Источник фото: pexels.com. Автор фото: Franklin Pena Gutierrez

ОБ ОЦЕНКЕ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА

ВАСИН МИХАИЛ
Обозреватель

АННОТАЦИЯ

Недавно в журнале «Геоинфо» был опубликован адаптированный перевод [1] очень объемного обзора международной группы исследователей «Рекомендации по количественному анализу оползневых рисков», опубликованного в 2014 году в журнале Bulletin of Engineering Geology and the Environment («Бюллетень по инженерной геологии и окружающей среде») [2]. С 2014 года прошло более десяти лет, но с тех пор мы не видели таких же емких и подробных обзоров, предназначенных для использования инженерами-геологами, работающими в направлении оценки оползневых рисков для их уменьшения или предотвращения. Однако по стопам указанного обзора [2] выходило и выходит множество статей разных авторов. Например, в 2019 году в колумбийской журнале DYNA была опубликована работа латиноамериканских специалистов «Оценка оползневых рисков на откосах и склонах. Методика и ее применение на практике» [3], где после небольшого, но достаточно примечательного обзора литературы на соответствующую тему была предложена общая методика оценки оползневых рисков на основе комплексного подхода, а затем был рассмотрен конкретный случай ее применения на практике. Здесь мы дадим краткий обзор материалов указанной статьи [3].

Обзор выполнен при поддержке ГК «ПЕТРОМОДЕЛИНГ» и Алексея Бершова.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

оползневый риск; оползневая опасность; количественный анализ; устойчивость; предрасположенность; подверженность; уязвимость.

ON LANDSLIDE RISK ASSESSMENT BASED ON AN INTEGRATED APPROACH

VASIN MIKHAIL
Reviewer

ABSTRACT

Recently, the journal "Geoinfo" published an adapted translation [1] of a very voluminous review "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk" by an international group of researchers. The original review [2] was published in the journal "Bulletin of Engineering Geology and the Environment" in 2014. More than ten years have passed since 2014, but since then we have not seen such a capacious and detailed review intended for using by engineering geologists working in the direction of assessing landslide risks for reduction or prevention of them. However, in the footsteps of that review [2], many papers by various authors have been written and are being written. For example, in 2019, the Colombian journal "DYNA" published paper by Latin American specialists "Landslide risk assessment in slopes and hillsides. Methodology and application in a real case" [3]. After a short but quite remarkable review of the literature on the relevant topic, the authors of the paper [3] proposed a general technique for assessing landslide risks on the basis of an integrated approach, and then they considered a specific case of its application in practice. Here we will give a brief overview of the materials of that paper [3].

This review was carried out with the support of the "PETROMODELING" group of companies and Alexey Bershov.

KEYWORDS:

landslide risk; landslide hazard; quantitative analysis; stability; vulnerability; exposure; susceptibility.

ВВЕДЕНИЕ ▶

Несмотря на имеющиеся знания о механизмах неустойчивости склонов/откосов и множества методов защиты, оползневые события по-прежнему приводят к серьезным экономическим потерям и большому количеству человеческих жертв во всем мире, особенно в менее развитых странах, где не хватает средств на дальнейшее изучение оползневых опасностей и рисков. Поэтому необходимы совместные исследования и более активные усилия в сфере соответствующих исследований [1, 2]. Здесь мы кратко рассмотрим материалы весьма примечательной в этом отношении статьи [3], написанной группой специалистов из Мексики, Эквадора и Колумбии, с привлечением небольшого количества дополнительных источников.

О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ОПОЛЗНЕНВОГО РИСКА ▶

Сначала авторы работы [3], ссылаясь на другие публикации, напоминают о том, что к различным видам оползней приводит неустойчивость склонов и откосов. Коэффициенты устойчивости участков и, соответственно, вероятнность возникновения на них оползней зависят от сочетаний геологических, гидрологических, гидрогеологических, геоморфологических условий, геодинамических процессов, частоты и интенсивности атмосферных осадков и сейсмических событий, а также от раститительности, человеческой деятельности и пр. Поэтому время возникновения и даже виды возможных оползней характеризуются неопределенностью. При оценке оползневых рисков неопределенность может увеличиться из-за недостаточной достоверности данных и математических моделей, используемых для анализа. Поэтому различные виды и степень неопределенности необходимо учитывать.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ЭТАПЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА ▶

