

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. И. Маций, Е. В. Безуглова, Д. В. Плешаков

ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Монография

Краснодар
КубГАУ
2015

УДК 624.131.1:656
ББК 38.2
М36

Р е ц е н з е н т ы:

А. Н. Богомолов – д-р техн. наук, профессор
(Волгоградский государственный
архитектурно-строительный университет);
Э. М. Добров – д-р техн. наук, профессор
(Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет)

Маций С. И.

М36 Оценка оползневой риска транспортных сооружений :
монография / С. И. Маций, Е. В. Безуглова, Д. В. Плешаков. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – 120 с.

ISBN 978-5-94672-948-2

В монографии освещены вопросы оценки риска при строительстве и эксплуатации транспортных сооружений на оползневых территориях. Исследовано влияние используемых методов вероятностного моделирования оползневых процессов на надежность получаемых результатов. Представлена комплексная методика оценки и управления оползневым риском на транспортных объектах с учетом стадийности проектирования.

Предназначена для научных работников и специалистов в области инженерно-геологических изысканий и проектирования, а также аспирантов, магистрантов и студентов строительных вузов и факультетов.

УДК 624.131.1:656
ББК 38.2

ISBN 978-5-94672-948-2

© Маций С. И., Безуглова Е. В.,
Плешаков Д. В., 2015
© ФГБОУ ВПО «Кубанский
государственный аграрный
университет», 2015

ВВЕДЕНИЕ

На предварительных стадиях проектирования противооползневых мероприятий объектов транспортного строительства, при отсутствии детальных инженерно-геологических изысканий требуется классифицировать объекты по степени оползневой опасности и риска. Существующие в настоящее время инструкции и другие нормативные документы не содержат единой методики по оценке и управлению оползневым риском, а рекомендации не имеют теоретического обоснования.

При выборе противооползневых мероприятий требуется определить оптимальный баланс между увеличением экономичности и эффективности объекта, с одной стороны, и соответствующим ростом риска, с другой. Применение вероятностного подхода позволит учитывать изменчивость свойств грунтов и определять количественные выражения оползневой опасности и риска оползневых смещений.

Согласно СП 47.13330.2010 «Инженерные изыскания для строительства», в отчете по инженерно-геологическим изысканиям должна быть дана оценка опасности и риска от геологических и инженерно-геологических процессов. Наличие разработанной и обоснованной методики по управлению оползневым риском позволит выбрать надежное решение на каждой стадии проектирования объектов транспортного строительства.

ГЛАВА 1. ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ

1.1 Транспортные сооружения на горных территориях

Горные районы отличаются сложностью и разнообразием геологических, гидрологических, гидрогеологических, тектонических условий. Формирование склонового рельефа, как правило, не прекращается и происходит под влиянием эрозионной деятельности временных и постоянных водотоков, абразии, смещений грунтов, обвалов, образования карстовых полостей, тектонических движений и др. Техногенная деятельность также является одним из основных рельефообразующих факторов. В настоящее время антропогенное воздействие (без учета сельскохозяйственных работ) приводит к тому, что перемещению подвергаются десятки кубических километров горных пород, массой более 100 млрд т. [56]. В связи с этим, строительство и эксплуатация транспортных сооружений, сопровождающиеся созданием насыпей и дорожных выемок, особенно в горных районах, имеют существенные особенности.

Так, значительная протяженность трасс затрудняет выполнение изыскательских работ. Возведение насыпей, устройство выемок, подрезки в строительный период сопровождаются большими объемами земляных работ, существенно изменяя напряженное состояние склонов. Последующая эксплуатация дорог осуществляется под действием динамических нагрузок от транспортных средств, в том числе, тяжелых многоосных грузовых автомобилей. Комплексное влияние геологических

и техногенных факторов способствует резкой активизации экзогенных процессов.

Экзогенные геологические процессы (ЭГП) протекают, в большинстве случаев, медленно, приводя, однако, к существенным изменениям поверхности Земли. Их действие заключается в том, что постепенно происходит разрушение, дезинтеграция горных пород и осадков и перемещение продуктов выветривания с возвышенных участков в понижения [26].

На территории России распространены практически все известные типы ЭГП: оползневые, обвальные, осыпные, селевые, эрозионные, абразионные, суффозионные, карстовые, криогенные, подтопления. По данным мониторинга, на 01.01.2006 выявлено порядка 230 000 различных проявлений экзогенных геологических процессов, в том числе 36 000 активных [108]. При этом, первое место занимает овражная эрозия – 74 660 проявлений (32 % от суммарного количества проявлений всех типов), из которых 8 502 – активных; второе место – карстовый процесс – 52 748 (23 %), при этом активных проявлений – 5 908; третье – оползневые смещения грунтов – 27 422 (12 %), в 3 610 случаях – активное развитие.

Геодинамическая активность территории (в частности, экзогенная), также как и деятельность человека, является объективным фактором, влияющим на устойчивость объектов промышленного и гражданского назначения [65]. Так, воздействие опасных природных процессов и явлений способствовало возникновению в 1992–2008 гг. в России большей части природно-техногенных аварий (88 % всех природно-техногенных чрезвычайных ситуаций) [42]. Очевидно, что эти явления представляют существенную опасность и для функционирования транспортных сооружений, расположенных в горных районах. Особое внимание следует уде-

лять оползневым процессам, активизация которых в настоящее время резко возросла в связи с количественным и качественным изменением транспортного потока. Последствия оползневого воздействия связаны со значительными трудозатратами и ущербом как прямым, так и косвенным.

По территориям федеральных округов оползни имеют следующую распространенность [108]:

- Центральный округ: 3 654 проявлений, из них 280 – активных;
- Северо-Западный: 364 проявления, все 364 – активные;
- Южный: 16 230 проявлений, из которых 1 088 – активных;
- Приволжский: 4 396 и 1 824, соответственно;
- Уральский: 36 и 17, соответственно;
- Сибирский: 1 478 и 237, соответственно;
- Дальневосточный: 1 264 проявлений; по степени активности нет сведений.

Как видим, наибольшее количество оползней приходится на Южный регион (~60 % от их общего количества на январь 2006 г.). В 2010–2012 гг. в Южном регионе отмечена резкая активизация оползневых процессов, в частности, в г. Сочи и его окрестностях.

Территория г. Сочи располагается в приморской части южного склона Главного Кавказского хребта, пересекается многочисленными водотоками, оврагами, балками. Крутизна естественных склонов составляет, в среднем, 15–35°. По климатическим условиям г. Сочи входит в зону влажных субтропиков. Обилие атмосферных осадков способствует активизации неблагоприятных инженерно-геологических процессов: эрозии, суффозии, химического выветривания, ухудшению свойств грунтов, развитию оползней. К оползнеобразующим фак-

торам на территории Большого Сочи можно отнести тектоническое строение и рельеф (постоянные факторы) и современные тектонические движения (медленно изменяющийся фактор). При этом новейшие тектонические движения могут оказывать косвенное влияние на экзогенные факторы активизации оползней [39].

В 2011 г. на автомобильной дороге Джубга – Сочи произошло несколько оползневых срывов грунта [101]. В феврале на км 56+680 оползнем разрушено 2/3 полотна дороги (рисунок 1.1). В апреле на км 41+660 вместе с грунтовыми массами смещена по склону каменная подпорная стена и деформирована часть дорожного полотна. Развитие оползневых процессов отмечено и на других участках трассы.



Рисунок 1.1 – Оползень на км 56+680 автомобильной дороги А-147 Джубга – Сочи (февраль 2011 г.)

На автомобильной дороге Майкоп – Туапсе в 2011 г. также выявлена активизация оползневых проявлений. По отношению к трассе это выражено формированием и развитием трещин отрыва, видимых на дорожном покрытии; в ряде случаев отмечаются просадочные деформации земляного полотна; на отдельных участках – разрушение полотна дороги и сужение ширины проезжей части (рисунок 1.2).

В июле 2011 г. на строящейся автомобильной дороге от горноклиматического курорта «Альпика – Сервис» до ручья Сулимовский сошли несколько селей. Основной причиной явилось насыщение атмосферными осадками отвалов грунта, отсыпанных с нарушениями условий производства работ на оползневых территориях.



Рисунок 1.2 – Трещина отрыва на дорожном покрытии на км 32+535 автомобильной дороги Майкоп – Туапсе (2011 г.)

Возникновение подобных ситуаций связано с подготовительными работами к Олимпиаде 2014 г. и, как

следствие, увеличением техногенной нагрузки на склоны [17, 109]. Трассы эксплуатируемых и строящихся автомобильных дорог А-147 Джубга – Сочи – граница с Республикой Абхазия, Дублер Курортного проспекта, Майкоп – Туапсе и другие расположены в сложных условиях среднегорного и низкогорного эрозионно-тектонического рельефа. Например, участок строительства II очереди Дублера Курортного проспекта (г. Сочи) находится в зоне влияния 35 оползней, повсеместно развиты процессы выветривания глинистых аргиллитов, отмечена эрозия временными и постоянными потоками [47]. Любые нарушения технологии ведения строительных работ, превышение расчетных нагрузок способствуют активизации ЭПП, в большинстве случаев сопровождающихся возникновением чрезвычайных ситуаций на дорогах или деформациями дорожного полотна.

Как показывает анализ литературных источников, антропогенная деятельность во многих случаях играет наибольшую роль в формировании и развитии оползневых смещений, чем процессы эрозии (образование промоин и оврагов, размыв берегов и русел ручьев и небольших рек) и выветривания [62]. При этом влияние техногенного воздействия выражается, чаще всего, в нарушении условий равновесия грунтовых накоплений в процессе строительства (подсечка – пригрузка склонов при устройстве выемок (полувыемок) и насыпей (отвалов)), а также в увеличении обводненности пород (изменение величины инфильтрующихся атмосферных осадков при вырубке лесов и распахке склонов). Уничтожение растительности и дернового покрова в процессе строительства способствует более активному воздействию процессов увлажнения – сушки на грунтовый массив и формированию оползневых смещений даже в

тех случаях, когда расчетные значения коэффициентов устойчивости склонов больше единицы [71].

При проектировании откосов насыпей и выемок необходимо учитывать прочность горных пород, склонность грунтов к процессам набухания-усадки, ползучести и т.п. [10, 14, 25, 33]. В изверженных скальных породах откосы выемок принимают близкими к вертикальным; в осадочных – назначаются в зависимости от направления и угла падения пластов; если вид и строение пород меняются по глубине, то заложение откоса – переменное [66]. В случае, когда горные скальные и полускальные породы подвержены выветриванию, в подошве склонов устраивают закуветные полки шириной до двух метров, в которых накапливаются смещенные продукты выветривания. В процессе содержания искусственных сооружений эти полки периодически очищаются. Направление развития опасных геологических процессов при этом можно прогнозировать, составляя карту влияющих факторов, таких как температурные, антропогенные, биогенные, влажностные, географические [2]. Оценивая свойства глинистых грунтов необходимо учитывать ряд особенностей [30]:

- расчетную схему насыпи;
- предварительно запроектированное расположение слоя грунта с влажностью выше оптимальной;
- наличие пассивных зон, в которых уплотнение под нагрузкой от веса вышележащего грунта не будет происходить, а также активных областей, в пределах которых будет иметь место доуплотнение, и др.

При проектировании трассы часто возникает необходимость в эстакадах и тоннелях, а в случае пересечения трассой рек, ручьев, водохранилищ и прочих системах переходов через водотоки, например, мостовых переходов. Все это приводит к общему увеличению сто-

имости строительства и последующего содержания объектов.

В зависимости от категории дороги, топографических, инженерно-геологических условий района предъявляются различные требования к плану, продольному профилю, поперечному сечению горного тоннеля. В сложных условиях или при необходимости обхода участка неустойчивых грунтов тоннель располагают на криволинейной трассе; припортальные участки выполняют в виде подходных выемок, параметры которых зависят от рельефа местности и условий территории [24]. При проектировании порталных стен тоннелей на автомобильной дороге Адлер – Красная Поляна (Краснодарский край) особое внимание уделено изучению тектоники, так как результаты исследования оползней на Черноморском побережье Кавказа показывают, что именно разломная тектоника во многом способствует снижению устойчивости склонов [69].

Таким образом, горные транспортные сооружения находятся в особых условиях. По возможности трассы проектируются в обход оползней. При вынужденном расположении на оползневых склонах для обеспечения устойчивости земляного полотна требуется устройство дополнительных искусственных сооружений: водоотводных лотков, дренажей, водопропускных труб, подпорных стен, удерживающих сооружений и т. п.

1.2 Проблемы инженерной защиты автомобильных дорог от оползневых воздействий

Устойчивость земляного полотна автомобильных дорог в районах развития опасных инженерно-геологических процессов обеспечивается комплексом противооползневых мероприятий [8, 13, 19, 20, 22, 23] (рисунки 1.3, 1.4). К ним относятся: регулирование поверхностно-

го стока, строительство дренажей, возведение удерживающих и берегоукрепительных сооружений, выполнение противозрозионной защиты, агролесомелиоративных мероприятий, выполнение мероприятий по предупреждению разрушения сооружений [28].



Рисунок 1.3 – Система водоотвода на км 63+600 автомобильной дороги Майкоп – Туапсе

Несмотря на предпринимаемые меры, оползни на дорогах – не редкость. Прямые последствия смещений связаны с изменением режима движения транспортных средств при сужении ширины проезжей части, вплоть до полной остановки движения на несколько дней; введением реверсивного режима; ограничением скорости; ограничением нагрузок на смежные полосы.

