison of methods // *Plant. Soil Environ.* 2006. Vol. 52. № 9. P. 424–430.
92. Catani F., Segoni S., Falorni G. Accurate basin scale soil depth modelling and its impact on shallow landslides prediction. European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria // *Geophys. Res. Abstr.* 2007. Vol. 9. P. 10828.
93. Hengl T., Heuvelink G.B.M., Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging // *Geoderma.* 2004. Vol. 120. № 1–2. P. 75–93.
94. Kuriakose S.L., Devkota S., Rossiter D.G., Jetten V.J. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India // *Catena.* 2009. Vol. 79. № 1. P. 27–38.
95. Gustavsson M., Kolstrup E., Seijmonsbergen A.C. A new symbol-and-GIS-based detailed geomorphological mapping system: renewal of a scientific discipline for understanding landscape development // *Geomorphology.* 2006. Vol. 77. № 1-2. P. 90–111.
96. Pike R.J. Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis // *Prog. Phys. Geogr.* 2000. Vol. 24. № 1. P. 1–20.
97. Asselen S.V., Seijmonsbergen A.C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM // *Geomorphology.* 2006. Vol. 78. № 3–4. P. 309–320.
98. Matthews J.A., Brunsten D., Frenzel B., Glaser B., Weiss M.M. (eds.) Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene // *Palaeoclimate Res.* 1997. Vol. 19. 444 p.
99. Van Beek L.P.H., Van Asch T.W.J. Regional assessment of the effects of land-use change and landslide hazard by means of physically based modelling // *Nat. Hazards.* 2004. Vol. 30. № 3. P. 289–304.
100. Glade T. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand // *Catena.* 2003. Vol. 51. № 3–4. P. 297–314.
101. Kuriakose S.L. Physically-based dynamic modelling of the effect of land use changes on shallow landslide initiation in the Western Ghats of Kerala, India: Ph.D. thesis. Utrecht: University of Utrecht, 2010. ISBN 978-90-6164-298-5.
102. Crosta G.B., Frattini P. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2003. Vol. 3. № 1–2. P. 81–93.
103. Collison A., Wade J., Griths S., Dehn M. Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England // *Eng. Geol.* 2000. Vol. 55. P. 205–218.
104. Melchiorre C., Frattini P. Modelling probability of rainfall-induced shallow landslides in a changing climate, Otta, Central Norway // *Clim. Chang.* 2012. Vol. 113. № 2. P. 413–436.
105. Comegna L., Picarelli L., Bucchignani E., Mercogliano P. Potential effects of incoming climate changes on the behaviour of slow active landslides in clay // *Landslides.* 2012. Vol. 10. № 4. P. 373–391. DOI:101007/s10346-012-0339-3.
106. Keefer D.K. Investigating landslides caused by earthquakes – a historical review // *Surv. Geophys.* 2002. Vol. 23. P. 473–510.
107. Meunier P., Hovius N., Haines A.J. Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. № 20. Paper L20408.
108. Gorum T., Fan X., van Westen C.J., Huang R.Q., Xu Q., Tang C., Wang G. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake // *Geomorphology.* 2011. Vol. 133. № 3–4. P. 152–167.
109. Miles S.B., Keefer D.K. Evaluation of CAMEL – comprehensive areal model of earthquake-induced landslides // *Eng. Geol.* 2009. Vol. 104. P. 1–15.
110. Alexander E.D. Vulnerability to landslides // *Landslide risk assessment* (ed. by T. Glade, M.G. Anderson, M.J. Crozier). London: Wiley, 2005. P. 175–198.
111. Brenner C. Building reconstruction from images and laser scanning // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2005. Vol. 6. № 3–4. P. 187–198.
112. Chen K., McAneney J., Blong R., Leigh R., Hunter L., Magill C. Defining area at risk and its effect in catastrophe loss estimation: a dasymetric mapping approach // *Appl. Geogr.* 2004. Vol. 24. P. 97–117.
113. Heuvelink G.B.M. Error propagation in environmental modelling with GIS. London: Taylor & Francis, 1998. 150 p.
114. Fisher P.F., Tate N.J. Causes and consequences of error in digital elevation models // *Prog. Phys. Geogr.* 2006. Vol. 30. P. 467–489.

115. Wechsler S.P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 11. P. 1481–1500.
116. Ardizzone F., Cardinali M., Carrara A., Guzzetti F., Reichenbach P. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2002. Vol. 2. P. 3–14.
117. Van Den Eeckhaut M., Hervas J. State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk // *Geomorphology*. 2012. Vol. 139-140. P. 545–558.
118. Carrara A., Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard // *Nat. Hazards*. 1999. Vol. 20. № 2–3. P. 117–135.
119. 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 Geomorphol.* 1999. Vol. 31. № 1–4. P. 181–216.
120. Wiczorek G.F. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction // *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 1984. Vol. 21. № 3. P. 337–342.
121. Crozier M.J. Multiple occurrence regional landslide events in New Zealand: hazard management issues // *Landslides*. 2005. Vol. 2. P. 247–256.
122. Reid L.M., Page M.J. Magnitude and frequency of landsliding in a large New Zealand catchment // *Geomorphology*. 2003. Vol. 49. P. 71–88.
123. Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P., Carrara A. Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, central Italy // *Environ. Manage.* 2000. Vol. 25. № 3. P. 247–363.
124. Jaiswal P., van Westen C.J. Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds // *Geomorphology*. 2009. Vol. 112. P. 96–105.
125. Squarzoni C., Delacourt C., Allemand P. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Vallette landslide observed by SAR interferometry // *Eng. Geol.* 2003. Vol. 68. P. 53–66.
126. Colesanti C., Wasowski J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry // *Eng. Geol.* 2006. Vol. 88. P. 173–199.
127. Coe J.A., Michael J.A., Crovelli R.A., Savage W.A. Preliminary map showing landslides densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records: open-file report 00-303. Seattle: USGS, 2000.
128. Bulut F., Boynukalin S., Tarhan F., Ataoglu E. Reliability of isopleth maps // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2000. Vol. 58. P. 95–98.
129. Valadao P., Gaspar J.L., Queiroz G., Ferreira T. Landslides density map of S. Miguel Island, Azores Archipelago // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2002. Vol. 2. P. 51–56.
130. Lee S. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data // *Int. J. Remote Sens.* 2005. Vol. 26. № 7. P. 1477–1491.
131. Yin K.J., Yan T.Z. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks // *Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Switzerland, 10–15 July 1988*. Vol. 2. P. 1269–1272.
132. Van Westen C.J. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation: Ph.D. dissertation, ITC publ. № 15. Enschede: ITC, 1993. 245 p.