Далее авторы напоминают, ссылаясь на другие работы, что оползневый риск определяется как вероятность возникновения потерь для подверженных опасности объектов с известной уязвимостью (предрасположенностью к получению ущерба/потерь), если в течение определенного периода возникнет оползень определенной интенсивности:

$$R_{ie|t}=f(H_i\,,\,V_e)|t, \qquad (1)$$

где $R_{ie|t}$ – риск в рассматриваемый период; H_i – опасность интенсивностью i; V_e – уязвимость объектов, подверженных риску,

или

$$R=\sum_i H_i \times \left[\sum_i V_{ji} \times C_j\right], \qquad (2)$$

где R – оцениваемый риск; (H_i – опасность интенсивностью i; V_{ji} – уязвимость j-го объекта к этой опасности; C_j – стоимость или ценность j-го объекта.

Из приведенных формул видно, что в любом случае оценка оползневого риска должна включать:

1) анализ и оценку опасности;
2) определение объектов, подверженных опасности;
3) анализ и оценку уязвимости этих объектов;
4) анализ и оценку риска.

Далее эти этапы рассматриваются в работе [3] более подробно.

ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ▶

Авторы работы [3], ссылаясь на другие статьи, напоминают, что природная опасность – это вероятность возникновения потенциально разрушительного природного явления на определенной территории в течение определенного

периода, причем для ее возникновения должны совпасть во времени предрасположенность территории к оползням и инициирующее событие, то есть:

$$H_i=f(S, P)/t, \qquad (3)$$

где H_i – опасность интенсивностью i; f – функция; S – предрасположенность территории к возникновению опасного события; P – вероятность возникновения этого события; t – период времени.

Стандартизированной методики оценки *предрасположенности* территории к оползням, по крайней мере к моменту написания статьи [3], не было. Но как указывают ее авторы, в ряде публикаций были описаны уровни предрасположенности и предложены ее классификации в соответствии с определенными критериями, в том числе с использованием карт, спутниковых снимков, результатов инвентаризаций ранее произошедших оползней, геоинформационных систем, а также оценок факторов, влияющих на предрасположенность. В самой статье [3] предлагается оценивать предрасположенность с использованием оценок ряда обуславливающих и инициирующих факторов, описанных в работе [4].

Вероятность возникновения оползневого события выражается либо через количество оползней, которые могут возникнуть на исследуемой территории в течение года, либо как вероятность того, что на определенном склоне/откосе произойдут оползни в течение определенного периода времени, например года. С приемлемым приближением эту вероятность можно выразить так [3]:

$$P_x=1-(1-P_a)^x, \qquad (4)$$

где P_a – вероятность для заданного промежутка времени; P_x – вероятность для длительного времени; x – период времени в годах.

Далее авторы напоминают, что *период повторяемости* оползней в основном зависит от периодов повторяемости интенсивных и/или длительных ливней и землетрясений определенной силы, однако оценка опасности должна проводиться для периода времени (x), попадающего в пределы срока службы объектов, подверженных опасности.

К числу наиболее часто используемых *методов оценки вероятности возникновения оползней* авторы относят:

- использование исторических данных для исследуемой территории или территорий со сходными условиями;
- прямую оценку на основе суждений специалистов;
- применение статистических и детерминистических методов.

Таблица 1. Классификация оползневой опасности, рекомендуемая для ее зонирования (по [3, 5])

Опасность	Статистические коэффициенты устойчивости	Псевдостатические коэффициенты устойчивости
Низкая	>1,5	>1,15
Средняя	1,2–1,5	1,0–1,15
Высокая	<1,2	<1,0

Для использования *статистических методов* для оценки оползневой опасности допускается, что условия территории, на которой ранее происходили оползневые события, предрасполагают к возникновению новых оползней, схожих по механизмам с предыдущими. Во многих случаях вероятность таких событий оценивается на основе диапазона частот или периодов повторяемости. При этом, как подчеркивают авторы, применение этих методов для склонов и откосов в городских зонах требует учета антропогенных факторов, которые могут изменить обуславливающие и инициирующие факторы неустойчивости.