Прежде, чем разработать комплекс мероприятий необходимо выяснить механизм смещения грунтов, оп-

ределить мощность оползня, оценить эффективность. Например, в случае оползней вязко-пластического течения, распространенных на Черноморском побережье Кавказа, одним из часто применяемых видов защитных сооружений на автомобильных дорогах являются подпорные стены [41]. К их преимуществам, по сравнению с другими видами противооползневых мероприятий, относятся малые габариты, сравнительно невысокая стоимость, возможность производить работы механизированным способом.



Рисунок 1.4 – Строящиеся свайно-анкерные удерживающие сооружения на низовом склоне на ПК 82 автомобильной дороги на Обходе г. Сочи

При этом имеются как положительные, так и отрицательные примеры работы подпорных стен. Так, мелкое заложение фундамента без учета изменения свойств грунтов под воздействием выветривания, развитие оползня в глубину подрезанного склона и т. п. могут привести к деформации и разрушению с угрозой деформации дорожного полотна, а при недостаточной вы-

соте стены грунты оползня-потока переползают через ее верх [41, 70]. В то же время подпорные стены хорошо себя зарекомендовали как мера предупреждения мелких оползней типа вязко-пластического течения при подрезках естественного склона.

Аналогично можно сказать и о работе дренажных сооружений, мероприятиях по разгрузке склона и др. Эффективность их применения должна обосновываться результатами длительных стационарных наблюдений за изменениями инженерно-геологических условий склонов. Однако в большинстве случаев такие наблюдения не предусматриваются.

Рассмотрим существующий в настоящее время порядок осуществления инженерной защиты транспортных сооружений от оползней. Он предусматривает 5 основных этапов:

- проведение инженерных изысканий;
- выполнение расчетов устойчивости;
- расчет параметров защитных сооружений;
- строительство;
- эксплуатация (содержание).

Анализ фактических ситуаций показывает, что возникновение аварийных ситуаций на автомобильных дорогах в горных районах не редко подготавливается уже на первом этапе и связано с качеством выполненных инженерных изысканий [5].

Как известно, объемы изыскательских работ зависят от многих факторов [1]:

- категории дороги и ее значимости;
- рельефа местности;
- климатических и природных условий;
- сложности геологических и грунтовых условий.

Очевидно, что недостоверность сведений о геологическом строении, гидрогеологическом режиме, физико-

механических свойствах грунтов далее сказывается неверным расчетом в процессе оценки устойчивости склонов и назначении параметров сооружений. Последствия неточностей изысканий проявляются в период эксплуатации (а иногда и в процессе строительства), когда Заказчик остается один на один с построенными объектами и изменяющейся инженерно-геологической средой.

Для предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций необходимо предусматривать меры, позволяющие своевременно реагировать на изменения инженерно-геологических условий. К таким мероприятиям относятся оценка оползневой опасности и риска, мониторинг, осмотр, обследования склонов и искусственных сооружений.

При осуществлении защитных мероприятий в техническом задании на инженерные изыскания, как правило, не предусматривается программа наблюдений за инженерно-геологическими процессами. Это лишает проектные, строительные и эксплуатирующие организации возможности своевременно реагировать на изменения в инженерно-геологической среде и не позволяет принять срочные меры в случае активизации оползневых процессов (или выявления несоответствия изыскательской информации фактическим инженерно-геологическим условиям) [4].

Кроме самой трассы, нередко в инженерной защите нуждаются прилегающие объекты, например, частные жилые застройки. Подобная ситуация сложилась на участке автомобильной дороги регионального значения в г. Сочи Санаторий «Прогресс» – село Каштаны, км 2+750 (рисунок 1.5).

На момент первого визуального обследования в апреле 2007 г. выявлены деформации дорожного полотна,

обочины, прилегающей к низовому откосу, конструкции водопропуска (рисунок 1.6), а также жилого строения частного домовладения (рисунок 1.7). Отмечены оседание полотна дороги, трещины продольные и поперечные, трещины отрыва на обочине низового откоса. На дорожном покрытии отчетливо видны следы неоднократного ремонта. Конструкция водопропуска деформирована продольными трещинами в железобетонных блоках портала дюкера.



Рисунок 1.5 – Общий вид на участок автомобильной дороги Санаторий «Прогресс» – село Каштаны, км 2+750 (2007 г.)



Рисунок 1.6 – Деформация конструкции водопропуска на участке автомобильной дороги Санаторий «Прогресс» – село Каштаны, км 2+750



Рисунок 1.7 – Деформации жилого домовладения на верховом склоне участка автомобильной дороги Санаторий «Прогресс» – село Каштаны, км 2+750: заделанные трещины, свежая кирпичная и бутовая кладка

В 4–5 метрах выше дюкера расположено частное домовладение. На момент обследования частный жилой дом носил ярко выраженные следы свежего ремонта – новой кладкой выложена стена нижнего этажа и частично верхнего, цементно-песчаным раствором заделана трещина, проходящая практически по периметру одной из стен верхнего этажа.

По результатам обследования установлено:

- основной причиной развития деформаций дорожного полотна является незатухающий процесс оползневого смещения грунта поверхностного чехла на низовом откосе;

- возникновение подвижек грунта связано с его постоянным переувлажнением из-за застоя и сброса воды из водопропуска и коммуникаций. Кроме того, выходящий поток воды размывает грунт низового откоса, увеличивая его естественную крутизну и ослабляя прочностные свойства;

- основная причина деформаций частного жилого домовладения на верховом склоне связана со смещением грунтов, вызванным подрезкой при строительстве водопропускного сооружения.

В сложившейся ситуации рекомендовано:

- выполнение инженерно-геологических изысканий для установления свойств грунтов, глубины поверхности скольжения;

- обследование и оценка технического состояния водопропускного сооружения и водопроводных коммуникаций;

- возведение лотка в подошве верхового откоса с организацией сброса поверхностных вод из водопропуска на низовой откос, в том числе, с применением мер по гашению скорости потока воды;

- осушение водонасыщенного массива низового откоса посредством поперечных дренажей;

- восстановление конфигурации низового откоса с возведением подпорной стены на однорядном свайном ростверке;

- при необходимости, ремонт коммуникаций;

- ремонт водопропускного сооружения.

1.3 Оценка риска проявления оползневых процессов на транспортных сооружениях

Оползневые процессы, развивающиеся на склонах и откосах хозяйственно освоенных территорий, могут приводить к различным неблагоприятным последствиям, т. е. к возникновению прямого и косвенного ущерба. Ущерб выражается причиненным вредом жизни и здоровью людей, материальными убытками, нарушением баланса с окружающей природной средой. Например, если здание или сооружение расположено на структурно-неустойчивых грунтах, то ущерб от деформаций может составить от 20 до 100 % сметной стоимости сооружений [64].

Для того, чтобы оценить возможность воздействия оползневого процесса на объект, необходимо установить

вероятность активизации оползня и вероятность возникновения неблагоприятных последствий, т. е. выполнить анализ и оценку риска. Целью анализа и оценки риска является получение необходимой информации для того, чтобы обеспечить безопасность функционирования конкретного объекта [51]. В общем виде риск-анализ можно представить в виде двух этапов [11]:

- оценка риска, то есть определение количественных показателей при различных сценариях развития неблагоприятных процессов и стратегиях защиты;
- управление риском, то есть выбор мероприятий, снижающих риск до приемлемого уровня, и контроль последствий их внедрения.

Существуют различные подходы, на основе которых анализируется и оценивается оползневой риск [96]. Применительно к транспортным сооружениям можно выделить следующие подходы:

- зонирование территории;
- применение табличных форм для оценки показателей риска;
- диагностика участков трасс;
- использование методики наименьших потерь.

В методе зонирования территорий применяется система балльных характеристик, позволяющая провести качественный анализ риска. Методика табличных форм дает возможность прогнозирования состояния склона или откоса по количественным показателям, характеризующим вероятность обрушения грунтов. При диагностировании внимание обращается на внешние признаки, по которым оцениваются степень развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов и состояние противооползневых сооружений. Методика наименьших потерь предлагает принципы оценки риска эксплуатации объектов, примыкающих к трассе.

Для автомобильных дорог в горной местности можно также применять классификацию их по уровню оползневой опасности (высокий, средний, низкий и т. п.) и уровню риска (I, II и т. п.). Это позволяет увидеть целостную картину оползневой ситуации по протяженности различных трасс. Например, исследователи [106] определили наибольший уровень риска для основных автомобильных дорог Непала.

Как уже отмечено, основными параметрами оползневого риска являются вероятность смещения грунтов и возможные последствия. Для их оценки используются вероятностные методы.

При оценке устойчивости откосов и склонов естественно имеют место погрешности как результат недоучета различных факторов. Некоторые из них, например, отсутствие достоверности оценки геологического строения, допущения в программе изысканий, трудно рассмотреть формально; другие, такие как оценка свойств грунта, характеризуются совокупностью параметров, которые возможно установить путем статистического анализа.

В геотехнике существует множество источников погрешностей, исходящих из параметров материалов, а также методов моделирования и испытаний. Неточности при определении свойств грунтов, например, связаны с их пространственной изменчивостью, несовершенством методов измерений, систематическими ошибками в оценке по выборочной совокупности.

Традиционные геотехнические расчеты используют подход коэффициента устойчивости для двух случаев. Так, для расчета фундаментов уравнение предельной нагрузки *Терцаги* дает окончательный результат, который затем разделяется коэффициентом устойчивости на допустимые уровни нагрузки. С другой стороны, в

расчете устойчивости откосов, коэффициент запаса принимается снижением сдвиговых сопротивлений грунта в условиях предельного равновесия. В любом случае, коэффициент устойчивости представляет собой обобщенный показатель, неявно включающий в себя источники изменчивости и погрешности, характерные для геотехнических расчетов.

Ниже рассмотрены подходы, включающие исследование изменчивости грунтов, с помощью статистических методов. Предполагается, что рассматриваемые параметры грунта (например, угол внутреннего трения, сцепление и сжимаемость) являются случайными переменными, которые могут быть выражены в виде функции плотности распределения вероятности. Тогда проблема сводится к определению функции плотности вероятности некоторого исхода, который зависит от вводимых случайных переменных. Результат при этом может интерпретироваться в терминах вероятностей, позволяя принять следующие обозначения:

- расчетная нагрузка на фундамент даст вероятность предельной допустимой нагрузки p_1 , %;
- насыпь имеет вероятность обрушения p_2 , %;
- вероятность осадки фундамента – p_3 , %;
- вероятность превышения расчетного предела уровня грунтовых вод – p_4 , %.

Крайне важным является целостное понимание того, как случайные переменные влияют на функции, которые от них зависят. Для решения геотехнических задач необходимо знать, какие показатели нуждаются в более тщательном исследовании и даже в рассмотрении некоторого фактора, влияние которого не может быть уменьшено ни одним возможным способом. Большинство вероятностных методов не позволяют получить эту информацию.

Определение частных производных или их численных приближений является важнейшим этапом вероятностного метода. При численном дифференцировании приращение независимой переменной должно быть как можно более точным, поскольку погрешность существенно определяет результат. Как правило, производные берутся в точке, определенной ожидаемыми значениями независимых переменных.

Допустим, что случайная переменная X может быть описана функцией плотности вероятности (PDF), $f_x(x)$. Если $g(x)$ – функция случайной переменной x , то ожидаемая величина $g(x)$ – его среднее значение, которое может быть оценено с помощью функции плотности распределения вероятности:

$$E[g(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cdot f_x(x) \cdot dx \quad (1.1)$$

Моменты:

Первый момент: математическое ожидание

$$\mu_x = E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f_x(x) \cdot dx \quad (1.2)$$

Второй момент: дисперсия

$$V[X] = \sigma_x^2 = E[(X - \mu_x)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 f_x(x) dx. \quad (1.3)$$

Третий момент: асимметрия

$$v_x = \frac{E[(X - \mu_x)^3]}{\sigma_x^3} = \frac{1}{\sigma_x^3} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^3 f_x(x) dx. \quad (1.4)$$

Линейная функция двух случайных переменных X и Y :

$$E[a + bX + cY] = a + bE[X] + cE[Y]. \quad (1.5)$$

Сумма многочисленных случайных переменных $X_1, X_2, \dots$ и т. д.:

$$E[X_1 + X_2 + \dots + X_n] = E[X_1] + E[X_2] + \dots + E[X_n]. \quad (1.6)$$

Сумма функций двух случайных переменных X, Y :

$$E[f(X) + g(Y)] = E[f(X)] + E[g(Y)] \quad (1.7)$$

Нелинейная функция двух случайных переменных X и Y может быть выражена разложением в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} f(X, Y) = f(E[X], E[Y]) + (X - E[X]) \frac{\partial f}{\partial x} + (Y - E[Y]) \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{1}{2} (X - E[X])^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{1}{2} (Y - E[Y])^2 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{1}{2} (X - E[X])(Y - E[Y]) \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} + \\ + \frac{1}{2} (Y - E[Y])(X - E[X]) \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} + \dots \end{aligned} \quad (1.8)$$

где все производные выражены в средних значениях.

Таким образом, первый порядок точности

$$E[f(X, Y)] = f(E[X], E[Y]) \quad (1.9)$$

и второй порядок:

$$\begin{aligned} E[f(X, Y)] = f(E[X], E[Y]) + \frac{1}{2} V[X] \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{1}{2} V[Y] \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \\ + \text{cov}[X, Y] \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Определяем дисперсию:

Дисперсия случайной переменной X :

$$V[X] = E[(X - \mu_x)^2] = E[X^2] - (E[X])^2. \quad (1.11)$$

Дисперсия линейной функции X :

$$V[a + bX] = b^2 E[(X - \mu_x)^2] = b^2 V[X]. \quad (1.12)$$

Дисперсия линейной функции двух случайных переменных X и Y :

$$V[a + bX + cY] = b^2 V[X] + c^2 V[Y] + 2bc \text{cov}[X, Y]. \quad (1.13)$$

Дисперсия линейной функции некоррелируемых случайных переменных:

$$V[a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n] = a_1^2 V[X_1] + a_2^2 V[X_2] + \dots + a_n^2 V[X_n]. \quad (1.14)$$

Ковариация:

$$\text{cov}[X, Y] = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]. \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} E[XY] - E[X]E[Y] = \text{cov}[X, X] = E[(X - \mu_x)^2] \\ = E[X^2] - (E[X])^2 = V[X] = \sigma_x^2 \end{aligned} \quad (1.16)$$

Коэффициент корреляции:

$$\rho = \frac{\text{cov}[X, Y]}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho \leq 1. \quad (1.17)$$

Таким образом, вероятностный подход к оценке устойчивости склонов и откосов позволяет, в какой-то

мере, учесть существующие неопределенности геотехнических параметров.