133. Bonham-Carter G.F. Geographic information system for geoscientists: modelling with GIS. Oxford: Pergamon, 1994. 398 p.
134. Suzen M.L., Doyuran V. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment // *Turk. Eng. Geol.* 2004. Vol. 71. P. 303–321.
135. Chung C.F., Fabbri A.G. Representation of geoscience data for information integration // *J. Non-Renew. Resour.* 1993. Vol. 2. № 2. P. 122–139.
136. Luzi L. Application of favourability modelling to zoning of landslide hazard in the Fabriano Area, Central Italy // *Proc. First Joint Eur. Conf. & Exhibition on Geographical Information, The Hague, Netherlands, 26–31 March 1995*. P. 398–402.
137. Carrara A. Multivariate models for landslide hazard evolution // *Math. Geol.* 1983. Vol. 15. P. 403–427.
138. Gorsevski P.V., Gessler P., Foltz R.B. Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS // *GIS in the Rockies 2000: Conference and Workshop: Applications for the 21st Century, Denver, CO, USA, 25–27 September 2000*. URL; <https://studylib.net/doc/12343493/gis-in-the-rockies-2000-conference-and-workshop>.
139. Ohlmacher G.C., Davis J.C. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas // *USA Eng. Geol.* 2003. Vol. 69. № 33. P. 331–343.
140. Gorsevski P.V., Gessler P.E., Foltz R.B., Elliot W.J. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis // *Trans. GIS*. 2006. Vol. 10. № 3. P. 395–415.
141. Lee S., Ryu J.-H., Won J.-S., Park H.-J. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network // *Eng. Geol.* 2004. Vol. 71. № 3–4. P. 289–302.
142. Ermini L., Catani F., Casagli N. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment // *Geomorphology*. 2005. Vol. 66. P. 327–343.
143. Kanungo D.P., Arora M.K., Sarkar S., Gupta R.P. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas // *Eng. Geol.* 2006. Vol. 85. № 3–4. P. 347–366.

144. Pack R.T., Tarboton D.G., Goodwin C.N. The SINMAP approach to terrain stability mapping // 8th Congr. Int. Assoc. Eng. Geol., Vancouver, Canada, 21–25 September 1998.
145. Baum R.L., Savage W.Z., Godt J.W. TRIGRS - a FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis: US Geological Survey Open-File Report 02-0424. 2002. URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-424/>.
146. Casadei M., Dietrich W.E., Mille N.L. Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation on soil mantled landscapes // *Earth Surf. Proc. Land*. 2003. Vol. 28. № 9. P. 925–950.
147. Simoni S., Zanotti F., Bertoldi G., Rigon R. Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS // *Hydrol. Process*. 2008. Vol. 22. P. 532–545.
148. Jibson R.W., Harp E.L., Michael J.A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California, area: open file report. Reston, USA: US Geological Survey, 1998. P. 98–113.
149. Wang K.L., Lin M.I. Development of shallow seismic landslide potential map based on Newmark's displacement: the case study of Chi-Chi earthquake, Taiwan // *Environ. Earth Sci*. 2010. Vol. 60. P. 775–785.
150. Gunther A. SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes // *Comput. Geosci*. 2003. Vol. 29. P. 865–875.
151. GEO-SLOPE. SLOPE/W. Calgary, Canada: GEO-SLOPE International, 2011. URL: <http://www.geo-slope.com>.
152. Hungr O. A model for the run out analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches // *Can. Geotech. J*. 1995. Vol. 32. P. 610–623.
153. Gitirana Jr.G., Santos M., Fredlund M. Three-dimensional slope stability model using finite element stress analysis // *GeoCongress 2008*, New Orleans, LA, USA, 9–12 March 2008. P. 191–198.
154. Hoek E., Grabinsky M.W., Diederichs M.S. Numerical modelling for underground excavations // *Trans. Inst. Min. Metall. Sect. A*. 1993. Vol. 100. P. A22–A30.
155. Stead D., Eberhardt E., Coggan J., Benko B. Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis: applications and limitations // *LANDSLIDES – Causes, Impacts and Countermeasures*, Davos, Switzerland, 17–21 June 2001. P. 615–624.
156. Hart R.D. An introduction to distinct element modelling for rock engineering // Hudson J.A. (ed). *Comprehensive rock engineering*. Oxford: Pergamon, 1993.
157. Horton P., Jaboyedoff M., Bardou E. Debris flow susceptibility mapping at a regional scale // *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management*. Quebec, Canada: Presse de l'Université Laval, 2008. P. 399–406.
158. Hungr O., Corominas J., Eberhardt E. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity: state of the art report // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.). *Landslide risk management*. Amsterdam: A.A. Balkema, 2005. P. 99–128.
159. Hoblitt R.P., Walder J.S., Driedger C.L., Scott K.M., Pringle P.T., Vallance J.W. *Volcano hazards from Mount Rainier*, Washington: revised open-file report 98-428. Reston: USGS, 1998.
160. Corominas J., Copons R., Vilaplana J.M., Altimir J., Amigo J. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra // *Nat Hazards*. 2003. Vol. 30. P. 421–435.
161. Ayala F.J., Cubillo S., Alvarez A., Dominguez M.J., Lain L., Lain R., Ortiz G. Large scale rockfall reach susceptibility maps in La Cabrera Sierra (Madrid) performed with GIS and dynamic analysis at 1:5000 // *Nat Hazards*. 2003. Vol. 30. P. 325–340.
162. Jaboyedoff M. Conefall v.10: a program to estimate propagation zones of rockfall, based on cone method. Lausanne: Quanterra, 2003. URL: <http://www.quanterra.com>.
163. Jaboyedoff M., Labiouse V. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data // *ISRM 2003 «Technology Roadmap for Rock Mechanics»*, Gauteng, South Africa, 8–12 September 2003. P. 575–578.
164. Prochaska A.B., Santi P.M., Higgins J.D., Cannon S.H. Debris-flow runout predictions based on the average channel slope (ACS) // *Eng. Geol*. 2008. Vol. 98. P. 29–40.
165. Copons R., Vilaplana J.M. Rockfall susceptibility zoning at a large scale: from geomorphological inventory to preliminary land use planning // *Eng. Geol*. 2008. Vol. 102. P. 142–151.
166. Li T. A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall // *Z. Geomorphol*. 1983. Vol. 24. P. 473–482.
167. Iverson R.M., Schilling S.P., Vallance J.W. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones // *Geol. Soc. Am. Bull*. 1998. Vol. 110. № 8. P. 972–984.
168. Rickenmann D. Empirical relationships for debris flows // *Nat. Hazards*. 1999. Vol. 19. P. 47–77.
169. Berti M., Simoni A. Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships // *Geomorphology*. 2007. Vol. 90. P. 144–161.