Вероятность возникновения оползней при использовании *детерминистических методов* рассчитывается на основе анализа устойчивости, позволяющего определить наиболее вероятные поверхности скольжения и соответствующие им коэффициенты устойчивости. А по этим коэффициентам можно разделить исследуемую территорию на зоны, характеризующиеся высокой, средней или отсутствующей оползневой опасностью.

Поскольку на момент написания статьи [3] не было международного стандарта по классификации и оценке оползневой опасности, ее авторы рекомендовали использовать классификацию на основе диапазонов вероятности, предложенную в работе [5] (таблица 1). Однако они отметили, что при такой оценке необходимо учитывать уровни грунтовых вод в соответствии с периодами повторяемости.

Поскольку оценка оползневой опасности требует оценки вероятности возникновения опасных оползневых событий, то, как указывается в работе [3], для этого можно использовать определение:

- вероятности возникновения определенного опасного оползня $P(H)$;
- пространственной вероятности воздействия потенциального оползня на место расположения конкретного объекта $P(S)$;
- временнОй вероятности воздействия потенциального оползня на движущийся объект $P(T)$ (если объект неподвижен, то $P(T)=1$).

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ОПОЛЗНЕЙ ►

Авторы, ссылаясь на другие работы, напоминают, что уязвимость отражает степень потерь для определенного объекта или их группы в результате природного явления определенной величины и оценивается по шкале от нуля до единицы.

При анализе и оценке уязвимости к воздействию оползней необходимо учитывать физические и социальные аспекты.

К *физическим аспектам* авторы относят:

- вероятный объем или масштаб разрушения откоса или склона;
- величину, интенсивность, скорость и предполагаемое направление движения оползневой массы;
- тип, близость и пространственное распределение подверженных риску объектов (включая население);
- типы конструкций и их устойчивость/сопротивляемость (высоту, материалы, фундаменты и т.д.);
- меры по предотвращению возможных воздействий и/или по уменьшению их последствий (создание/наличие подпорных конструкций, систем мониторинга, систем раннего предупреждения и т.д.).

К *социальным аспектам* авторы относят:

- плотность населения в зоне воздействия;
- объекты, подверженные риску (население, инфраструктуру, транспорт, окружающую среду);
- ключевые виды экономической деятельности;
- степень готовности населения и местных органов власти к опасному событию;