1.4 Вероятностные методы в оценке риска

В основу оценки оползневой опасности положены качественный, полуколичественный и количественный подходы [75, 76, 83]. В районах активного развития опасных склоновых процессов важно количественно оценить опасность развития оползневых деформаций [46]. Оценка риска осуществляется с использованием вероятностных методов расчета, применением различных теорем, критериев, допущений, моделирования [88]. На основе представленных выше формул существуют различные методы вероятностной оценки событий, такие как *FOSM*, *PEM*, *FORM*, *Монте-Карло* [82, 93]. Разнообразие методов объясняется наличием допущений, упрощений, неопределенностей, поставленными геотехническими задачами, техническими возможностями их решения и т.п. Кроме того, опасные геологические явления вызываются разнообразными факторами и их сочетаниями, при чем сочетания могут быть уникальными, возникающими, например, 1 раз в 10 или 100 лет [29].

Так, метод *FOSM* относительно прост и учитывает влияние изменчивости случайных переменных на зависимые переменные. Для этого используется разложение исследуемой функции в ряд *Тейлора*. Видоизмененное распределение, выраженное линейными терминами (т. е. «первый порядок»), используется совместно с первыми двумя моментами случайной переменной (или переменных), с целью определения значений первых двух моментов зависимой переменной (т. е. «второй момент»).

Вследствие ограничения ряда *Тейлора* членами первого порядка, точность метода снижается, если при

этом вторые и более высокие производные функции принимают достаточно большие значения. Кроме того, метод не допускает никаких предположений относительно формы функции плотности вероятности, описывая случайные переменные, используя при этом только их математическое ожидание и стандартные девиации (отклонения). Асимметрия функции (третий момент) не принимается во внимание.

Недостатком традиционного метода *FOSM* является то, что он, как правило, не обеспечивает достоверной оценки пространственной корреляции случайной переменной. Свойства грунта на двух геотехнических площадках могут иметь идентичные генеральные средние значения и их стандартные девиации, однако, на одной площадке, свойства быстро изменяются от участка к участку («низкая» длина пространственной корреляции), а на другой – изменяются постепенно («высокая» длина пространственной корреляции). Преимущество метода *FOSM* в том, что он показывает относительное влияние каждой переменной на полную погрешность в доступной и легко сводимой в таблицу форме.

Алгоритм расчета методом *FOSM* состоит из следующих этапов:

1. Идентифицировать искомые переменные, влияющие на неопределенность.
2. Вычислить математическое ожидание, дисперсию, коэффициенты корреляции и длины автокорреляции переменных.
3. Определить, каким образом дисперсия распределена между пространственной и систематической погрешностью и нейтрализовать ошибки измерения, если это возможно.
4. Найти ожидаемое значение функции F в этом случае.

5. Получить частные производные функции переменных, используя численное дифференцирование.

6. Установить влияние каждой переменной на систематическую и пространственную вариацию функции. Учесть пространственный эффект, чтобы оценить аппроксимированные результаты.

7. Определить вариацию функции.

8. Вычислить индекс надежности β и вероятность обрушения p_f .

9. Проанализировать результаты, определить относительное влияние различных параметров и сделать выводы.

Метод точечной оценки (*PEM*) – альтернативный способ учета случайных переменных. Разработан Розенблю [103, 104], рассматривался также в работах Харра [91]. Подобно *FOSM*, метод *PEM* не требует допущений относительно специфической формы функции плотности вероятности входных параметров, однако при этом способен оценить до трех параметров (математическое ожидание μ , дисперсию σ^2 , и асимметрию ν). По существу *PEM* – это метод оценки математического ожидания, представляющий собой формулы численного интегрирования, которые содержат «точки дискретизации» и «исследуемые параметры». В данном методе предполагается замена непрерывной функции плотности вероятности дискретной функцией, имеющей аналогичные первые три главных момента. *FOSM* и *PEM*, как правило, не обеспечивают достоверной оценки пространственной корреляции.

Алгоритм расчета методом *PEM*:

1. Определить отношение между зависимыми и случайными переменными $W = f(X, Y...)$.

2. Вычислить местоположения двух точек выборки для каждой входной переменной. Для отдельно взятой

случайной переменной X и асимметрии ν_x , точки выборки дают:

$$\xi_{u+} = \frac{\nu_x}{2} + (1 + (\frac{\nu_x}{2})^2)^{1/2}, \quad (1.18)$$

и

$$\xi_{x-} = \xi_{x+} - \nu_x, \quad (1.19)$$

где ξ_{x+} и ξ_{x-} – стандартные девиации, определяющие положение точек выборки справа и слева от математического ожидания соответственно.

Если функция зависит от n переменных, существует 2^n точек выборки, соответствующие всем комбинациям двух точек выборки для каждой переменной. При $n = 2$ существует 4 точки выборки:

$$(\mu_u + \xi_{u+}\sigma_u, \mu_y + \xi_{y+}\sigma_y), \quad (1.20)$$

$$(\mu_u + \xi_{u+}\sigma_u, \mu_y - \xi_{y-}\sigma_y), \quad (1.21)$$

$$(\mu_u - \xi_{u-}\sigma_u, \mu_y + \xi_{y+}\sigma_y), \quad (1.22)$$

$$(\mu_u - \xi_{u-}\sigma_u, \mu_y - \xi_{y-}\sigma_y). \quad (1.23)$$

Если асимметрия не учитывается или принимается равной нулю, получаем:

$$\xi_{u+} = \xi_{u-} = \xi_{y+} = \xi_{y-} = 1 \quad (1.24)$$

3. Найти веса P_i для каждой из 2^n точек выборки. Поскольку функция плотности вероятности выделяет некую «область», значения вероятности должны также суммироваться к этой «области». «Веса» точек могут учи-

тывать корреляцию между двумя или более случайными переменными.

Для отдельной случайной переменной X :

$$P_{X+} = \xi_{X-} / (\xi_{X+} + \xi_{X-}), \quad (1.25)$$

$$P_{X-} = 1 - P_{X+}. \quad (1.26)$$

Для n случайных переменных при отсутствии асимметрии, Кристиан и другие [84], получили общее выражение для определения весов, которые принимают во внимание коэффициент корреляции ρ_{ij} в пределах от i -той и j -той переменных:

$$P_{S_1 S_2 \dots S_n} = 1 / 2^n (1 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (s_i \cdot s_j \cdot \rho_{ij})), \quad (1.27)$$

где s_i принимает значение “+” для точек, превышающих среднюю величину, и “-” – для точек, меньших средней величины. Выражение $s_i s_j$ при суммировании определяет значение коэффициента корреляции, а индексы веса P обозначают положение точки выборки. Например, для точки, оцениваемой в $(x_1, y_1) = (\mu_x + \alpha_x, \mu_y - \alpha_y)$, $s_1 = +$ и $s_2 = -$ отрицательный коэффициент, с весом P_{+-} .

Для многочисленных случайных переменных, учитывая асимметрию, вычисление весов значительно сложнее. Розенблю [104] представил веса для случая при $n = 2$ в следующем виде:

$$P_{S_1 S_2} = P_{X_{S_1}} * P_{Y_{S_2}} + s_1 s_2 * [\rho_{xy} / ((1 + (v_x / 2)^3)(1 + (v_y / 2)^3)^{1/2})]. \quad (1.28)$$

Обозначения идентичны предыдущему уравнению. $P_{X_{S_1}}$ и $P_{Y_{S_2}}$ – веса для переменных X и Y , определенные как одиночные случайные переменные; $v_{X/Y}$ – асимметрия распределения случайных переменных. Для логнор-

мального распределения, коэффициент асимметрии, v , определяется из величины коэффициента вариации $C.O.V.$ [78].

$$v = 3 * C.O.V. + C.O.V.^3 \quad (1.29)$$

4. Определить значения зависимых переменных в каждой точке. Обозначим эти переменные как $W_{X(+ \text{ или } -)}$, $Y(+ \text{ или } -)$..., в зависимости от точки, в которой определяется W . Для n случайных переменных W определяется для 2^n точек.

В целом, метод точечной оценки (*РЕМ*) позволяет определить искомые значения первых трех моментов зависимой переменной, используя суммирование. Здесь, P_i и W_i – вес и значение зависимой переменной, связанные с положением точки i , где i находится в пределах от 2 до 2^n . P_i является некоторым P_{s_i, s_j} , найденным в пункте 3, и W_i – W_{s_i, s_j} значение зависимой переменной, определенной в конкретном положении из пункта 4:

Первый момент:

$$\mu_w = E[W] = \sum_{i=1}^{2^n} P_i W_i. \quad (1.30)$$

Второй момент:

$$\sigma_w^2 = E[(W - \mu_w)^2] = \sum_{i=1}^{2^n} P_i (W_i - \mu_w)^2 = \sum_{i=1}^{2^n} P_i (W_i)^2 - \mu_w^2. \quad (1.31)$$

Третий момент:

$$v_w = \frac{E[(W - \mu_w)^3]}{\sigma_w^3} = \frac{1}{\sigma_w^3} \sum_{i=1}^{2^n} P_i (W_i - \mu_w)^3 = \frac{1}{\sigma_w^3} \sum_{i=1}^{2^n} P_i (W_i)^3 - 3\mu_w P_i (W_i)^2 + 2\mu_w^3. \quad (1.32)$$

В инженерной практике предполагается, что коэффициент устойчивости имеет нормальное распреде-

ние, и вычисление вероятности обрушения осуществляется через индекс надежности β .

Алгоритм вычисления индекса надежности:

1. Идентифицировать все переменные, затрагивающие устойчивость насыпи: геометрию, вес и напряжения материалов насыпи, а также свойства грунтов основания.

2. Достоверно определить (математическое ожидание) каждую переменную, $E[X_i]$, и на основании этого вычислить коэффициент устойчивости $E[F]$ методом отсеков.

3. Оценить погрешность для каждой переменной и, в частности, ее дисперсию, $Var[X_i]$, основываясь на неточности свойств грунта.

4. Исследовать уязвимость, вычисляя частные производные F по отношению к каждой из сомнительных переменных или аппроксимируя каждую производную отношением разностей $\Delta F/\Delta X_i$.

5. Использовать соответствующее уравнение для получения $Var[F]$.

6. Определить индекс надежности β .

Методы вероятностной оценки *FORM* детально рассмотрены Дитлевсоном [86], Бихером и Кристианом [77] и другими исследователями.

Основной задачей метода *FORM*, как и *FOSM*, является определение индекса надежности β и заданного предела устойчивости M . Индекс надежности вычисляется по формуле [85]:

$$\beta = \frac{E[M]}{\sqrt{Var[M]}}, \quad (1.33)$$

и показывает, насколько среднее значение предела устойчивости отдалается от нуля (принимаемого за точку разрушения) в пределах стандартных девиаций.

В классическом случае, предел устойчивости является разностью между пределом прочности и нагрузкой:

$$M = R - L. \quad (1.34)$$

Таким образом, разрушение произойдет при $M < 0$, и вопрос заключается в том, какова вероятность этого события. Отношение между индексом надежности и вероятностью обрушения выражается как:

$$p_f = 1 - f(\beta), \quad (1.35)$$

предполагая, что R и L являются нормально распределенными случайными независимыми переменными, где $f(\beta)$ – площадь под кривой стандартного нормального распределения слева от β . Применительно к задаче пассивного давления грунта, L может быть нагрузкой, и R – предельным сопротивлением.

Поверхность, где $M = 0$, является критической или поверхностью обрушения. Если L не зависит от R :

$$Var[M] \cong \left(\frac{\partial M}{\partial R}\right)^2 Var[R] + \left(\frac{\partial M}{\partial L}\right)^2 Var[L] = Var[R] + Var[L] = \sigma_R^2 + \sigma_L^2, \quad (1.36)$$

тогда

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}}. \quad (1.37)$$

Предел устойчивости может быть определен как:

$$M = \ln\left(\frac{R}{L}\right) = \ln(R) - \ln(L). \quad (1.38)$$

Поскольку обрушение происходит при $M < 0$:

$$E[M] \cong \ln(\mu_R) - \ln(\mu_L), \quad (1.39)$$

и

$$\begin{aligned} \text{Var}[M] &\equiv \left(\frac{\partial M}{\partial R}\right)^2 \text{Var}[R] + \left(\frac{\partial M}{\partial L}\right)^2 \text{Var}[L] = \\ &= \frac{\text{Var}[R]}{R^2} + \frac{\text{Var}[L]}{L^2} = V_R^2 + V_L^2, \end{aligned} \quad (1.40)$$

где V_R и V_L – коэффициенты вариации R и L соответственно.

Это дает различные индексы надежности

$$\beta = \frac{\ln(\mu_R) - \ln(\mu_L)}{\sqrt{V_R^2 + V_L^2}}. \quad (1.41)$$

Метод *FORM* позволяет вычислить расстояние от средней точки до критической поверхности в направлении градиента средней точки. *Газофер* и *Линд* [92] решили задачу поиска минимального расстояния между средней точкой и поверхностью обрушения, рассматривая только вдоль направления градиента.