170. Fannin R.J., Wise M.P. An empirical-statistical model for debris flow travel distance // *Can. Geotech. J*. 2001. Vol. 38. P. 982–994.
171. Domaas U. Geometrical methods of calculating rockfall range: report 585910-1. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1994.
172. Hsu K.J. Catastrophic debris stream (sturzstroms) generated by rockfalls // *Geol. Soc. Am. Bull*. 1975. Vol. 86. P. 129–140.
173. Evans S.G., Hungr O. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes // *Can. Geotech. J*. 1993. Vol. 30. P. 620–636.
174. Scheidegger A. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides // *Rock Mech*. 1973. Vol. 5. P. 231–236.
175. Finlay P.J., Mostyn G.R., Fell R. Landslide risk assessment: prediction of travel distance // *Can. Geotech. J*. 1999. Vol. 36. P. 556–562.

176. Copons R., Vilaplana J.M., Linares R. Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Sola d'Andorra la Vella, Central Pyrenees) // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2009. Vol. 9. P. 2107–2118.
177. Hungr O., Evans S.G. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards // *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*. Lausanne: A.A. Balkema, 1988. Vol. 1. P. 685–690.
178. Rickenmann D. Runout prediction methods // Jakob M., Hungr O. (eds.). *Debris-flow hazards and related phenomena*. Chichester: Praxis, 2005. P. 305–324.
179. Crosta G.B., Cucchiario S., Frattini P. Validation of semi-empirical relationships for the definition of debris-flow behaviour in granular materials // *Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Davos, Switzerland, 2003. Rotterdam: Millpress, 2003. P. 821–831.
180. Jaboyedoff M., Dudt J.P., Labiouse V. An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2005. Vol. 5. P. 621–632.
181. Scheidl C., Rickenmann D. Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans // *Earth Surf. Process. Landf.* 2010. Vol. 35. P. 157–173.
182. Piteau D.R., Clayton R. Computer rockfall model // *Proc. Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Work Effectiveness*, ISMES, Bergamo, Italy, 20–21 May 1976. P. 123–125.
183. Stevens W. RocFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls: MaSc thesis. Toronto: University of Toronto, 1998.
184. Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls // *Comput. Geosci.* 2002. Vol. 28. P. 1081–1095.
185. Guzzetti F., Malamud B.D., Turcotte D.L., Reichenbach P. Power-law correlations of landslide areas in central Italy // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 195. P. 169–183.
186. Pfeiffer T.J., Bowen T.D. Computer simulations of rockfalls // *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 1989. Vol. 26. P. 135–146.
187. Jones C.L., Higgins J.D., Andrew R.D. Colorado Rock Fall Simulation Program, version 40. Denver: Colorado Department of Transportation, Colorado Geological Survey, 2000.
188. Crosta G.B., Agliardi F., Frattini P., Imposimato S. A three-dimensional hybrid numerical model for rockfall simulation // *Geophys. Res. Abstr.* 2004. Vol. 6. P. 04502.
189. Bozzolo D., Pamini R. Simulation of rock falls down a valley side // *Acta Mech.* 1986. Vol. 63. P. 113–130.
190. Azzoni A., La Barbera G., Zaninetti A. Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1995. Vol. 32. P. 709–724.
191. Calvetti F., Crosta G., Tatarella M. Numerical simulation of dry granular flows: from the reproduction of small-scale experiments to the prediction of rock avalanches // *Rivista Italiana di Geotecnica*. 2000. Vol. 2000. P. 21–38.
192. Agliardi F., Crosta G.B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003. Vol. 40. P. 455–471.
193. Dorren L.K.A., Seijmonsbergen A.C. Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale // *Geomorphology*. 2003. Vol. 56. P. 49–64.
194. Hutchinson J.N. A sliding-consolidation model for flow slides // *Can. Geotech. J.* 1986. Vol. 23. P. 115–126.
195. Alonso E.E., Pinyol N.M. Criteria for rapid sliding I: a review of the Vaiont case // *Eng. Geol.* 2010. Vol. 114. P. 198–210.
196. Pinyol N.M., Alonso E.E. Criteria for rapid sliding II: thermo-hydro-mechanical and scale effects in Vaiont case // *Eng. Geol.* 2010. Vol. 114. P. 211–227.
197. Savage S.B., Hutter K. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis // *Acta Mech.* 1991. Vol. 86. № 1–4. P. 201–223.
198. McDougall S., Hungr O. A model for the analysis of rapid landslide run out motion across three dimensional terrain // *Can. Geotech. J.* 2004. Vol. 41. P. 1084–1097.
199. Pastor M., Haddad B., Sorbino G., Cuomo S., Drempetic V. A depth-integrated, coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena // *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2009. Vol. 33. P. 143–172.
200. Iverson R.I., Denlinger R.P. Flow of variably fluidized granular masses across three dimensional terrain. Coulomb mixture theory // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. № B1. P. 537–552.
201. Sosio R., Crosta G.B., Hungr O. Complete dynamic modelling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps) // *Eng. Geol.* 2008. Vol. 100. P. 11–26.
202. Quecedo M., Pastor M., Herreros M.I., Fernandez Merodo J.A. Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the finite element method // *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 2004. Vol. 59. № 6. P. 755–794.
203. Crosta G.B., Imposimato S., Roddeman D.G. Numerical modelling of entrainment/deposition in rock and debris-avalanches // *Eng. Geol.* 2008. Vol. 109. № 1–2. P. 135–145.
204. Pastor M., Quecedo M., Fernandez Merodo J.A., Herreros M.I., Gonzalez E., Mira P. Modelling tailing dams and mine waste dumps failures // *Geotechnique*. 2002. Vol. LII. № 8. P. 579–592.

205. Laigle D., Cousot P. Numerical modelling of mudflows // *J. Hydraul. Eng. ASCE*, 1997. Vol. 123. № 7. P. 617–623.
206. Varnes D.J. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice // *Natural Hazard Series*. UNESCO, Paris, 1984. Vol. 3.
207. Hungr O. Some methods of landslide hazard intensity mapping // Cruden D., Fell R. (eds.). *Landslide risk assessment*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. P. 215–226.
208. Guzzetti F., Galli M., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2005. Vol. 6. P. 115–131.
209. Crovelli R.A. Probabilistic models for estimation of number and cost of landslides: open file report 00-249. Reston: US Geological Survey, 2000. 23 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-424/>.
210. Dussauge-Peisser C., Helmstetter A., Grasso J.-R., Hantz D., Desvarreux P., Jeannin M., Giraud A. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2002. Vol. 2. P. 15–26.