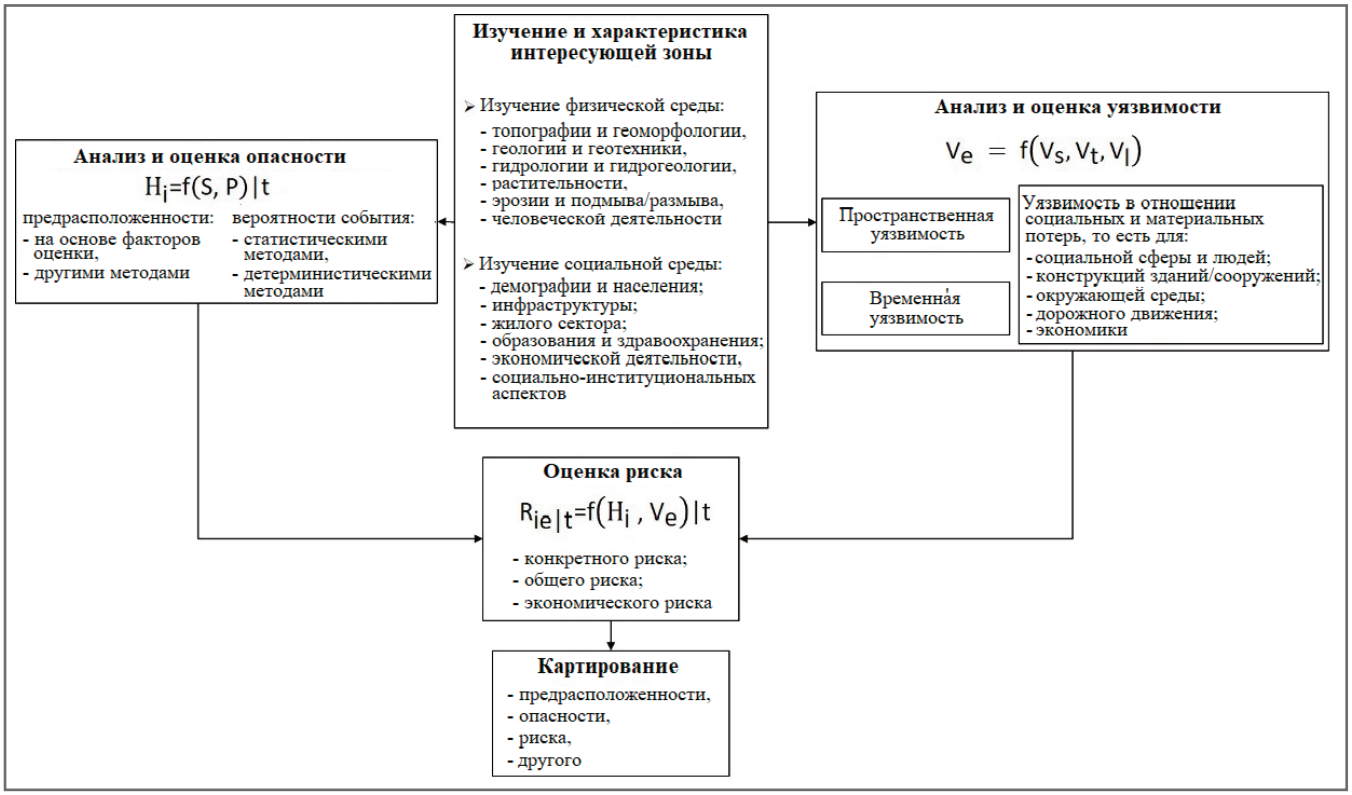

Рис. 1. Общая методика оценки оползневого риска (по [3])

- институциональный и общественный потенциал реагирования на опасное событие;
- возможность побочных эффектов.

С целью упрощения анализа и оценки авторы предлагают разделить уязвимость объектов к воздействию оползней (V_e) на три группы:

- пространственную уязвимость (V_s), зависящую от вероятности воздействия оползня на объект и нанесения ему ущерба;
- временнУю уязвимость (V_t), зависящую от вероятности нахождения объекта в месте воздействия оползня в момент его схода (для неподвижных объектов);
- уязвимость в отношении социальных и материальных потерь (V_l), зависящую от вероятности потерь для объекта, если он будет затронут оползнем, или для социальной сферы (жизни и здоровья людей, функционирования зданий и сооружений, дорожного движения, окружающей среды, экономики).

То есть уязвимость объекта к воздействию оползня можно представить как функцию:

$$V_e = f(V_s, V_t, V_l). \quad (5)$$

Далее авторы кратко рассказывают о рекомендациях из других работ, в которых предлагается применять те или иные показатели и их значения для оценки отдельных типов уязвимости (физической, в том числе в зависимости от глубины фундаментов зданий/сооружений, социальной, экологической, экономической, а также для людей, находящихся на открытой местности, в транспортном средстве, в здании) в соответствии с ожидаемыми диапазонами потерь при воздействии потенциальных оползней.

ПОСЛЕДСТВИЯ СХОДА ОПОЛЗНЯ ►

Для оценки последствий схода оползня для подверженных опасности объектов в работе [3] приводится следующая формула:

$$C = P(S{:}H) \times P(T{:}S) \times V(L{:}T), \quad (6)$$

где $P(S{:}H)$ – пространственная вероятность; $P(T{:}S)$ – временнАя вероятность; $V(L{:}T)$ – уязвимость (она обусловлена прежде всего наличием объекта на пути оползня именно во время этого события, то есть на практике она может меняться от одного момента к другому).

При предположении того, что оползень вызовет ущерб/потери для объекта, который будет находиться на его пути в момент его схода, будет выполняться равенство $P(S{:}H)=P(T{:}S)=1$. Тогда формулу (6) авторы упрощают так:

$$C = V(L{:}T). \quad (7)$$

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ►

Принимая во внимание рассмотренные выше аспекты, авторы предлагают общую методику оценки оползневого риска для откосов и склонов (рис. 4), которая включает такие этапы, как:

1) изучение и характеристика физической и социальной среды интересующей зоны;

2) анализ и оценка опасности в зависимости от предрасположенности территории к оползням (на основе факторов оценки) и от вероятности их возникновения (с помощью статистических и детерминистических методов);

3) анализ и оценка уязвимости объектов риска и ее компонентов (пространственной и временнОй уязвимости, а также уязвимости в отношении социальных и материальных потерь);

4) оценка риска (конкретного, общего, экономического – в зависимости от целей и объема исследования);

5) составление карт (предрасположенности, опасности, риска).