В общем случае, представим, что предел устойчивости, M , является функцией последовательности случайных переменных, $X = \{X_1, X_2, \dots\}$,

$M = f(X_1, X_2, \dots)$, и случайные переменные $X_1, X_2, \dots$ имеют ковариацию матрицы C . Тогда индекс надежности *Газофера – Линда* определяется как

$$\beta = \min \sqrt{(x - E[X])^T C^{-1} (x - E[X])}, \quad (1.42)$$

что является минимальным расстоянием между поверхностью скольжения (при $M = 0$) и средней точкой ($E[X]$) в пределах значений стандартных девиаций (C^{-1}). Определение β повторно; выберем значение точки x_0 , которая лежит на кривой $M = 0$, и вычислим β_0 ; выбрав другую точку X_1 при $M = 0$ вычислим другое значение β_1 и так далее.

Индекс надежности *Газофера – Линда* – минимальный среди возможных значений β_i . На практике суще-

ствует несколько алгоритмов оптимизации, включающих градиент M , который находит точку там, где поверхность скольжения перпендикулярна исходной линии. Расстояние между двумя этими точками – β .

В настоящее время используется подход, основанный на случайных числах и называемый методом *Монте-Карло*. Данный метод позволяет рассматривать как стохастические, так и детерминированные системы.

В большинстве случаев применение метода *Монте-Карло* требуется для оценки функции в значительном количестве точек, поэтому популярность его исторически совпадает с началом применения компьютеров. ЭВМ позволяют легко получать так называемые псевдослучайные числа (при решении задач их применяют вместо случайных чисел). Это привело к широкому внедрению метода во многие области науки и техники (статистическая физика, теория массового обслуживания, теория игр и др.). Данный метод используют для вычисления интегралов, в особенности многомерных, решения систем алгебраических уравнений высокого порядка, исследования различных сложных систем (автоматического управления, экономических, биологических и различных инженерных задач).

Сущность метода состоит в следующем. Требуется найти значение a некоторой изучаемой величины. Для этого выбирают такую случайную величину X , математическое ожидание которой равно a :

$$M(X) = a. \quad (1.43)$$

Практически же поступают так: производят n испытаний, в результате которых получают n возможных значений X ; вычисляют среднее арифметическое

$$\bar{x} = (\sum x_i) / n \quad (1.44)$$

и принимают $\bar{x}$ в качестве оценки (приближенного значения) a^* искомого числа a :

$$a \cong a^* = \bar{x}. \quad (1.45)$$

Поскольку метод *Монте-Карло* требует проведения большого числа испытаний, его часто называют методом статистических испытаний. Теоретически он указывает, как наиболее целесообразно выбрать случайную величину X , как найти ее возможные значения. В частности, разрабатываются способы уменьшения дисперсии используемых случайных величин, в результате чего уменьшается ошибка, допускаемая при замене искомого математического ожидания a его оценкой a^* . Нахождение возможных значений случайной величины X (моделирование) называют «разыгрыванием случайной величины».

Алгоритм расчета методом *Монте-Карло* состоит из следующих этапов:

1. Определить функции распределения вероятностей искомых переменных.
2. Использовать генерацию случайных чисел для получения произвольных значений каждой переменной, основываясь на соответствующем распределении вероятности.
3. Применить выборочные значения для решения соответствующей функции и вычисления коэффициента устойчивости.
4. Алгоритм повторяется многократно для построения статистического распределения переменных (в данном случае коэффициента устойчивости).

Таким образом, разнообразие вероятностных методов позволяет их успешно использовать при решении сложных геотехнических задач, в том числе для оценки устойчивости и оползневой риска склонов и откосов.

ГЛАВА 2. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

2.1 Неопределенности моделирования оползневых процессов

Устойчивость склонов зависит от различных параметров, таких как геометрия дневной и подстилающих поверхностей, литологическое строение массива, гидрогеологический режим, свойства грунтов и др. В свою очередь, эти параметры имеют ряд неопределенностей, связанных с неоднородностью толщи, изменчивостью показателей ее физико-механических свойств, изменениями уровня воды и порового давления и т. п. Среди источников неопределенностей, оказывающих наибольшее влияние на результаты геотехнического анализа устойчивости, выделяются следующие:

- сложность и непредсказуемость техно-природных процессов;
- разнообразие и сложность механизмов смещений грунта;
- упрощенность моделей, неспособность расчетных схем представить реальное физическое поведение системы при вычислении коэффициента устойчивости склона;
- имеющиеся исходные данные, всегда включающие в себя определенную степень приближения, погрешности измерений и т. п.;
- невозможность точно рассчитать входные расчетные параметры для моделирования.

При выполнении расчетов устойчивости склонов источниками неопределенностей являются, например, трудности количественной оценки свойств грунтов в массиве, так как их пространственная изменчивость не мо-

жет быть точно установлена и учтена; изменения порогового давления воды; ошибки испытаний и многие другие факторы. Одним из важнейших вопросов расчета устойчивости склонов является выбор значений показателей физико-механических свойств грунтов. В зависимости от способа испытания (и даже при одном и том же способе испытания), показатели сцепления и угла внутреннего трения могут отличаться в 2÷4 раза. Это видно, например, из таблицы 2.1, обобщающей результаты анализа данных испытаний образцов глинистых грунтов на срез на оползневых и оползнеопасных участках склонов и вдольтрассовых дорог газопровода «Россия – Турция» [6].

Таблица 2.1 – Нормативные значения механических свойств глинистых грунтов оползневых участков склонов и вдольтрассовых дорог газопровода «Россия – Турция» [6]

Параметр	Диапазон изменения нормативной величины при неконсолидированном срезе водонасыщенного образца	Диапазон изменения нормативной величины при срезе по подготовленной и смоченной поверхности
Сцепление, c , кПа	34,0–48,4	13,0–23,5
Угол внутреннего трения, φ , град	9,7–22,1	5,1–13,0

Расчеты устойчивости выполняются на основе детерминированного и вероятностного подходов. Как правило, детерминированное моделирование процесса смещения упрощено и сосредоточено на получении параметров разрушения откоса, не учитывая неопределенности. Рассчитываемый параметр – коэффициент устойчивости K_y – определяется как соотношение между силами сопротивления и сдвига вдоль потенциальной поверхности скольжения. Склон считается устойчивым, если расчетное значение K_y превышает единицу. В детерминированном расчете неопределенность значений коэффициента устойчивости математически оценить не

представляется возможным из-за отсутствия диапазона входящих и получаемых параметров.

Вероятностный подход к анализу устойчивости склонов позволяет не только получить соответствующие параметры разрушения, но и оценить надежность (или степень неопределенности) результата. Состояние склона определяется средней величиной и дисперсией коэффициента устойчивости, а также вероятностью обрушения. При таком моделировании анализ надежности позволяет оценить неопределенность коэффициента устойчивости склона.

Для выражения степени неопределенности результата часто используется параметр «индекс надежности» (β) и применяются различные подходы, основанные на методах точечной оценки (*PEM*), *Монте-Карло*, второго момента первого порядка (*FOSM*) и др. [74, 99, 100]. Основные положения методов рассмотрены в главах 1.3–1.4. Общая схема выполнения вероятностных расчетов откосов и склонов автомобильных дорог приведена на рисунке 2.1.

Так, чтобы оценить неопределенность возможности возникновения оползня методом *FOSM*, коэффициент устойчивости K_y выражается через функцию стохастических входных параметров. После этого можно определить среднее значение и дисперсию K_y , а также вероятностное распределение. Затем рассчитываются индекс надежности и вероятность обрушения грунтов.

Моделирование на основе метода *Монте-Карло* используется для получения вероятности распределения зависимых случайных величин (в частности, коэффициента устойчивости) по заданным вероятностям распределения независимых случайных параметров (физико-механических свойств грунтов, колебаний уровня грунтовых вод и т. п.).

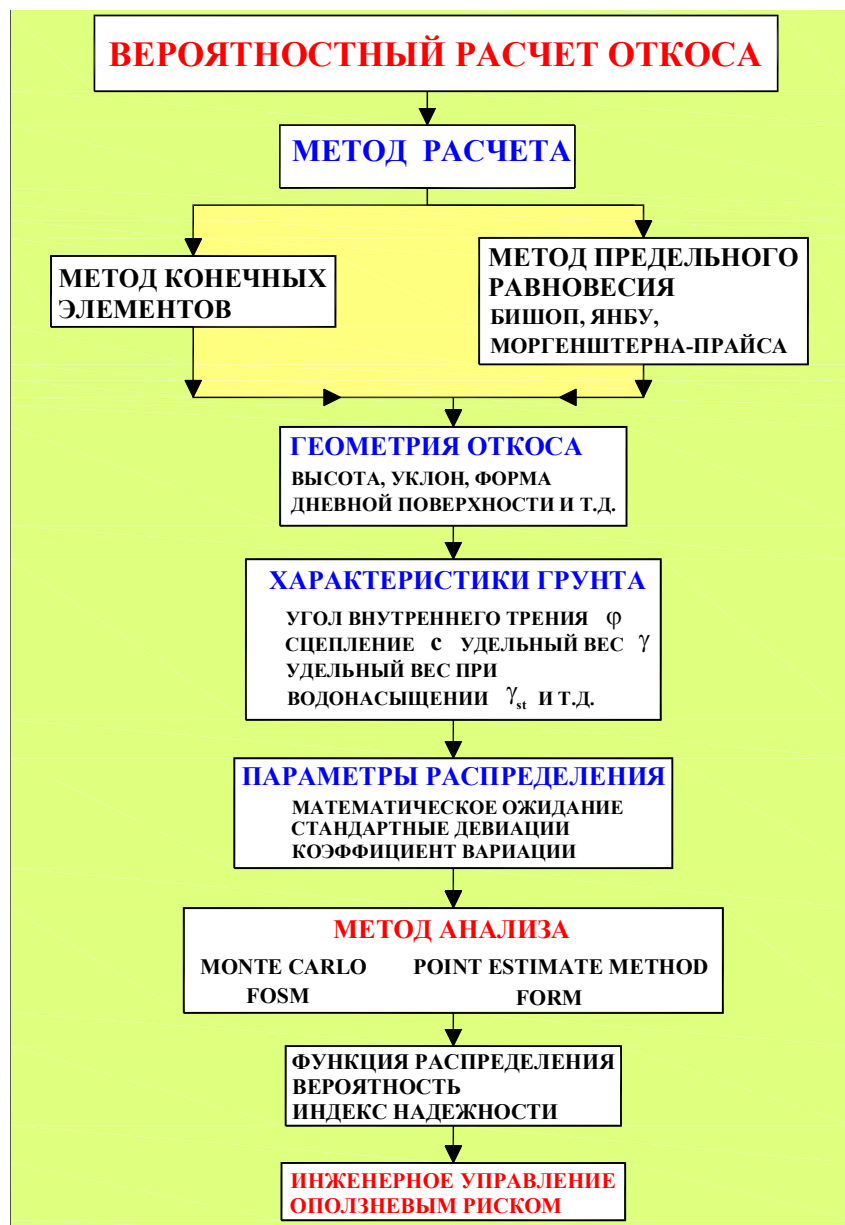


Рисунок 2.1 – Методика вероятностных расчетов оползнеопасных склонов и откосов

Как правило, метод предполагает наличие значительного количества переменных величин свойств грунтов, представленных в виде нормального или логнормального распределения [15]. Коэффициент устойчивости склона вычисляется для каждого возможного сочетания заданных значений.

Таким образом, мы имеем ряд величин коэффициента устойчивости с соответствующими вероятностями. На этой основе можно определить вероятность обрушения P склона (откоса). Неопределенность результата количественно оценивается по величине индекса надежности β [82]:

$$\beta = (K_{y^{cp}} - 1,0) / \sigma(K_{y^{cp}}), \quad (2.1)$$

где $K_{y^{cp}}$ – ожидаемое (среднее) значение коэффициента устойчивости склона, $\sigma(K_{y^{cp}})$ – стандартное отклонение коэффициента устойчивости.

Вероятность обрушения вычисляется в процессе интегрирования площади под кривой плотности нормального распределения для коэффициента устойчивости. Вероятность обрушения P (% или доли) представляет собой функцию индекса надежности β при нормальном распределении величин коэффициента устойчивости. Следует отметить, что β является более информативным показателем, чем K_y [98].

Задача определения степени устойчивости склонов и откосов – статически неопределимая. Для ее решения разработаны различные методы, предполагающие разбиение оползневого тела на условные отсеки. Относительно взаимодействия отсеков между собой и о распределении межотсековых сил принимаются различные допущения о направлении, величине или точке приложения. Выбрав соответствующее допущение, определя-

ется коэффициент устойчивости как отношение суммы удерживающих сил (моментов) к сумме сдвигающих.

Очевидно, что точность результата расчета зависит от задаваемой функции межотсекового взаимодействия. Обоснования различных допускаемых функций производились многими исследователями-геотехниками [81, 87, 89, 94, 102]. Делались допущения о функции в виде постоянной, полусинусоидальной, трапецевидной, колоколообразной и др. В настоящее время, в частности, предложено [37] не принимать какие-либо формы функций сил межотсекового взаимодействия, а задавать их с учетом различной работы верховой, средней и низовой частей оползня.

На практике для оценки устойчивости также применяется метод конечных элементов (МКЭ), на основе которого определяется напряженно-деформированное состояние массива. Однако здесь возникает проблема сходимости, особенно в предельном состоянии.