211. Wong H.N., Ho K.K.S., Chan Y.C. Assessment of consequence of landslides // Cruden D., Fell R. (eds.). *Landslide risk assessment*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. P. 111–149.
212. Lee E.M., Brunsten D., Sellwood M. Quantitative risk assessment of coastal landslide problems // Bromhead E., Dixon N., Ibsen M.-L. (eds.). *Landslides in Research Theory and Practice: proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*. London: Thomas Telford, 2000. Vol. 2. P. 899–904.
213. Budetta P.B. Risk assessment from debris flows in pyroclastic deposits along a motorway, Italy // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2002. Vol. 61. № 4. P. 293–301.
214. Wu T.H., Tang W.H., Einstein H.H. Landslide hazard and risk assessment // Turner A.T., Schuster R.L. (eds.). *Landslides – investigation and mitigation: Transportation Research Board Special Report № 247*. Washington, DC: National Academy Press, 1996. P. 106–118.
215. Haneberg W.C. A rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment // *Environ. Eng. Geosci.* 2004. Vol. X. P. 27–43.
216. Wu T.H., Abdel-Latif M.A. Prediction and mapping of landslide hazard // *Can. Geotech. J.* 2000. Vol. 37. P. 781–795.
217. Miller D.J., Sias J. Deciphering large landslides: linking hydrological groundwater and stability models through GIS // *Hydrol. Process.* 1998. Vol. 12. P. 923–941.
218. Tacher L., Bonnard C., Laloui L., Parriaux A. Modelling the behaviour of a large landslide with respect to hydrogeological and geomechanical parameter heterogeneity // *Landslides*. 2005. Vol. 2. P. 3–14.
219. Malet J.-P., van Asch Th.W.J., van Beek R., Maquaire O. Forecasting the behaviour of complex landslides with a spatially distributed hydrological model // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2005. Vol. 5. № 1. P. 71–85.
220. Shrestha H.K., Yatabe R., Bhandary N.P. Groundwater flow modelling for effective implementation of landslide stability enhancement measures // *Landslides*. 2008. Vol. 5. P. 281–290. Таблица 8
221. Iverson R.M. Landslide triggering by rain infiltration // *Water Resour. Res.* 2000. Vol. 36. P. 1897–1910.
222. Baum R., Coe J.A., Godt J.W., Harp E.L., Reid M.E., Savage W.Z., Schulz W.H., Brien D.L., Chleborad A.F., McKenna J.P., Michael J.A. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA // *Landslides*. 2005. Vol. 2. P. 266–279.
223. Godt J.W., Baum R.L., Savage W.Z., Salciarini D., Schulz W.H., Harp E.L. Transient deterministic shallow landslide modelling: requirements for susceptibility and hazard assessment in a GIS framework // *Eng. Geol.* 2008. Vol. 102. P. 214–226.
224. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol Atmos Phys* // 2007. Vol. 98. № 3. P. 239–267.
225. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update // *Landslides*. 2008. Vol. 5. P. 3–17.
226. Brabb E.E. Innovative approaches to landslide hazard mapping // *Proceedings of the 4th International Symposium. on Landslides, Toronto, Canada, 16–21 September 1984*. Vol. 1. P. 307–324.
227. Kramer S.L. *Geotechnical earthquake engineering*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1996.
228. Hovius N., Stark C.P., Allen P.A. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping // *Geology*. 1997. Vol. 25. P. 231–234.
229. Pelletier J.D., Malamud B.D., Blodgett T., Turcotte D.L. Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides // *Eng. Geol.* 1997. Vol. 48. P. 255–268.
230. Brardinoni F., Church M. Representing the landslide magnitude-frequency relation, Capilano River Basin, British Columbia // *Earth Surf. Proc. Land.* 2004. Vol. 29. P. 115–124.
231. Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. Landslide inventories and their statistical properties // *Earth Surf. Proc. Land.* 2004. Vol. 29. P. 687–711.
232. Guthrie R.H., Deadman P.J., Raymond Cabrera A., Evans S.G. Exploring the magnitude-frequency distribution: a cellular automata model for landslides // *Landslides*. 2008. Vol. 5. P. 151–159.
233. Brunetti M.T., Guzzetti F., Rossi M. Probability distributions of landslide volumes // *Nonlinear Process. Geophys.* 2009. Vol. 16. P. 179–188.

234. Hungr O., Evans S.G., Hazzard J. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia // *Can. Geotech. J.* 1999. Vol. 36. P. 224–238.
235. Stark C.P., Hovius N. The characterization of the landslide size distributions // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. P. 1091–1094.
236. Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Govers G., Verstraeten G., Demoulin A. Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 256. P. 588–603.
237. Salciarini D., Godt J.W., Savage W.Z., Baum R.L., Conversini P. Modelling landslide recurrence in Seattle, Washington, USA // *Eng. Geol.* 2008. Vol. 102. № 3–4. P. 227–237.
238. Guthrie R.H., Evans S.G. Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system // *Coast British Columbia Earth Surf. Process. Landf.* 2004. Vol. 29. P. 1321–1339.
239. Schuster R.L., Logan R.L., Pringle P.T. Prehistoric rock avalanches in the Olympic Mountains // *Wash. Sci.* 1992. Vol. 258. P. 1620–1621.
240. Bull W.B., King J., Kong F., Moutoux T., Philips W.M. Lichen dating of coseismic landslide hazards in alpine mountains // *Geomorphology.* 1994. Vol. 10. P. 253–264.
241. Bull W.B., Brandon M.T. Lichen dating of earthquake-generated regional rockfall events, Southern Alps, New Zealand // *GSA Bull.* 1998. Vol. 110. P. 60–84.
242. Van Steijn H. Debris-flow magnitude frequency relationships for mountainous regions of Central and Northern Europe // *Geomorphology.* 1996. Vol. 15. P. 259–273.
243. Agliardi F., Crosta G.B., Zanchi A., Ravazzi C. Onset and timing of deep-seated gravitational slope deformations in the eastern Alps, Italy // *Geomorphology.* 2009. Vol. 103. P. 113–129.
244. Lee E.M., Meadowcroft I.C., Hall J.W., Walkden M. Coastal landslide activity: a probabilistic simulation model // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2002. Vol. 61. P. 347–355.
245. Bunce C.M., Cruden D.M., Morgenstern N.R. Assessment of the hazard from rock fall on a highway // *Can. Geotech. J.* 1997. Vol. 34. P. 344–356.
246. Chau K.T., Wong R.H.C., Liu J., Lee C.F. Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory // *Rock Mech. Rock Eng.* 2003. Vol. 36. P. 383–408.