Более подробно эту методику авторы представили в виде блок-схемы (рис. 1).

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ НА ПРАКТИКЕ ►

Далее, что весьма ценно, в статье [3] подробно рассматривается реальный случай

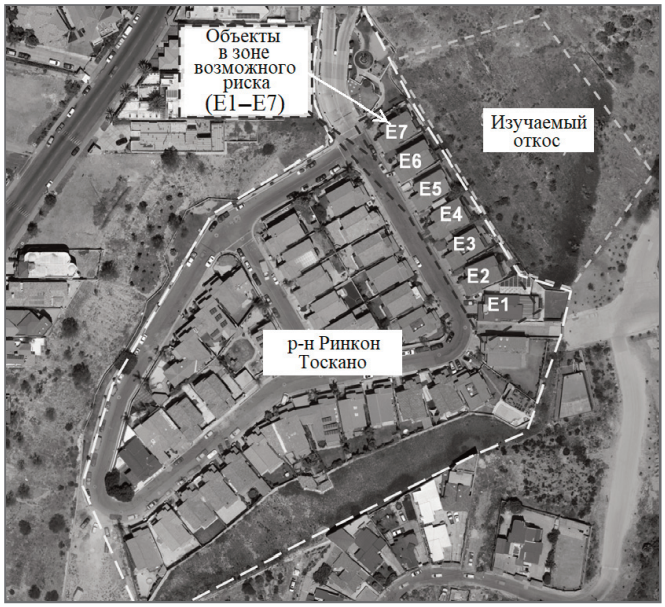

Рис. 2. Изучаемый откос и объекты, находящиеся в зоне потенциального риска (по [3])

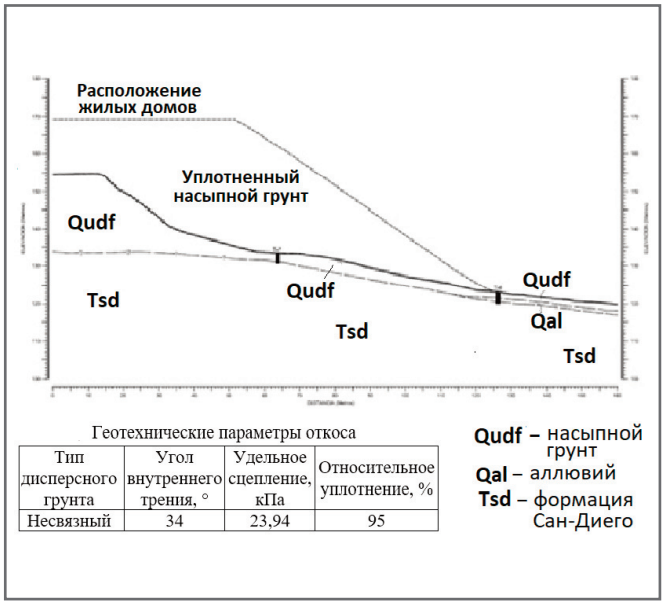

Рис. 3. Один из инженерно-геологических разрезов рассматриваемого откоса и его геотехнические параметры (по [3])

Рис. 4. Расположение девяти разрезов с шагом 20 м (от 0+000,00 до 0+160,00) для анализа устойчивости исследуемого откоса (по [3])