Отметим, что в современных компьютерных комплексах возможно выполнять комбинированный расчет, определяя на первом этапе напряженно-деформированное состояние, а далее, с использованием теории предельного равновесия и разбиения на отсеки, коэффициент устойчивости откоса (склона). Но, в любом случае, однозначно правильных методов оценки устойчивости нет. Имеются области применения того или иного метода, при котором он дает результат, наиболее приближенный к реальному состоянию склона. Однако всегда имеется погрешность в оценке устойчивости откосов и склонов.

Проведем анализ устойчивости однородного и двухслойного откосов и оценим неопределенность результата наиболее часто применяемыми в геотехнических расчетах методами *FOSM* и *Монте-Карло*. Расчеты выполним

в программном комплексе *Slope/W* (лицензия № 94573) [90] с использованием четырех общеизвестных методов: *Ordinary*, *Bishop*, *Janbu* и *GLE* (подробное описание можно найти, например, в [80, 105]), а также. В методе *GLE* межотсековое взаимодействие задавалось согласно современным исследованиям [37].

Метод *Ordinary* (Феллениуса) является упрощенным. Предназначен для оценки устойчивости откосов, имеющих круглоцилиндрическую поверхность смещения; при разбиении оползня на условные отсеки взаимодействие между ними (силы, действующие по граням) не учитывается.

Метод *Bishop* учитывает соотношения моментов при определении коэффициента устойчивости. Влияние сил, действующих между отсеками, игнорируется.

Метод *Janbu* принимает во внимание равновесие сил в отсеках. Влияние моментов в предельном равновесии не учитывается.

GLE, метод общего предельного равновесия, несмотря на имеющиеся допущения, является наиболее усовершенствованным и успешно реализуемым при решении практических геотехнических задач. Преимущество метода в том, что он учитывает все условия статического равновесия, то есть как соотношение удерживающих и сдвигающих сил, так и моментов.

2.2 Вероятностный анализ и оценка неопределенности в расчете устойчивости однородного откоса

Исследуемый однородный откос представлен глинистым грунтом. Первоначально выполнен вероятностный расчет устойчивости с использованием метода *Монте-Карло*. Для этого заданы средние (из выборочной совокупности) значения физико-механических свойств грунта и их стандартные девиации (*SD*), т. е. величины от-

клонений (разброса). Показатели свойств грунта приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Показатели физико-механических свойств грунта однородного откоса

Параметр	Среднее значение	SD	Наименьшее значение	Наибольшее значение
Сцепление, c , кПа	15	2	5	25
Угол внутреннего трения, φ , град	10	0,5	7,5	12,5
Удельный вес, γ , кН/м ³	18	0,1	17,5	18,5
Коэффициент Пуассона, μ	0,34	–	–	–
Модуль деформации, E , МПа	12	–	–	–
Угол наклона откоса, α , град	30	–	–	–

Расчеты выполнены на основное сочетание нагрузок четырьмя вышеназванными методами (*Ordinary*, *Bishop*, *Janbu* и *GLE* с учетом исследований [37]). Результаты представлены в сводной таблице 2.3, а также на рисунках 2.2–2.3. На следующем этапе исследуем влияние изменчивости свойств грунта на величину коэффициента устойчивости.

Таблица 2.3 – Результаты вероятностного расчета устойчивости однородного откоса

Метод расчета	Ordinary	Bishop	Janbu	GLE
Средняя величина коэффициента устойчивости	1,584	1,645	1,541	1,643
Наименьшая величина коэффициента устойчивости	0,916	0,983	0,895	0,981
Наибольшая величина коэффициента устойчивости	2,124	2,183	2,070	2,181
Индекс надежности	3,739	4,130	3,521	4,116
Вероятность обрушения, %	0,100	0,050	0,150	0,050

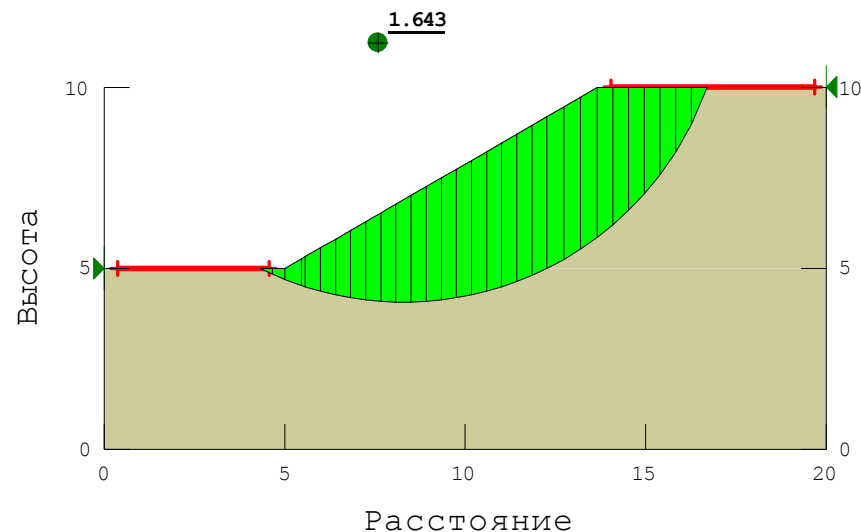


Рисунок 2.2 – Средняя величина коэффициента устойчивости K_y и потенциальная поверхность скольжения в толще однородного откоса (расчет по методу GLE)

Введем допущение о том, что K_y является функцией каждого из параметров грунта: сцепления c , угла внутреннего трения φ , удельного веса γ . В процессе вычисления коэффициента устойчивости задавалось среднее значение и коэффициент вариации K_{var} , а в отношении других переменных участвовала только средняя величина. Это необходимо для оценки неопределенности коэффициента устойчивости. Полученные результаты представлены на рисунках 2.4–2.6.

Полученные зависимости значений коэффициента устойчивости от изменчивости одного из трех исследуемых параметров свойств грунта (c , φ , γ) практически линейные. При этом результаты, полученные с использованием четырех расчетных методов, имеют удовлетворительную сходимость.

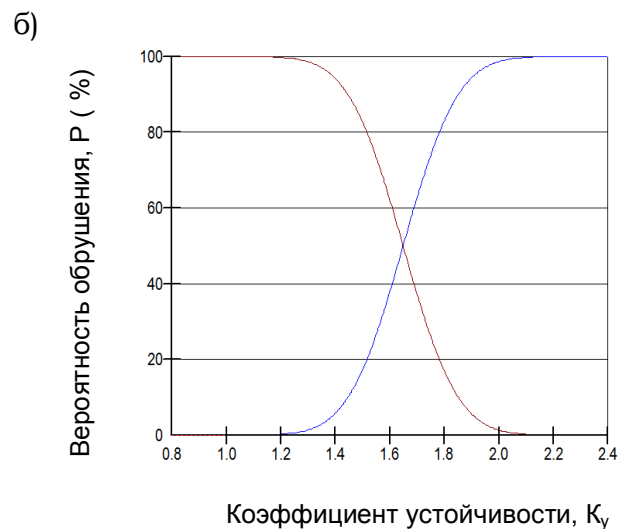


Рисунок 2.3 – Результаты вероятностного расчета устойчивости однородного откоса на основе метода GLE:

а) дифференциальная функция распределения величин коэффициента устойчивости K_y ; б) интегральная функция

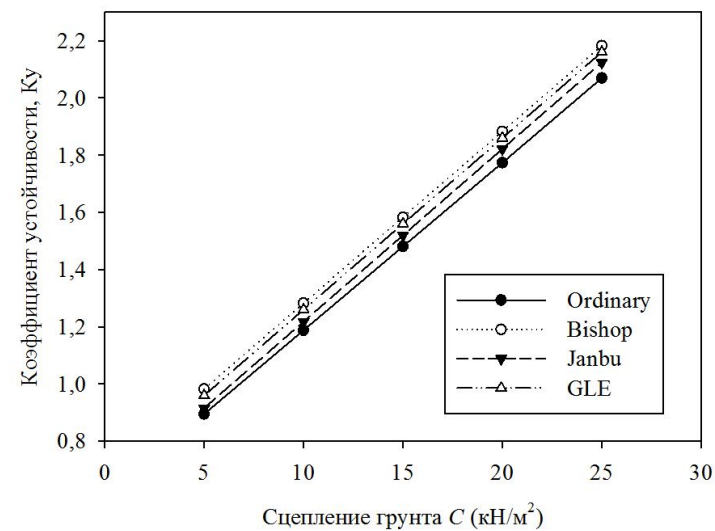


Рисунок 2.4 – Зависимость величины коэффициента устойчивости K_y однородного откоса от изменчивости значений сцепления с грунта при неизменных величинах угла внутреннего трения ϕ и удельного веса γ

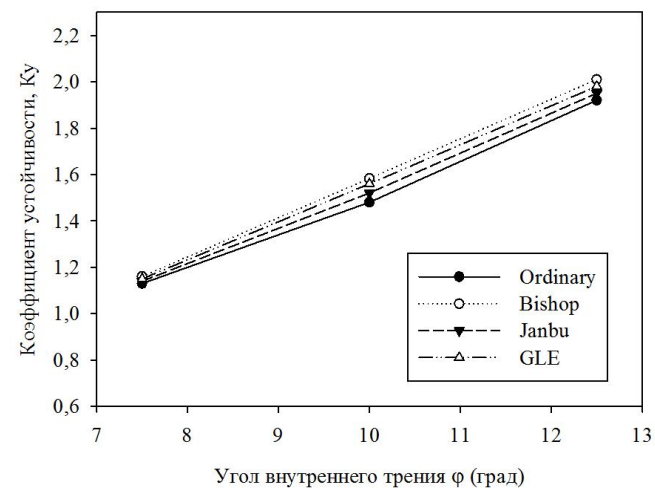


Рисунок 2.5 – Зависимость величины коэффициента устойчивости K_y однородного откоса от изменчивости значений угла внутреннего трения ϕ грунта при неизменных величинах сцепления c и удельного веса γ

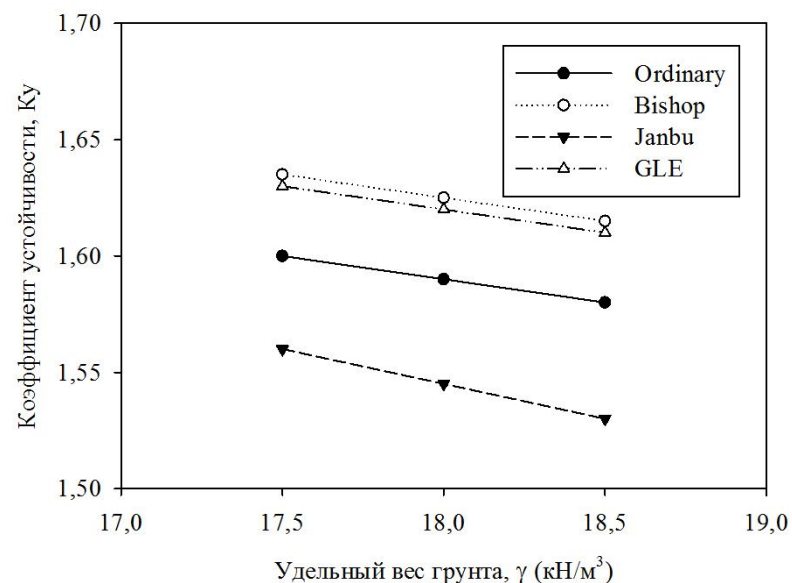


Рисунок 2.6 – Зависимость величины коэффициента устойчивости K_u однородного откоса от изменчивости значений удельного веса γ грунта при неизменных величинах сцепления c и угла внутреннего трения φ

В численном эксперименте, помимо коэффициента устойчивости, вычислялся индекс надежности. Для оценки неопределенности выполнена серия расчетов, в которых попеременно задавались изменяющиеся значения коэффициента вариации сцепления, угла внутреннего трения или удельного веса при фиксированных величинах коэффициента вариации других показателей свойств грунта. Анализ устойчивости выполнялся четырьмя вышеуказанными методами (*Ordinary*, *Bishop*, *Janbu* и *GLE*). Определимся со значениями коэффициента вариации.

Согласно ГОСТ 20522-96 [15], для показателей механических свойств грунта в пределах одного инженерно-геологического элемента (ИГЭ) допускаемый коэффициент вариации после статистической обработки не должен превышать 0,3 (т. е. 30 %). В соответствии с иссле-

дованиями *E. E. Alonso* [74], при коэффициентах вариации сцепления и угла внутреннего трения менее 0,1 (10 %), изменчивость показателей этих свойств не влияет на величину вероятности обрушения. Таким образом, примем допущение, что для значений сцепления и угла внутреннего трения грунта $K_{var} = 0,1 \square 0,3$.

Удельный вес, по сравнению с механическими показателями c и φ , имеет значительно меньшую количественную изменчивость. Так, согласно исследованиям, выполненным на Черноморском побережье Кавказа в Сочинском районе, выявлено, что область наиболее вероятных колебаний удельного веса делювиально-оползневых грунтов (согласно результатам 4210 испытаний) составляет $19,1 \pm 0,06$ кН/м³ [3]. Поэтому для тестовых примеров зададимся величиной K_{var} в пределах $0,01 \square 0,03$. Принятые для расчетов коэффициенты вариации K_{var} значений c , φ , γ приведены в таблице 2.4. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.7.

Таблица 2.4 – Расчетные коэффициенты вариации свойств грунта однородного откоса

Физико-механическое свойство грунта	Диапазон коэффициентов вариации K_{var}
Сцепление c	0,1 $\square$ 0,3
Угол внутреннего трения φ	0,1 $\square$ 0,3
Удельный вес γ	0,01 $\square$ 0,03

Также выполнено сопоставление величин индекса надежности (с учетом различных значений и сочетаний коэффициентов вариации параметров свойств грунта), полученных методами *Монте-Карло* и *FOSM* на основе четырех методов расчета устойчивости. Исследовалось влияние на индекс надежности величины коэффициента вариации показателей физико-механических свойств грунта.