247. Jakob M., Friele P. Frequency and magnitude of debris flows on Cheekye River, British Columbia // *Geomorphology.* 2010. Vol. 114. P. 382–395.
248. Stoffel M. Magnitude-frequency relationships of debris-flows – a case study based on field surveys and tree-ring records // *Geomorphology.* 2010. Vol. 116. P. 67–76.
249. Corominas J., Moya J. Contribution of dendrochronology to the determination of magnitude-frequency relationships for landslides // *Geomorphology.* 2010. Vol. 124. P. 137–149. DOI:101016/j.geomorph.201009001.
250. Lopez Saez J., Corona C., Stoffel M., Schoeneich P., Berger F. Probability maps of landslide reactivation derived from tree-ring records: Pra Bellon landslide, southern French Alps // *Geomorphology.* 2012. Vol. 138. P. 189–202.
251. Van Dine D.F., Rodman R.F., Jordan P., Dupas J. Kuskonook Creek, an example of a debris flow analysis // *Landslides.* 2005. Vol. 2. № 4. P. 257–265. DOI:101007/s10346-005-0017.
252. Jakob M. Morphometric and geotechnical controls of debris-flow frequency and magnitude in southwestern British Columbia: Ph.D. thesis. Vancouver: Geography Department, the University of British Columbia, 1996.
253. Jakob M. The fallacy of frequency. Statistical techniques for debris flow frequency magnitude analysis // *Proceedings of the International Landslide Conference, Banff, Canada, 2–8 June 2012.* Vol. 1. P. 741–750.
254. Corominas J., Copons R., Moya J., Vilaplana J.M., Altimir J., Amigo J. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area // *Landslides.* 2005. Vol. 2. P. 343–357.
255. Agliardi F., Crosta G.B., Frattini P. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2009. Vol. 9. P. 1059–1073.
256. Frattini P., Crosta G.B., Sosio R. Approaches for defining thresholds and return periods for rainfall-triggered shallow landslides // *Hydrol. Process.* 2009. Vol. 23. № 10. P. 1444–1460.
257. Crosta G.B., Agliardi F. A methodology for physically-based rockfall hazard assessment // *Nat. Hazards. Earth Syst. Sci.* 2003. Vol. 3. P. 407–422.
258. Hungr O., McDougall S., Wise M., Cullen M. Magnitude-frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief // *Geomorphology.* 2008. Vol. 96. P. 355–365.
259. Jakob M. A size classification for debris flows // *Eng. Geol.* 2005. Vol. 79. P. 151–161.
260. Bovolin V., Tagliatalata L. *Proceedings Scritti in onore di Lucio Tagliatalata: CNR-GNDCI publ. № 2811.* Perugia: CNR-GNDCI, 2002. P. 429–437.
261. Calvo B., Savi F. A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment // *Comput. Geosci.* 2009. Vol. 35. № 5. P. 967–977.
262. Bortler P. *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren.* Bern: Bundesamt fur Umwelt, Wald und Landschaft, 1999.

263. Fuchs S., Heiss K., Hubl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 7. P. 495–506.
264. Saygili G., Rathje E.M. Probabilistically based seismic landslide hazard maps: an application in Southern California // *Eng. Geol.* 2009. Vol. 109. P. 183–194.
265. Mansour M.F., Morgenstern N.I., Martin C.D. Expected damage from displacement of slow-moving slides // *Landslides*. 2011. Vol. 8. № 1. P. 117–131.
266. Archetti R., Lamberti A. Assessment of risk due to debris flow events // *Nat. Hazards Rev.* 2003. Vol. 4. № 3. P. 115–125.
267. Friele P., Jakob M., Clague J. Hazard and risk from large landslides from Mount Meager Volcano, British Columbia, Canada // *Georisk*. 2008. Vol. 2. № 1. P. 48–64.
268. Jakob M., Stein D., Ulmi M. Vulnerability of buildings to debris flow impact // *Nat. Hazards*. 2012. Vol. 60. P. 241–261.
269. Gentile F., Bisantino T., Trisorio Liuzzi G. Debris-flow risk analysis in south Gargano watersheds (Southern Italy) // *Nat. Hazards*. 2008. Vol. 44. P. 1–17.
270. Frattini P., Crosta G.B., Lari S., Agliardi F. Probabilistic rockfall hazard analysis (PRHA) // Eberhardt E., Froese C., Turner A.K., Leroueil S. (eds.). *Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding*. London: Taylor & Francis, 2012. P. 1145–1151.
271. Michoud C., Derron M.H., Hortin P., Jaboyedoff M., Baillifard F.J., Loye A., Nicolet P., Pedrazzini A., Queyrel A. Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012. Vol. 12. P. 615–629.
272. Jaiswal P., van Westen C.J., Jetten V. Quantitative assessment of direct and indirect landslide risk along transportation lines in southern India // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010. Vol. 10. № 6. P. 1253–1267.
273. Roberds W. Estimating temporal and spatial variability and vulnerability // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.). *Landslide risk management*. London: Taylor & Francis, 2005. P. 129–158.
274. Van Dine D.F., Rodman R.F., Jordan P., Dupas J. Kuskonook Creek, an example of a debris flow analysis // *Landslides*. 2005. Vol. 2. № 4. P. 257–265. DOI:101007/s10346-005-0017.
275. Keefer D.K. Landslides caused by earthquakes // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1984. Vol. 95. № 4. P. 406–421.
276. Govi M., Sorzana P.F. Landslide susceptibility as function of critical rainfall amount in Piedmont basins (North-Western Italy) // *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*. 1980. Vol. 14. P. 43–61.
277. Baum R.L., Godt J.W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA // *Landslides*. 2010. Vol. 7. P. 259–272.
278. Crozier M.J., Preston N.J. Modelling changes in terrain resistance as a component of landform evolution in unstable hill country // Hergarten S., Neugebauer H.J. (eds.) *Process modelling and landform evolution: lecture notes in earth sciences 78*. Berlin: Springer, 1999. P. 267–284.
279. Wilson R.A. The rise and fall of a debris flow warning system for the San Francisco Bay Region, California // Glade T., Anderson M., Crozier M.J. (eds.). *Landslide hazard and risk*. New York: Wiley, 2004. P. 493–516.
280. Remondo J., Bonachea J., Cendrero A. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment // *Landslides*. 2005. Vol. 2. P. 321–328.
281. Del Gaudio V., Pierri P., Wasowski J. An approach to time-probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2003. Vol. 93. № 2. P. 557–569.
282. Savage W.Z., Godt J.W., Baum R.L. Modelling time-dependent areal slope instability // Lacerda W., Ehrlich M., Fountoura S.A.B., Sayao A.S.F. (eds.). *Landslide Evaluation and Stabilization: IX International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, 2004*. Amsterdam: A.A. Balkema, 2004. Vol. 1. P. 23–38.