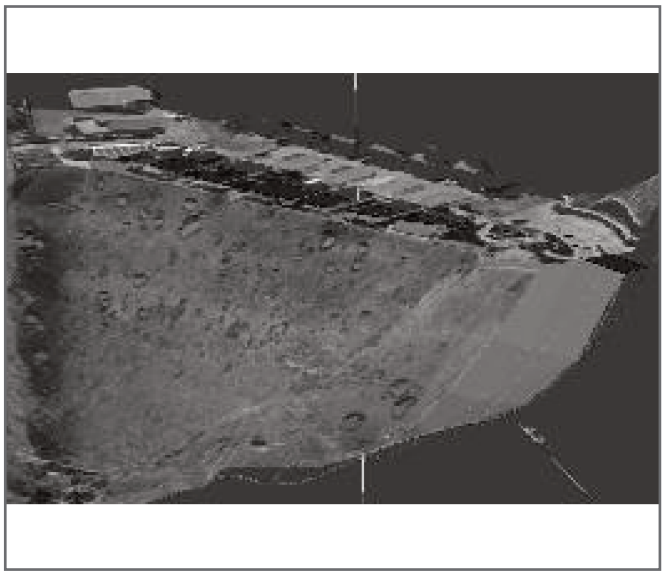

Рис. 5. Трехмерная модель откоса. Механизм разрушения (по [3])

анализа и оценки риска возникновения оползней на откосе насыпи из глинистого песка (высотой 35 м, с углом наклона 30%) и нанесения ущерба построенным на вершине откоса двухэтажным домам в черте мексиканского города Тихуана.

Жильцы этих домов заметили трещины в стенах и на земле. Как показали исследования, данные нарушения были вызваны фильтрацией воды и увлажнением насыпного грунта из-за неисправности в дренажной системе для отвода дождевой воды. Эта неисправность была устранена, но все же в рамках комплекса мер по мониторингу было решено провести оценку оползневого риска для подверженных ему объектов (семи домов – рис. 2, 3).

Для оценки оползневого риска для изучаемого откоса были выполнены все этапы рассмотренной выше методики, но здесь остановимся лишь на некоторых из них.

Как отмечают авторы, для оценки вероятности возникновения оползней на рассматриваемиом откосе не применялись статистические методы, поскольку ни для этого насыпного сооружения, ни для его аналогов еще не накопились сведения об исторических оползнях. А для расчета вероятности возникновения оползня с использованием детерминистических методов было рассмотрено девять разрезов откоса, расположенных с шагом 20 м (рис. 4).

Анализ устойчивости изучаемого откоса выполнялся с учетом воздействий сейсмического ускорения (30% от силы тяжести) и 25%-ного водонасыщения грунта. Для каждого из девяти разрезов были определены: коэффициент устойчивости откоса K_y, глубина возможной поверхности скольжения, механизм разрушения, зона потенциально неустойчивого грунта, зона прогрессирующего разрушения. Результаты показали, что размеры и направления перемещения потенциальных оползней для девяти разрезов схожи.

На основе полученных данных была построена трехмерная модель откоса, на которой видны потенциально неустойчивые зоны и зоны прогрессирующего разрушения (рис. 5).

Таблица 2. Вероятность возникновения оползня (по [3, 4]).

Анализируемая характеристика устойчивости	Вероятность возникновения оползня *P*			
	поверхностного	неглубокого	глубокого	Очень глубокого
Глубина поверхности скольжения *h*	Если h<1,5 м, то P=0,25, неустойчивость	Если h=1,5÷5,0 м, то P=0,50, предел устойчивости	Если h=5,0÷12,5 м, то P = 0,75, предел устойчивости	Если h=12,5÷20 м, то P = 1, устойчивость
Коэффициент устойчивости K_y	Если K_y<1, то P=1	Если K_y=1÷1,3, то P=0,75		Если K_y>1,3, то P=0