Для этого, в первом примере задавались различные $K_{вар}$ сцепления при постоянных величинах $K_{вар}$ угла внутреннего трения и удельного веса.

Во втором примере различные коэффициенты вариации присваивались величине угла внутреннего трения при неизменных значениях коэффициентов вариации сцепления и удельного веса.

В третьем случае изменялась величина $K_{вар}$ удельного веса при постоянстве величин $K_{вар}$ сцепления и угла внутреннего трения. Результаты расчетов представлены на рисунках 2.8–2.13.

Анализируя полученные графики для однородного откоса, можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением коэффициента вариации параметров свойств грунта (c , ϕ , γ) величина индекса надежности уменьшается.

2. Зависимость индекса надежности от величин коэффициента вариации практически линейная.

3. Использование методов вероятностной оценки Монте-Карло и FOSM для вычисления показателя «индекс надежности» дает удовлетворительную сходимость результатов, полученных на основе методов расчетов устойчивости склонов и откосов Ordinary, Bishop, Janbu, GLE.

4. Применение методов расчета устойчивости откосов и склонов Ordinary и Bishop (не учитывающих межотсекковые силы взаимодействия), показывает идентичность полученных результатов при вычислении индекса надежности вероятностными методами Монте-Карло и FOSM.

5. Расчеты, выполненные на основе методов Janbu, GLE, имеют некоторое различие результатов, что связано с введением (Janbu) и уточнением (GLE) функций межотсеккового распределения сил в сочетании с большим объемом вычислений Монте-Карло по сравнению с FOSM.

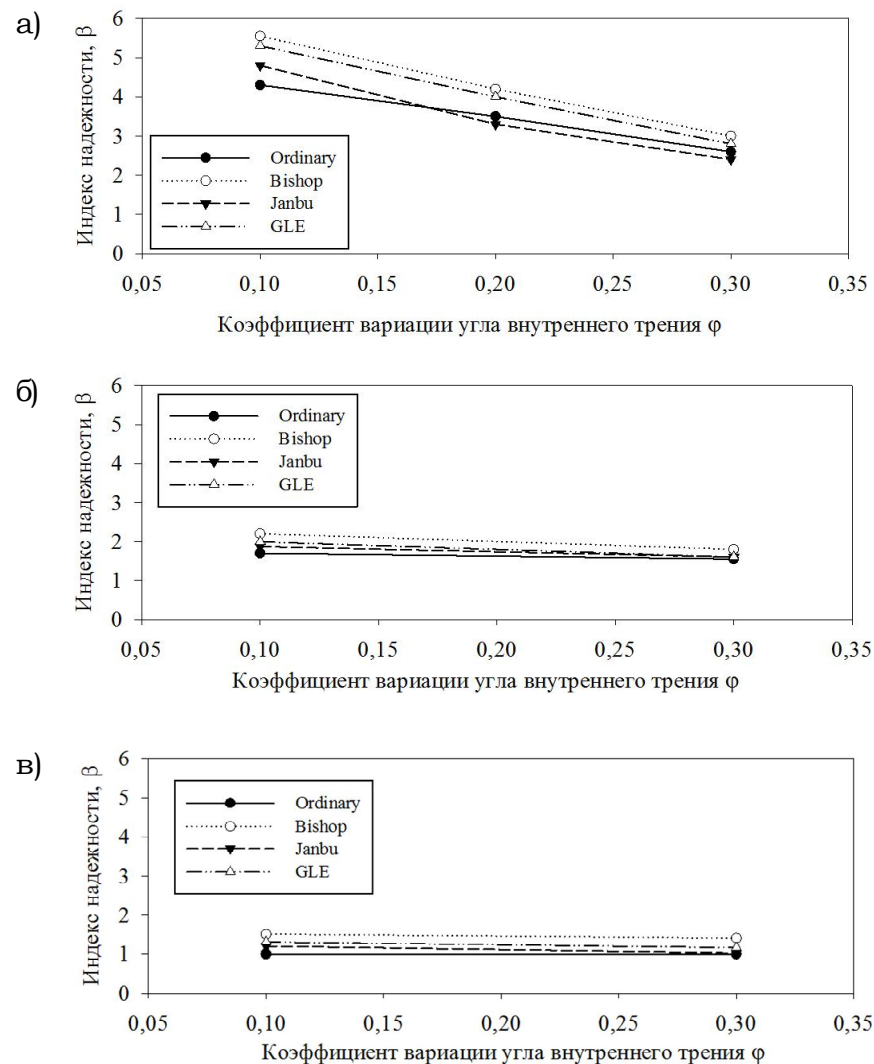


Рисунок 2.7 – Зависимость индекса надежности β однородного откоса от коэффициента вариации угла внутреннего трения φ при неизменных значениях коэффициента вариации сцепления c и удельного веса γ :

а) $K_{вар} \text{ сцепления} = 0,1$; $K_{вар} \text{ удельного веса} = 0,01$;

б) $K_{вар} \text{ сцепления} = 0,2$; $K_{вар} \text{ удельного веса} = 0,02$;

в) $K_{вар} \text{ сцепления} = 0,3$; $K_{вар} \text{ удельного веса} = 0,03$

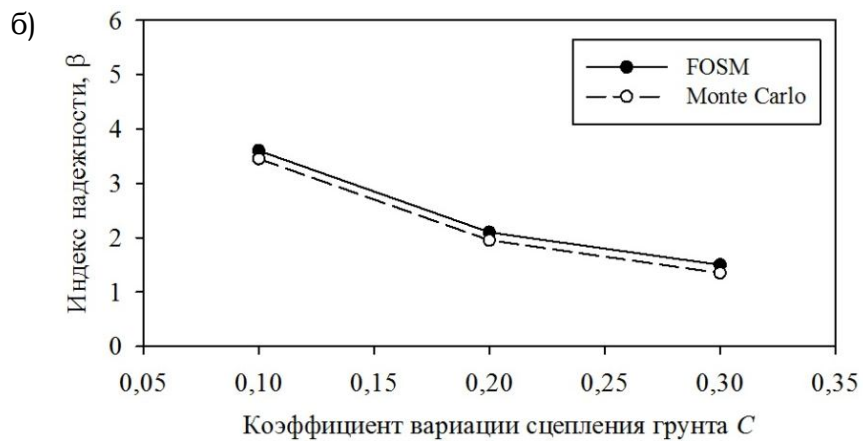
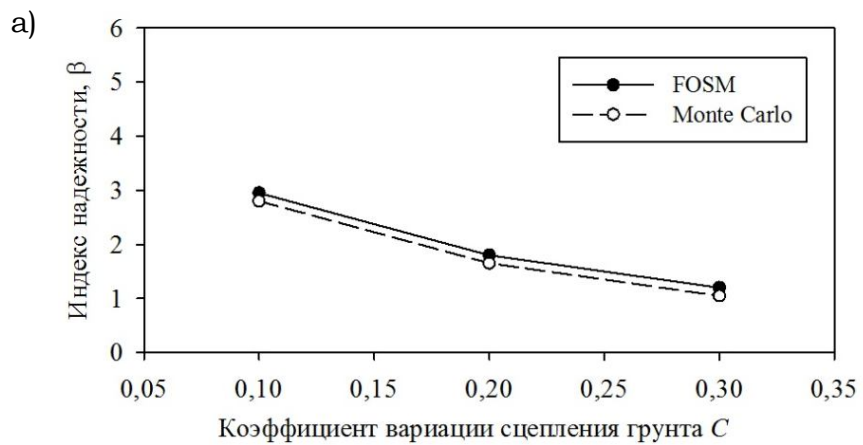


Рисунок 2.8 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами Монте-Карло и FOSM для однородного откоса, от коэффициента вариации сцепления c при $K_{\text{вар}}$ угла внутреннего трения $\varphi = 0,1$; $K_{\text{вар}}$ удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод Ordinary; б) метод Bishop

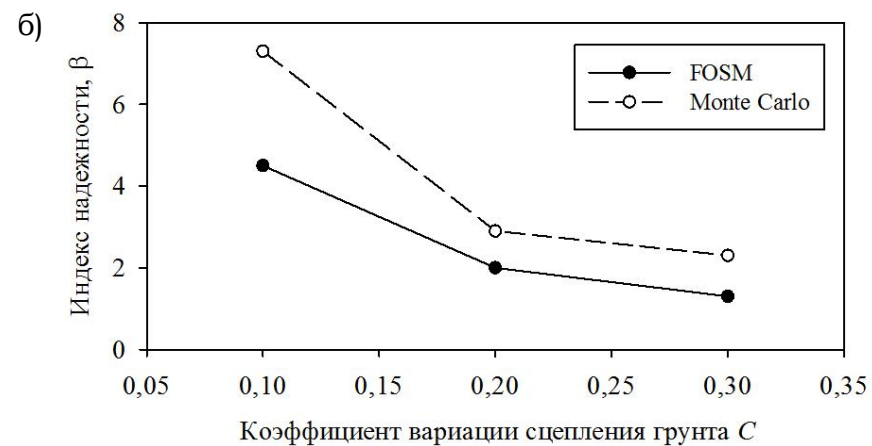
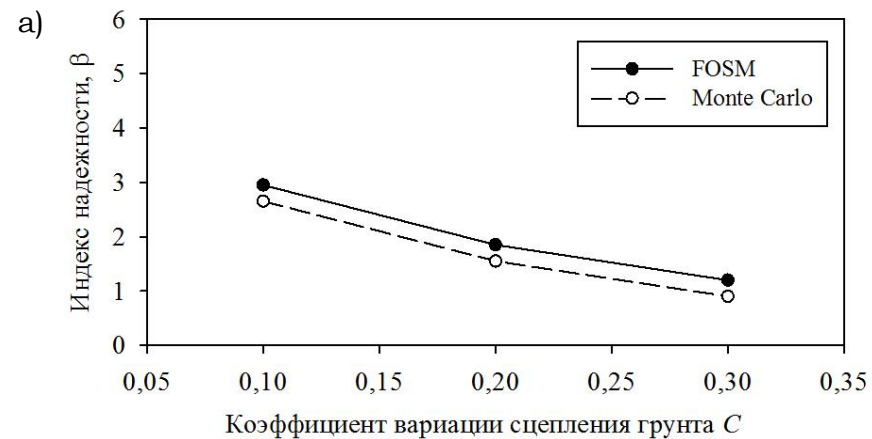


Рисунок 2.9 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами Монте-Карло и FOSM для однородного откоса, от коэффициента вариации сцепления c при $K_{\text{вар}}$ угла внутреннего трения $\varphi = 0,1$; $K_{\text{вар}}$ удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод Janbu; б) метод GLE

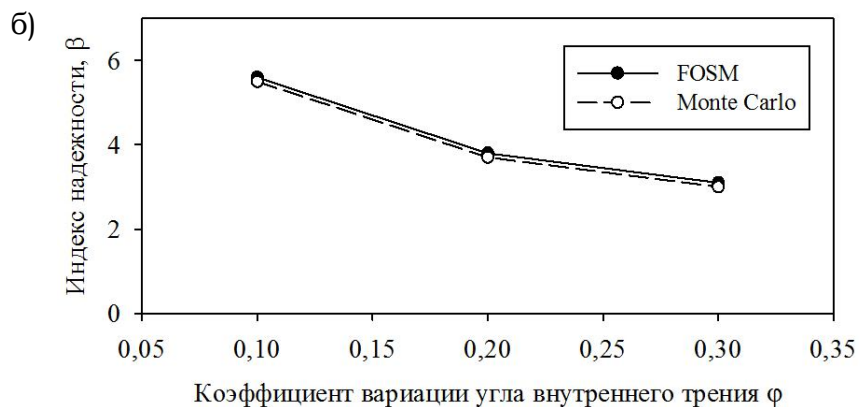
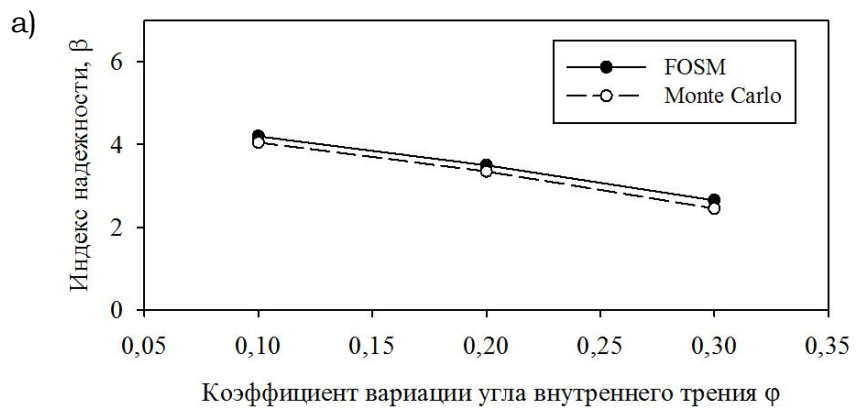


Рисунок 2.10 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для однородного откоса, от коэффициента вариации угла внутреннего трения ϕ при $K_{вар}$ сцепления $c = 0,1$; $K_{вар}$ удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод *Ordinary*; б) метод *Bishop*