283. Baum R., Coe J.A., Godt J.W., Harp E.L., Reid M.E., Savage W.Z., Schulz W.H., Brien D.L., Chleborad A.F., McKenna J.P., Michael J.A. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA // *Landslides*. 2005. Vol. 2. P. 266–279.
284. Ferlisi S., Cascini L., Corominas J., Matano F. Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (southern Italy) // *Nat. Hazards*. 2012. Vol. 62. № 2. P. 691–721.
285. Guzzetti F., Reichenbach P., Wieczorek G.F. Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2003. Vol. 3. P. 491–503.
286. Blahut J., Horton P., Sterlacchini S., Jaboyedoff M. Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010. Vol. 10. P. 2379–2390.
287. Jaboyedoff M., Labiouse V. Preliminary estimation of rockfall runout zones // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 11. P. 819–828.
288. Hurlimann M., Copons R., Altimir J. Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: a multidisciplinary approach // *Geomorphology*. 2006. Vol. 78. № 3–4. P. 359–372.
289. Hurlimann M., Rickenmann D., Medina V., Bateman A. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment // *Eng. Geol.* 2008. Vol. 102. P. 152–163.
290. Catani F., Casagli N., Ermini L., Righini G., Menduni G. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin // *Landslides*. 2005. Vol. 2. P. 329–342.

291. Abbruzzese J.M., Sauthier C., Labiouse V. Considerations on Swiss methodologies for rock fall hazard mapping based on trajectory modelling // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2009. Vol. 9. P. 1095–1109.
292. Lewis J. Multi-hazard history of Antigua // *Disasters*. 1984. Vol. 8. № 3. P. 190–197.
293. Granger K., Jones T., Leiba M., Scott G. Community risks in Cairns: a multi-hazard risk assessment. Canberra: Australian Geological Survey Organisation, 1999.
294. Van Westen C.J., Montoya L., Boerhoom L., Coto E.B. Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas: a case study for the city of Turrialba, Costa Rica // *Proceedings of the Regional Workshop on Best Practices in Disaster Mitigation: Lessons Learned from the Asian Urban Disaster Mitigation Program and Other Initiatives, Bali, Indonesia, 24–26 September 2002*. P. 53–72.
295. Lacasse S., Eidsvik U., Nadim F., Hoeg K., Blikra L.H. Event tree analysis of Aknes rock slide hazard // *Proceedings of the 4th Canadian Conf. on Geohazards, Quebec City, Canada, 20–24 May 2008*. P. 551–557.
296. Kappes M., Keiler M., Glade T. From single- to multi-hazard risk analyses: a concept addressing emerging challenges // Malet J.P., Glade T., Casagli N. (eds.) *Proceedings of the Int. Conf. on Mountain Risks: Bringing Science to Society, Firenze, Italy, 24–26 November 2010*. P. 351–356.
297. Schmidt J., Matcham I., Reese S., King A., Bell R., Henderson R., Smart G., Cousins J., Smith W., Heron D. Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling // *Nat. Hazards*. 2011. Vol. 58. P. 1169–1192. DOI:101007/s11069-011-9721-z.
298. Marzocchi W., Garcia-Aristizabal A., Gasparini P., Mastellone M.L., Di Ruocco A. Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy // *Nat. Hazards*. 2012. Vol. 62. P. 551–573.
299. Romeo R., Floris M., Veneri F. Area-scale landslide hazard and risk assessment // *Environ. Geol.* 2006. Vol. 51. P. 1–13.
300. Cozzani V., Zanelli S. An approach to the assessment of domino accidents hazard in quantitative area risk analysis // Pasman H.J., Fredholm O., Jacobsson A. (eds.) *Loss prevention and safety promotion in the process industries*. Amsterdam: Elsevier, 2001. P. 1263–1274.
301. Eveleigh T.J., Mazzucchi T.A., Sarkani S. Systems engineering design and spatial modelling for improved natural hazard risk assessment // *Disaster Prev. Manag.* 2006. Vol. 15. № 4. P. 636–648.
302. Eveleigh T.J., Mazzucchi T.A., Sarkani S. Spatially-aware systems engineering design modelling applied to natural hazard vulnerability assessment // *Syst. Eng.* 2007. Vol. 10. № 3. P. 187–202.
303. Tapsell S., McCarthy S., Faulkner H., Alexander M. Social vulnerability to natural hazards: CapHaz-Net WP4 Report. London: Flood Hazard Research Centre – FHRC, Middlesex University, 2010. URL: [http://caphaz-net.org/outcomes-results/CapHaz-Net\\_WP4\\_Social-Vulnerability2.pdf](http://caphaz-net.org/outcomes-results/CapHaz-Net_WP4_Social-Vulnerability2.pdf).
304. King D., MacGregor C. Using social indicators to measure community vulnerability to natural hazards // *Aust. J. Emerg. Manag.* 2000. Vol. 15. № 3. P. 52–57.
305. Bird J.F., Bommer J.J., Crowley H., Pinho R. Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation // *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2006. Vol. 26. № 1. P. 15–30.
306. Uzielli M., Nadim F., Lacasse S., Kaynia A.M. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides // *Eng. Geol.* 2008. Vol. 102. P. 251–256.
307. ATC-13: Earthquake damage evaluation data for California. Redwood City: Applied Technology Council, 1985.
308. Shinozuka M., Feng M.Q., Lee J., Naganuma T. Statistical analysis of fragility curves // *J. Eng. Mech. ASCE*, 2000. Vol. 126. № 12. P. 1224–1231.
309. Cornell C.A., Jalayer F., Hamburger R.O., Foutch D.A. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines // *J. Struct. Eng.* 2002. Vol. 128. P. 526–533.
310. Nielson B.G., DesRoches R. Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the Central and Southeastern United States // *Earthq. Spectra*. 2007. Vol. 23. № 3. P. 615–633.
311. Porter K., Eeri M., Kennedy R., Bachman R. Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering // *Earthq. Spectra*. 2007. Vol. 23. № 2. P. 471–489.
312. Koutsourelakis P.S. Assessing structural vulnerability against earthquakes using multi-dimensional fragility surfaces: a Bayesian framework // *Probab. Eng. Mech.* 2010. Vol. 25. P. 49–60.
313. Fotopoulou S., Pitilakis K. Vulnerability assessment of reinforced concrete buildings subjected to seismically triggered slow-moving earth slides // *Landslides*. 2013. Vol. 10. P. 563–582. DOI:101007/s10346-012-0345-5.