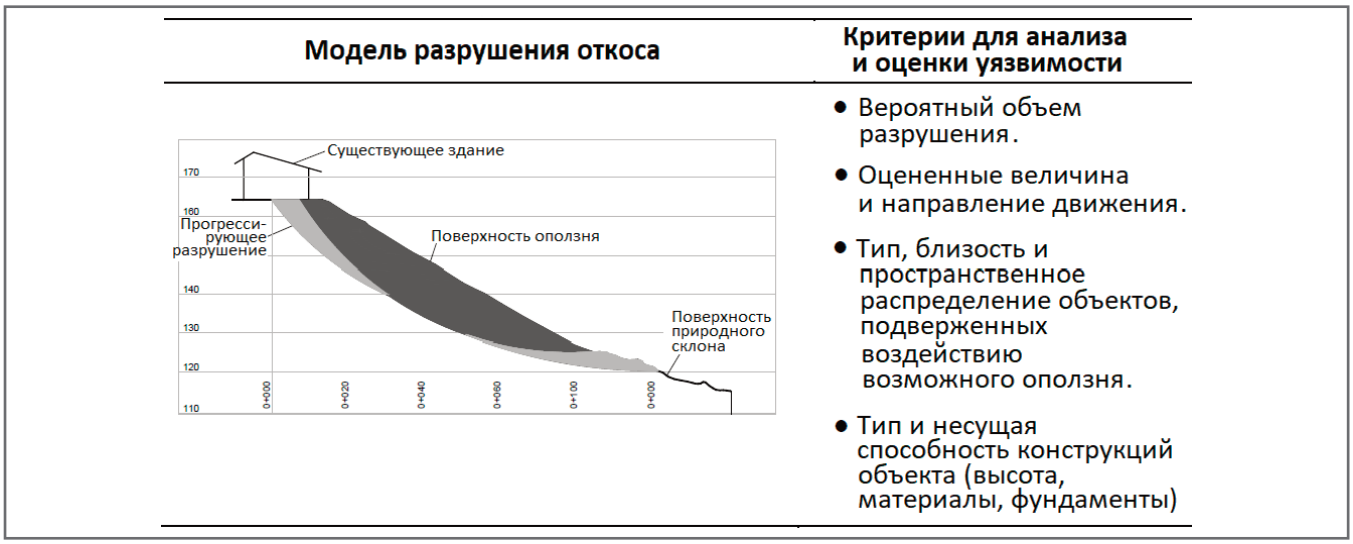

Рис. 6. Модель разрушения откоса для одного из разрезов и критерии для анализа и оценки уязвимости семи двухэтажных домов на вершине откоса (по [3])

Таблица 3. Уязвимость подверженного риску здания

Тип уязвимости	Описание	Значение	Пояснение
В отношении пространственного эффекта (V_s)	Выражает ожидаемый диапазон потерь в конструкции в зависимости от вероятности того, что оползень окажет воздействие на здание	0,25	Ожидается, что локальные повреждения составят 25% от конструкции здания
В отношении временнОго эффекта (V_t)	Выражает вероятность того, что здание будет находиться на пути оползня в момент его схода	1,00	Здание находится на пути оползня в момент его схода
В отношении социальных и материальных потерь (V_l)	Выражает ожидаемые потери в конструкциях здания в зависимости от глубины фундамента и глубины оползня	1,00	Глубина оползня превышает 10 м
Уязвимость объекта (здания) 0,75			

Далее для каждого разреза на основе результатов анализа устойчивости с использованием факторов оценки, предложенных в статье [4], авторами работы [3] были получены вероятности возникновения разных оползней (таблица 2). При этом общая вероятность возникновения оползня – это среднее значение из вероятностей, полученных при анализе поверхности скольжения и K_y.

В соответствии с коэффициентами устойчивости и вероятностями возникновения оползней было выполнено зонирование исследуемой территории по оползневой опасности – низкой и средней.

Предрасположенность исследуедмого откоса к оползням была получена с использованием оценки влияния параметров, не учитываемых детерминистическими методами.

Был проведен количественный анализ предрасположенности откоса к оползням и опасности их возникновения как результата взаимодействия предрасположенности и вероятности схода оползня с учетом критических коэффициентов устойчивости.

Анализ и оценка уязвимости выполнялись для указанных выше семи домов на вершине исследуемого откоса. Для этих объектов ожидаемая степень потерь и разрушений в результате воздействия возможного оползня оценивалась на основе модели разрушения откоса и ряда критериев (рис. 6).

Все семь зданий были расположены на одинаковом расстоянии от бровки откоса и имели схожие характеристики,