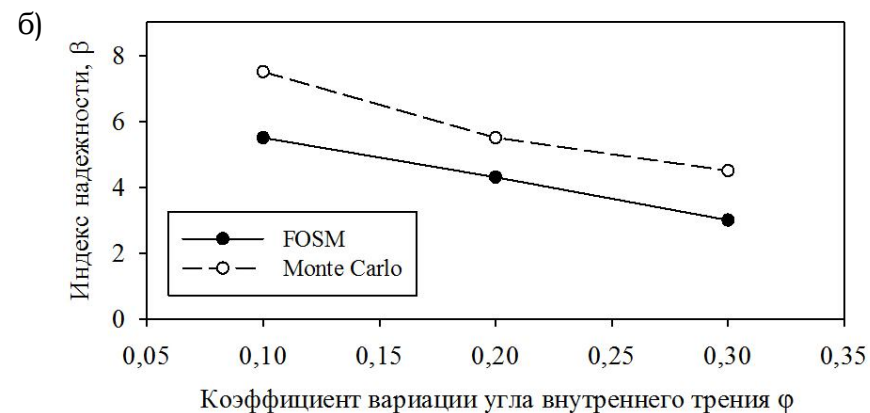
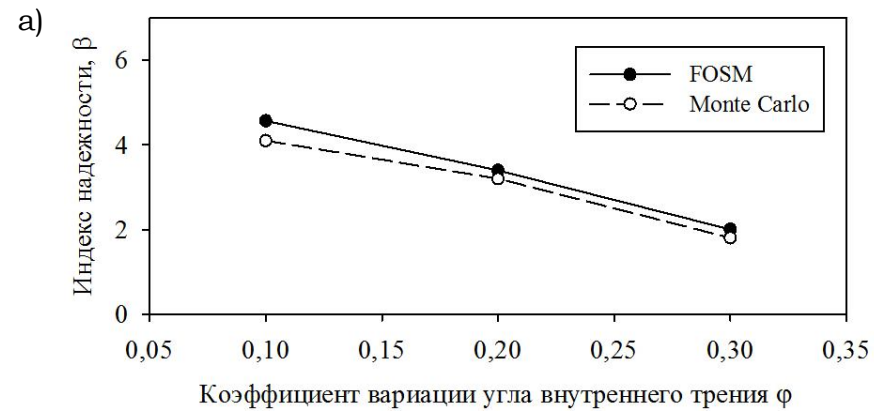


Рисунок 2.11 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для однородного откоса, от коэффициента вариации угла внутреннего трения ϕ при $K_{вар}$ сцепления $c = 0,1$; $K_{вар}$ удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод *Janbu*; б) метод *GLE*

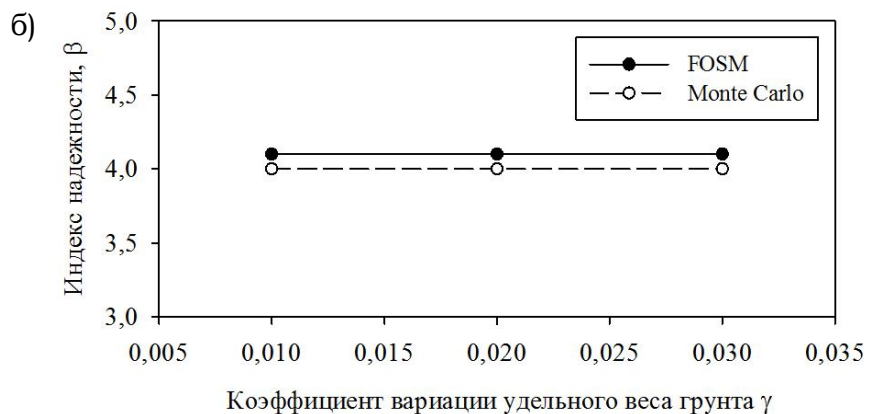
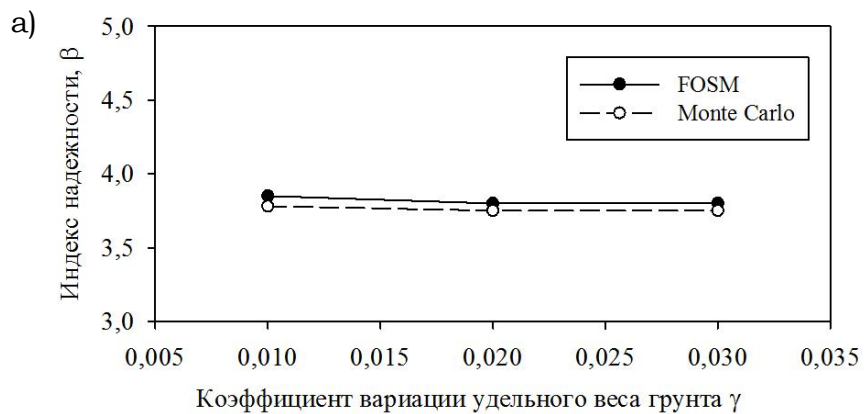


Рисунок 2.12 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для однородного откоса, от коэффициента вариации удельного веса γ при $K_{\text{сцепления}} = 0,1$; $K_{\text{вар}}$ угла внутреннего трения $\phi = 0,1$:

а) метод *Ordinary*; б) метод *Bishop*

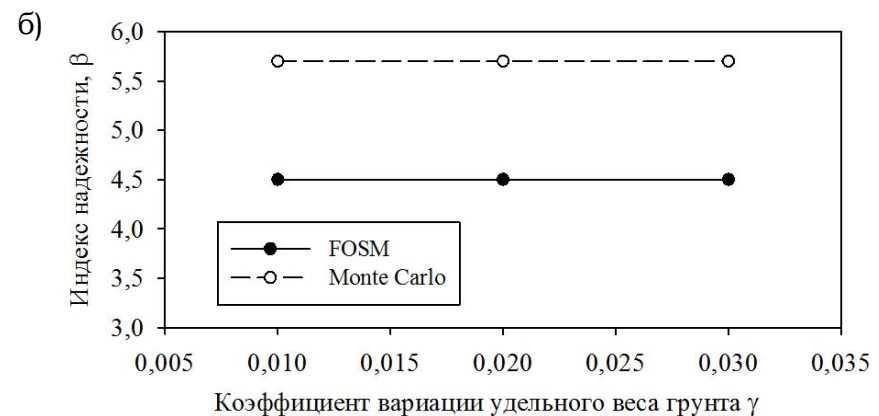
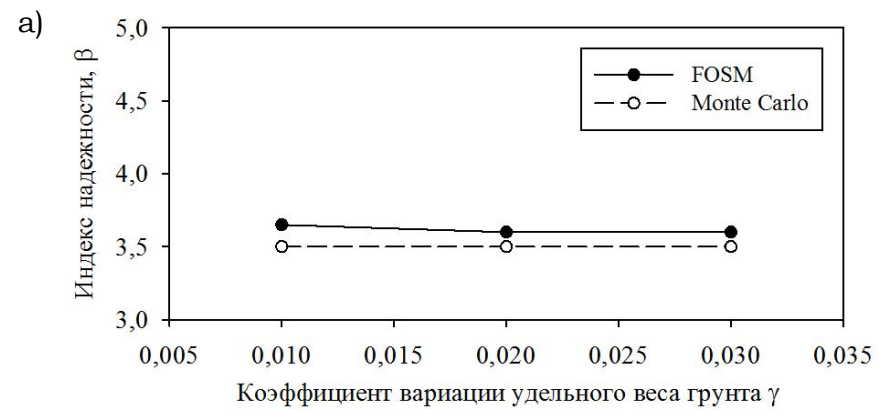


Рисунок 2.13 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для однородного откоса, от коэффициента вариации удельного веса γ при $K_{\text{сцепления}} = 0,1$; $K_{\text{вар}}$ угла внутреннего трения $\phi = 0,1$:

а) метод *Janbu*; б) метод *GLE*

2.3 Вероятностный анализ и оценка неопределенности в расчете устойчивости неоднородного откоса

Исследуемый откос представлен двумя слоями грунта, уклон дневной поверхности 30°. Как и в случае однородного откоса, первоначально выполнена вероятностная оценка оползневой события методом *Монте-Карло*. Расчеты устойчивости выполнены четырьмя вышеуказанными методами (*Ordinary*, *Bishop*, *Janbu* и *GLE* с учетом исследований [37]). Определены такие вероятностные параметры, как средняя, наименьшая, наибольшая величины коэффициента устойчивости откоса, вероятность обрушения грунтов, индекс надежности. Исходные данные (показатели физико-механических свойств грунтов) приведены в таблице 2.5. Результаты расчетов представлены в сводной таблице 2.6 и на рисунках 2.14–2.15.

На следующем этапе выполнено исследование влияния изменчивости свойств грунтов на величину коэффициента устойчивости неоднородного откоса. Рассмотрим коэффициент устойчивости как функцию каждого из параметров физико-механических свойств грунтов (сцепления c , угла внутреннего трения φ и удельного веса γ).

При вычислении частных производных коэффициента устойчивости будем учитывать изменчивость одного из параметров свойств грунтов, задавая для него среднее значение и коэффициент вариации, в то время как для других переменных в расчет примем только среднюю величину. Это необходимо для оценки неопределенности коэффициента устойчивости с использованием метода *FOSM*.

Зависимость коэффициента устойчивости от изменчивости параметров свойств грунта (при изменении одного показателя и неизменности двух других) аналогична случаю однородного откоса.

Таблица 2.5 – Показатели физико-механических свойств грунтов неоднородного откоса

Слой грунта	Параметр	Среднее значение	SD	Наименьшее значение	Наибольшее значение
Верхний	Сцепление, c , кПа	15	2	5	25
	Угол внутреннего трения, φ , град	10	0,5	7,5	12,5
	Удельный вес, γ , кН/м³	18	0,1	17,5	18,5
	Коэффициент Пуассона, μ	0,34	–	–	–
	Модуль деформации, E , МПа	12	–	–	–
Нижний	Сцепление, c , кПа	10	1	5	15
	Угол внутреннего трения, φ , град	5	0,5	2,5	7,5
	Удельный вес, γ , кН/м³	18	0,1	17,5	18,5
	Коэффициент Пуассона, μ	0,34	–	–	–
	Модуль деформации, E , МПа	10	–	–	–

Таблица 2.6 – Результаты вероятностного расчета устойчивости двухслойного откоса

Метод расчета	Ordinary	Bishop	Janbu	GLE
Средняя величина коэффициента устойчивости	1,157	1,195	1,161	1,131
Наименьшая величина коэффициента устойчивости	0,884	0,941	0,855	0,860
Наибольшая величина коэффициента устойчивости	1,413	1,457	1,436	1,407
Индекс надежности	2,054	2,568	2,211	2,089
Вероятность обрушения, %	2,0	0,75	1,72	1,95

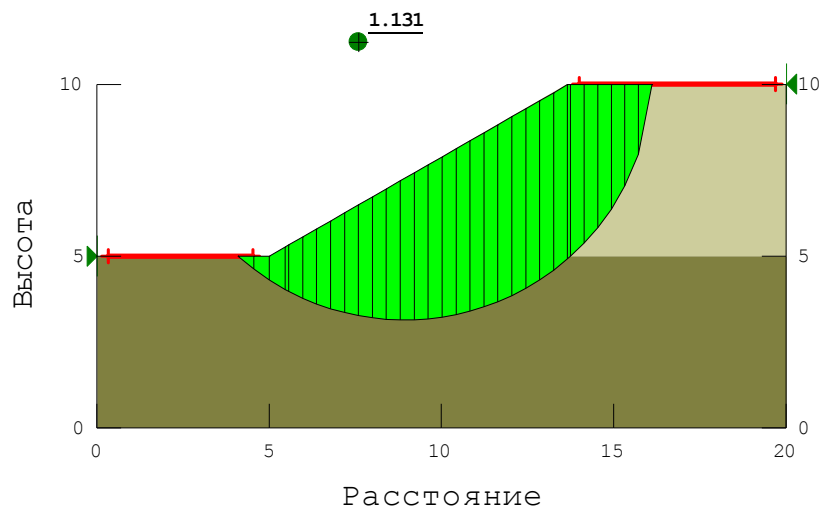


Рисунок 2.14 – Средняя величина коэффициента устойчивости K_u и потенциальная поверхность скольжения в толще двухслойного откоса (расчет по методу *GLE*)

Далее (как и для случая однородного откоса) выполнены вычисления индекса надежности моделированием Монте – Карло и *FOSM* на основе методов расчета устойчивости *Ordinary*, *Bishop*, *Janbu* и *GLE*.

Для оценки неопределенности произведена серия расчетов, в которых поочередно задавались изменяющиеся значения коэффициента вариации сцепления, угла внутреннего трения или удельного веса при постоянных величинах коэффициента вариации двух других показателей свойств грунтов.

Для этого, на первом этапе задавались различные коэффициенты вариации сцепления при постоянных величинах коэффициентов вариации угла внутреннего трения и удельного веса. Далее различные значения коэффициента вариации присваивались углу внутреннего трения при неизменных значениях K_{var} сцепления и удельного веса. Затем изменялась величина коэффициента вариации удельного веса при постоянстве величин K_{var} сцепления и угла внутреннего трения.

а)



б)

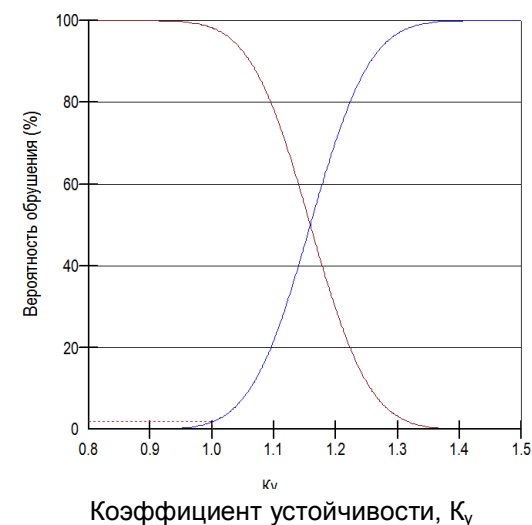


Рисунок 2.15 – Результаты вероятностного расчета устойчивости двухслойного откоса на основе метода *GLE*:

а) дифференциальная функция распределения величин коэффициента устойчивости K_u ;
б) интегральная функция

Диапазон величин коэффициента вариации выбирался в соответствии с положениями параграфа 2.2. В случае неоднородного откоса для обоих слоев коэффициенты вариации K_{var} значений c , ϕ , γ приняты аналогичными, т. е. K_{var} сцепления и верхнего, и нижнего слоев откоса меняется в пределах $0,1 \leq 0,3$; K_{var} угла внутреннего трения – от 0,1 до 0,3; K_{var} удельного веса – $0,01 \leq 0,03$ (таблица 2.4). Результаты расчетов представлены на рисунках 2.16–2.21.