314. Bell R., Glade T. Quantitative risk analysis for landslides – examples from Bildudalur, NW-Iceland // *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.* 2004. Vol. 4. № 1. P. 117–131.
315. Finlay P.J., Fell R.A. Study of landslide risk assessment for Hong Kong: School of Engineering Report. Sydney: The University of New South Wales, 1996.
316. Winter M.G., Smith J., Fotopoulou S., Pitilakis K., Mavrouli O., Corominas J., Argyroudis S. Physical vulnerability of elements at risk to landslides: methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines // Submitted to *Bull. Eng. Geol. Env.* 2014.

317. Quan Luna B., Blahut J., Van Westen C.J., Sterlacchini S., Van Asch T.W.J., Akbas S.O. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 11. P. 2047–2060. DOI:10.5194/nhess-11-2047-2011.
318. Uzielli M., Lacasse S. Probabilistic estimation of vulnerability to landslides // *Proceedings of the 13th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Margarita, Venezuela, 16–20 July 2007.*
319. Kaynia A.M., Papathoma-Kohle M., Neuhauser B., Ratzinger K., Wenzel H., Medina-Cetina Z. Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of Lichtenstein, Baden-Wurttemberg, Germany // *Eng. Geol.* 2008. Vol. 101. P. 33–48.
320. Li Z., Nadim F., Huang H., Uzielli M., Lacasse S. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards // *Landslides.* 2010. Vol. 7. № 2. P. 125–134.
321. Fuchs S. Vulnerability to torrent events – empirical evidence from Austria // *Geophys. Res. Abstr.* 2008. Vol. 10. Article 04632. ISSN 1029-7006.
322. Papathoma-Kohle M., Keiler M., Totschnig R., Glade T. Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: a debris-flow event in South Tyrol // *Nat. Hazards.* 2012. Vol. 64. P. 2083–2105.
323. Akbas S.O., Blahut J., Sterlacchini S. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows // Malet J.P., Remaitre A., Bogaard T. (eds.). *Proceedings of landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling.* Strasbourg: CERG Editions, 2009. P. 229–233.
324. Mavrouli O., Corominas J. Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010. Vol. 10. P. 2055–2066.
325. Mavrouli O., Corominas J. Vulnerability of simple reinforced concrete buildings in front of the rockfall impact // *Landslides.* 2010. Vol. 7. № 2. P. 169–180.
326. Fotopoulou S., Pitilakis K. Fragility curves for reinforced concrete buildings to seismically triggered slow-moving slides // *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2013. Vol. 48. P. 143–161.
327. Negulescu C., Foerster E. Parametric studies and quantitative assessment of the vulnerability of a RC frame building exposed to differential settlements // *Nat. Hazards Earth. Syst. Sci.* 2010. Vol. 10. P. 1781–1792.
328. Haugen E.D., Kaynia A.M. Vulnerability of structures impacted by debris flow // Chen Z.Y., Zhang J.M., Ho K., Wu F.Q., Li Z.K. (eds.). *Landslides and engineered slopes.* London: Taylor & Francis, 2008. P. 381–387.
329. Zuccaro G., Santo F., De Gregorio D., Di Crescenzo G. Methodology for buildings at site specific to local scales // *Safeland Deliverable D2.5: physical vulnerability of elements at risk to landslides: methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines.* 2011. URL: <http://www.safeland-fp7.eu/>.
330. NIBS. *Earthquake loss estimation methodology HAZUS.* Washington, DC: National Institute of Building Sciences, FEMA, 2004.
331. Corominas J., Mavrouli O. Rockfall quantitative risk assessment // Lambert S., Nicot F. (eds.). *Rockfall engineering: from prediction to mitigation.* New York: Wiley, 2011. P. 255–296.
332. Jaiswal P., Van Westen C.J., Jetten V. Quantitative estimation of landslide risk from rapid debris slides on natural slopes in the Nilgiri hills, India // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 11. P. 1723–1743.
333. Zezere J.L., Garcia R.A.C., Oliveira S.C., Reis E. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal) // *Geomorphology.* 2008. Vol. 94. P. 467–495.
334. Wilson R.A., Moon A.T., Hendricks M., Stewart I.E. Application of quantitative risk assessment to the Lawrence Hargrave Drive Project, New South Wales, Australia // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.). *Landslide risk management.* London: Taylor & Francis, 2005. ISBN 04-1538-043X.
335. Tsao T.C., Hsu W.K., Cheng C.T., Lo W.C., Chen C.Y., Chang Y.L., Ju J.P. A preliminary study of debris flow risk estimation and management in Taiwan // Chen S.C. (ed.). *International Symposium Interpraevent in the Pacific Rim in Taipei, Taiwan, 26–30 April 2010.* P. 930–939.
336. Jakob M., Weatherly H. Debris flow hazard and risk assessment. Jones Creek, Washington // Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds.). *Landslide risk management proceedings.* London: Taylor & Francis, 2005. P. 533–542.
337. Corominas J., Mavrouli O. Quantitative risk assessment for buildings due to rockfalls: some achievements and challenges // *Journee de Rencontre sur les Dangers Naturels – 2011, Lausanne, Switzerland, 17–18 February 2011.*
338. Ghosh S., Van Westen C.J., Carranza E.J., Jetten V.G. Integrating spatial, temporal, and magnitude probabilities for medium-scale landslide risk analysis in Darjeeling Himalayas, India // *Landslides.* 2011. Vol. 9. P. 371–384.
339. Ho K.K.S., Ko F.W.Y. Application of quantified risk analysis in landslide risk management practice: Hong Kong experience // *Georisk.* 2009. Vol. 3. P. 134–146.
340. Remondo J., Bonachea J., Cendrero A. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences // *Geomorphology.* 2008. Vol. 94. P. 496–507.
341. Quinn P.E., Hutchinson D.J., Diederichs M.S., Rowe R.K. Characteristics of large landslides in sensitive clay in relation to susceptibility, hazard, and risk // *Can. Geotech. J.* 2011. Vol. 48. P. 1212–1232.

342. Leroueil S., Locat J., Vaunat J., Picarelli L., Faure R. Geotechnical characterisation of slope movements // Proceedings of the VII Int. Symp. on Landslides, Trondheim, Norway, 17–21 June 1996. Vol. 1. P. 53–74.
343. Leroueil S. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms // *Geotechnique*. 2001. Vol. 51. № 3. P. 197–243.
344. Cascini L., Cuomo S., Ferlisi S., Sorbino G. Detection of mechanisms for destructive landslides in Campania region – southern Italy // Picarelli L., Tommasi P., Urciuoli G., Versace P. (eds.). Proceedings of the Workshop on Rainfall-Induced Landslides: Mechanisms, Monitoring Techniques and Nowcasting Models for Early Warning Systems, Naples, 8–10 June 2009. Napoli: Studio Editoriale Doppiavoce, 2009. Vol. 1. P. 43–51.