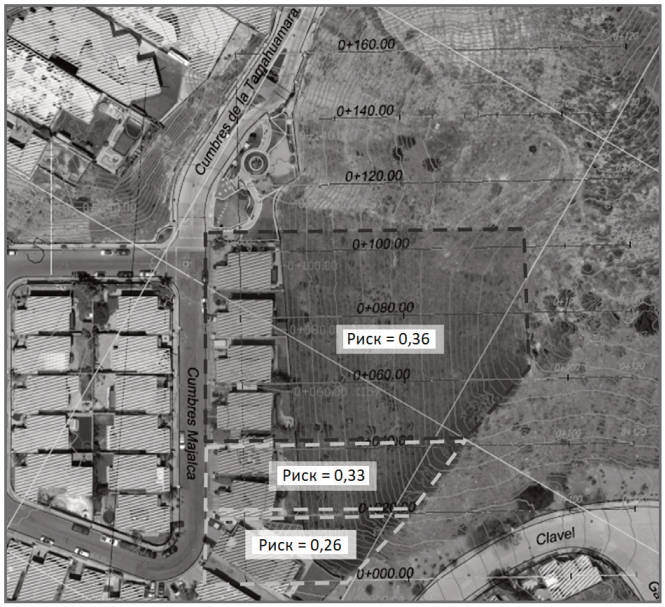

Рис. 7. Зонирование конкретных рисков для исследованного участка

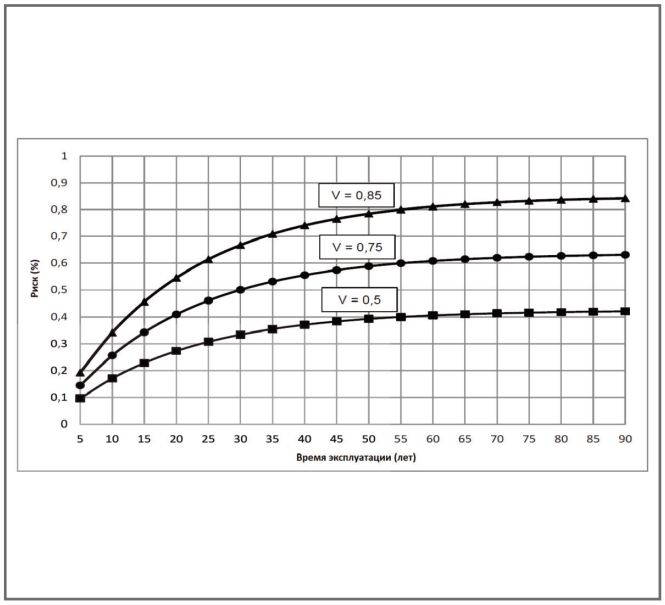

Рис. 8. Развитие рисков во времени при разной уязвимости (*V*) при периоде повторяемости 20 лет

как и все девять разрезов этого откоса. Были получены величины уязвимости такого здания (таблица 3). При этом социальная (человеческая) уязвимость была принята равна нулю, поскольку пострадавших людей не ожидалось.

На основе полученных оползневой опасности для исследуемого откоса и уязвимости подверженных риску объектов были количественно определены риски для конкретных зданий, которые расположены на вершине данного откоса. И было выполнено зонирование этих конкретных рисков на карте (рис. 7).

Также были построены кривые развития рисков во времени для подверженных ему объектов, для которых опасность является более высокой, при разной уязвимости (*V*) с учетом периода повторяемости 20 лет (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в работе [3] была рассмотрена общая методика оценки оползневого риска на основе комплексного подхода. И был разобран пример использования этой методики на практике. Ее применение, по мнению предложивших его авторов, значительно снижает неопределенность для проектов, для которых устойчивость склонов/откосов играет ключевую роль, и поэтому может быть ценным инструментом в руках проектировщиков и органов власти для предотвращения катастрофических событий, связанных с оползнями.

Список литературы

1. Коромина Х., Ван Вестен К., Фраттини П., Кашини 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. № 12. С. ...–.... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-12-...-....
2. 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. 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.
3. Oliva-Gonzalez A.O., Ruiz-Pozo A.F., Gallardo-Amaya R.J., Jaramillo H.Yu., Landslide risk assessment in slopes and hillsides. Methodology and application in a real case // DYNA. 2019. January – March. Vol. 86. № 208. P. 143–152. ISSN 0012-7353 DOI: http://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.72341.
4. Cuanalo O.A., Oliva A.O., Gonzalez C. Estabilidad de laderas. Analisis mediante factores de valuacion // Revista IngeoPress. 2007. № 164. P. 38–44.
5. Lopez P.A. Analisis de umbrales de precipitacion de procesos de remocion en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur // Cuadernos de Geografia: Revista Colombiana de Geografia. 2015. Vol. 24. № 2. P. 93–112. DOI:10.15446/rcdg.v24n2.50212.

https://t.me/geoinfonews