345. Amatruda G. et al. A key approach: the IMIRILAND project method // Bonnard Ch., Forlati F., Scavia C. (eds.). Identification and mitigation of large landslides risks in Europe: IMIRILAND PROJECT – European Commission – Fifth Framework Program. Amsterdam: A.A. Balkema, 2004. P. 13–43.
346. Roberds W.J., Ho K.K.S. A quantitative risk assessment and risk management methodology for natural terrain in Hong Kong // Proceedings of the First ASCE Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, CA, USA, 7–9 August 1997.
347. Davis P.A., Goodrich M.T. A proposed strategy for the validation of ground-water flow and solute transport models: technical report. Albuquerque: Sandia National Labs, 1990.
348. Begueria S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management // *Nat. Hazards*. 2006. Vol. 37. № 3. P. 315–329.
349. Van Den Eeckhaut., Vanwalleghem T., Poesen J., Govers G., Verstraeten G., Vandekerckhove L. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium) // *Geomorphology*. 2006. . Vol. 76. № 3–4. P. 392–410.
350. Van Westen C.J., Seijmonsbergen A.C., Mantovani F. Comparing landslide hazard maps // *Nat. Hazards*. 1999. Vol. 20. № 2–3. P. 137–158.
351. Saltelli A., Tarantola A., Campolongo F., Ratto M. Sensitivity analysis in practice – a guide to assessing scientific models. Chichester: Wiley, 2004.
352. Van Asch Th.W.J., Malet J.P., Van Beek L.P.H., Amitrano D. Techniques, advances, problems and issues in the modelling of landslide hazard // *Bull. Soc. Geol. France*. 2007. Vol. 178. № 2. P. 6–35.
353. Alippi C., Sana D., Scotti F. A training-time analysis of robustness in feed-forward neural networks // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks IJCNN04, Budapest, Hungary, 2004. New York: IEEE, 2004. P. 2853–2858.
354. Melchiorre C., Castellanos Abella E.A., Van Westen C.J., Matteucci M. Evaluation of prediction capability, robustness, and sensitivity in non-linear landslide susceptibility models, Guantanamo, Cuba // *Comput. Geosci*. 2011. Vol. 37. № 4. P. 410–425.
355. Homma T., Saltelli A. Importance measures in global sensitivity analysis for nonlinear models // *Reliab. Eng. Syst. Saf*. 1996. Vol. 52. P. 1–17.
356. Baecher G.B., Christian J.T. Reliability and statistics in geotechnical engineering. New York: Wiley, 2003.
357. Gray D.H., Megahan W.F. Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith: research paper INT-97. Washington, DC: USDA, 1981. P. 34.
358. Malet J.-P., Maquaire O., Locat J., Remaitre A. Assessing debris flow hazard associated with slow moving landslides: methodology and numerical analyses // *Landslides J. Int. Consortium Landslides*. 2004. Vol. 1. P. 83–90.
359. Malet J.-P., Van Asch Th.W.J., Van Beek R., Maquaire O. Forecasting the behaviour of complex landslides with a spatially distributed hydrological model // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2005. Vol. 5. № 1. P. 71–85.
360. Blijenberg H.M. Application of physical modelling of debris flow triggering to field conditions: limitations posed by boundary conditions // *Eng. Geol*. 2007. Vol. 91. № 1. P. 25–33.
361. Gorsevski P.V., Gessler P.E., Boll J., Elliot W.J., Foltz R.B. Spatially and temporally distributed modelling of landslide susceptibility // *Geomorphology*. 2006. Vol. 80. № 3–4. P. 178–198.
362. Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M. Estimating the quality of landslide susceptibility models // *Geomorphology*. 2006. Vol. 81. № 1–2. P. 166–184.
363. Rossi M., Guzzetti F., Reichenbach P., Mondini A.C., Peruccacci S. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts // *Geomorphology*. 2010. Vol. 114. № 3. P. 129–142.
364. Blahut J., Van Westen C.J., Sterlacchini S. Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas // *Geomorphology*. 2010b. Vol. 119. № 1–2. P. 36–51.
365. Thiery Y., Malet J.-P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment // *Geomorphology*. 2007. Vol. 92. № 1–2. P. 38–59. DOI:10.1016/j.geomorph.2007.02.020.
366. Heidke P. Berechnung des Erfolges und der Gute der Windstarkevorhersagen im Sturmwarnungsdienst (Calculation of the success and goodness of strong wind forecasts in the storm warning service) // *Geografika Annaler*. 1926. Vol. 8. P. 301–349.
367. Gilbert G.F. Finley's tornado predictions // *Am. Meteorol. J*. 1884. Vol. 1. P. 166–172.
368. Peirce C.S. The numerical measure of the success of predictions // *Science*. 1884. Vol. 4. P. 453–454.

369. Stephenson D.B. Use of the “odds ratio” for diagnosing forecast skill // *Weather Forecast*. 2000. Vol. 15. P. 221–232.
370. Provost F., Fawcett T. Analysis and visualization of classifier performance: comparison under imprecise class and cost distributions // *Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Menlo Park: AAAI, 1997. P. 43–48.
371. Adams N.M., Hand D.J. Comparing classifiers when the misallocations costs are uncertain // *Pattern Recogn.* 1999. Vol. 32. № 7. P. 1139–1147.
372. Provost F., Fawcett T. Robust classification for imprecise environments // *Mach. Learn.* 2001. Vol. 42. № 3. P. 203–231.
373. Hanley J.A., McNeil B.J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve // *Radiology*. 1982. Vol. 143. № 1. P. 29–36.
374. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems // *Science*. 1988. Vol. 240. № 4857. P. 1285–1293.
375. Zinck J.A., Lopez J., Metternicht G.I., Shrestha D.P., Vazquez-Selem L. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2001. Vol. 3. № 1. P. 43–53.
376. Chung C.F., Fabbri A.G. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping // *Nat. Hazards*. 2003. Vol. 30. № 3. P. 451–472.
377. Drummond C., Holte R.C. Cost curves: an improved method for visualizing classifier performance // *Mach. Learn.* 2006. Vol. 65. № 1. P. 95–130.
378. Frattini P., Crosta G.B., Carrara A. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models // *Eng. Geol.* 2010. Vol. 111. P. 62–72.
379. Sterlacchini S., Ballabio C., Blahut J., Masetti M., Sorichetta A. A spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps // *Geomorphology*. 2011. Vol. 125. № 1. P. 51–61.



## Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>