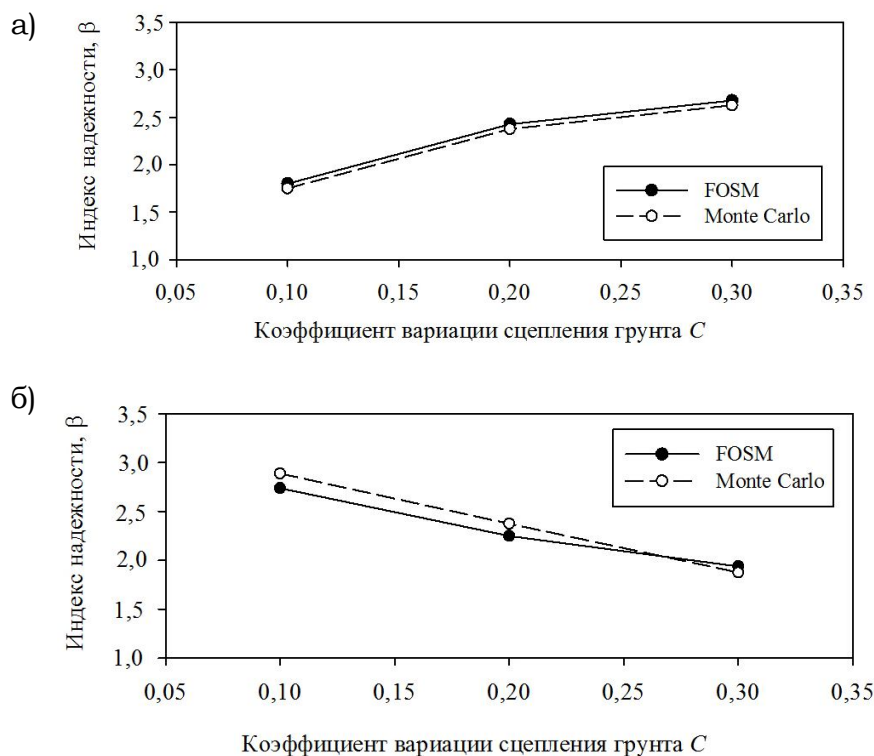


Рисунок 2.16 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами Монте-Карло и FOSM для неоднородного откоса, от коэффициента вариации сцепления с при K_{var} угла внутреннего трения $\phi = 0,1$; K_{var} удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод Ordinary; б) метод Bishop

Анализ и сопоставление полученных результатов для примера с двухслойным откосом показали:

При вероятностном моделировании Монте-Карло и FOSM результаты вычисления индекса надежности имеют удовлетворительную сходимость при использовании расчетных методов Ordinary, Bishop и Janbu.

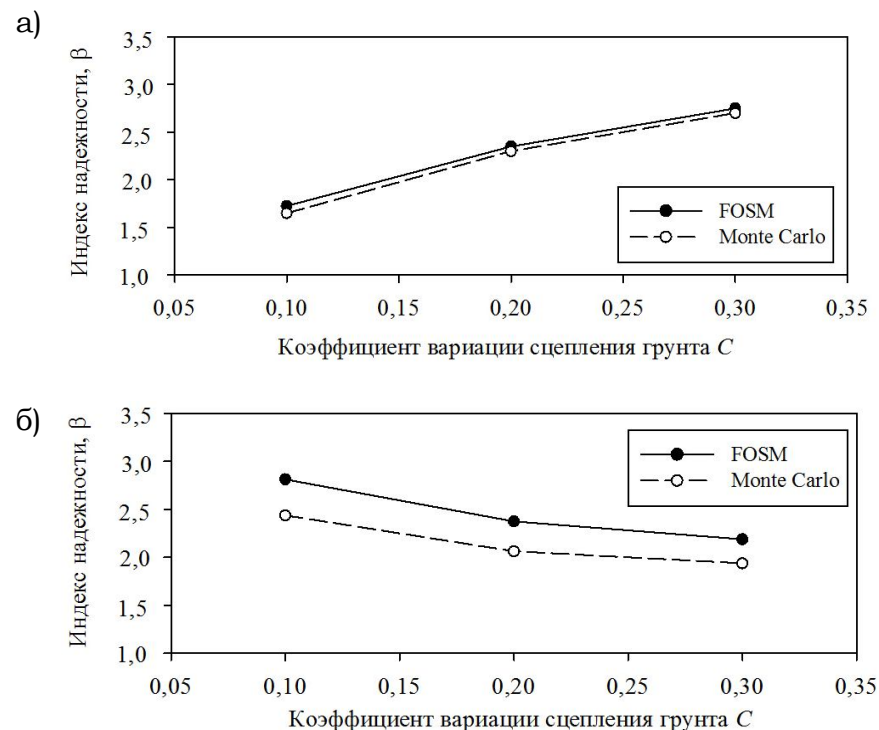


Рисунок 2.17 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами Монте-Карло и FOSM для неоднородного откоса, от коэффициента вариации сцепления с при K_{var} угла внутреннего трения $\phi = 0,1$; K_{var} удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод Janbu; б) метод GLE

Различие в результатах вероятностного моделирования методом GLE объясняется его большей точностью, по сравнению с Ordinary, Bishop и Janbu, а также боль-

шим количеством сочетаний факторов, которые учитывает *Монте-Карло*, и объемом вычислений по сравнению с упрощением *FOSM*, требующем линеаризации при вычислении коэффициента устойчивости откоса.

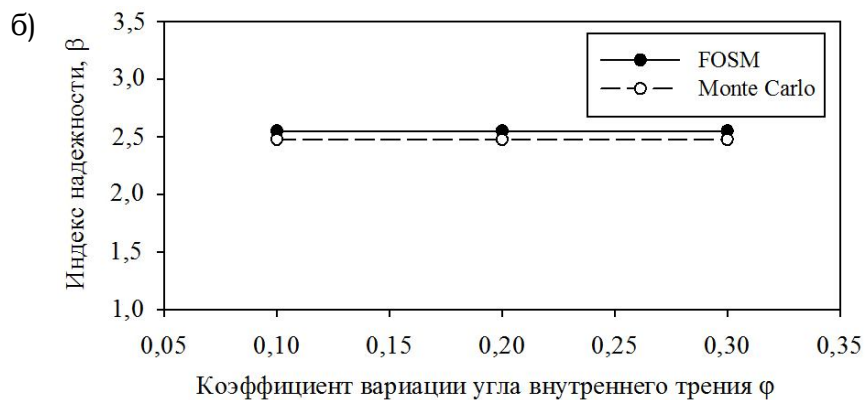
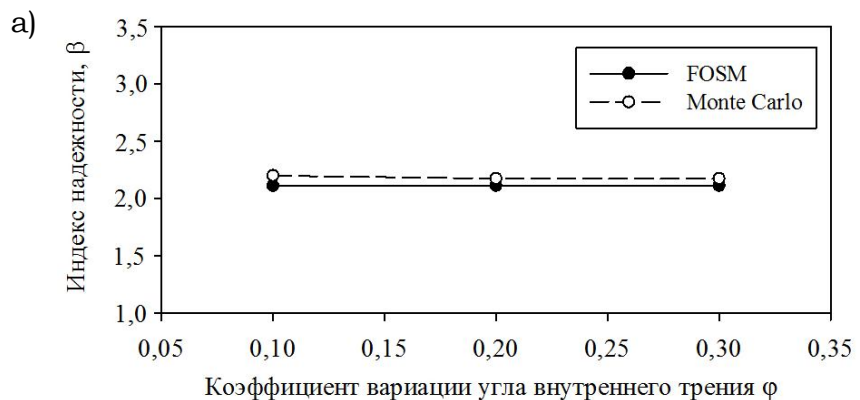


Рисунок 2.18 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для неоднородного откоса, от коэффициента вариации угла внутреннего трения ϕ при $K_{вар}$ сцепления $c = 0,1$; $K_{вар}$ удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод *Ordinary*; б) метод *Bishop*

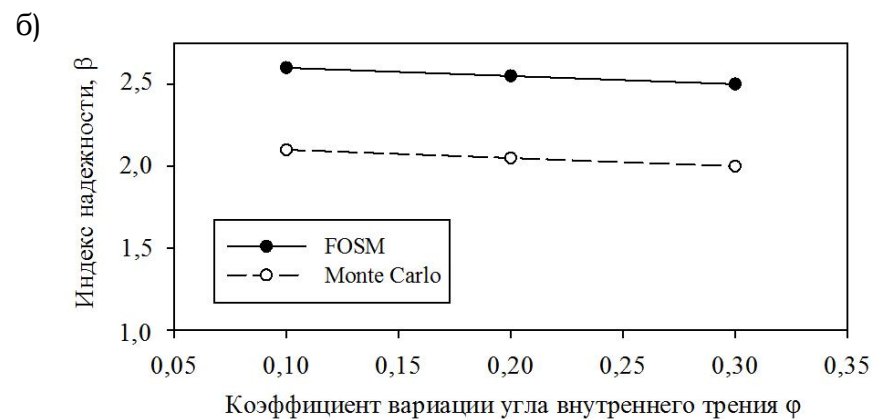
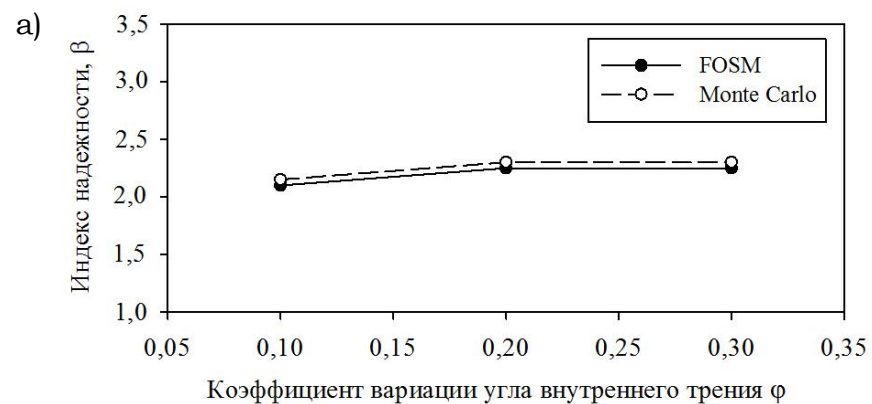


Рисунок 2.19 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для неоднородного откоса, от коэффициента вариации угла внутреннего трения ϕ при $K_{вар}$ сцепления $c = 0,1$; $K_{вар}$ удельного веса $\gamma = 0,01$:

а) метод *Janbu*; б) метод *GLE*

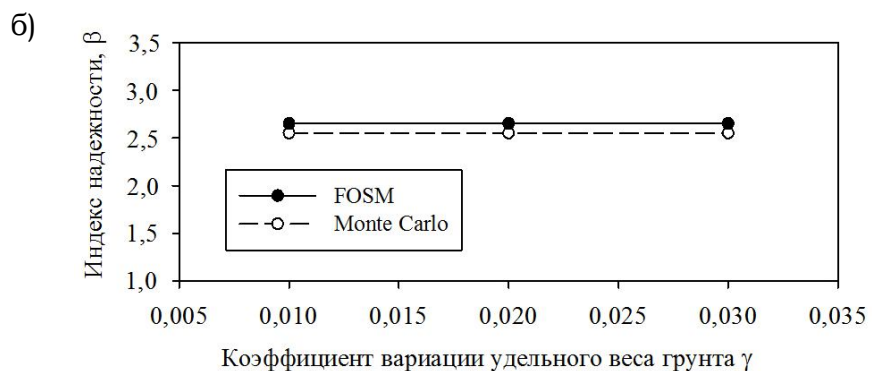
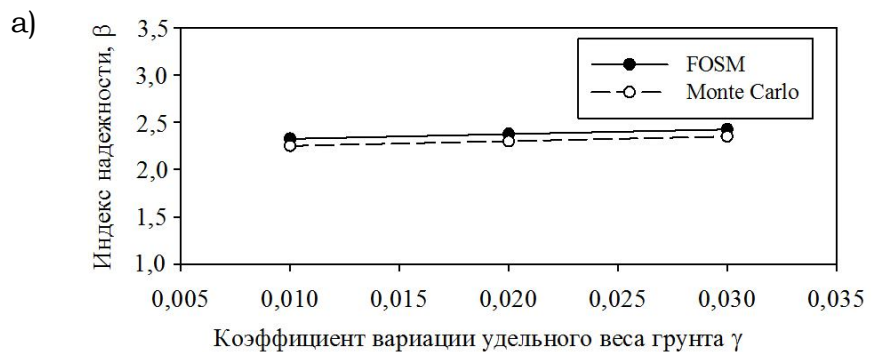


Рисунок 2.20 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для неоднородного откоса, от коэффициента вариации удельного веса γ при $K_{вар}$ сцепления $c = 0,1$; $K_{вар}$ угла внутреннего трения $\phi = 0,1$:

а) метод *Ordinary*; б) метод *Bishop*

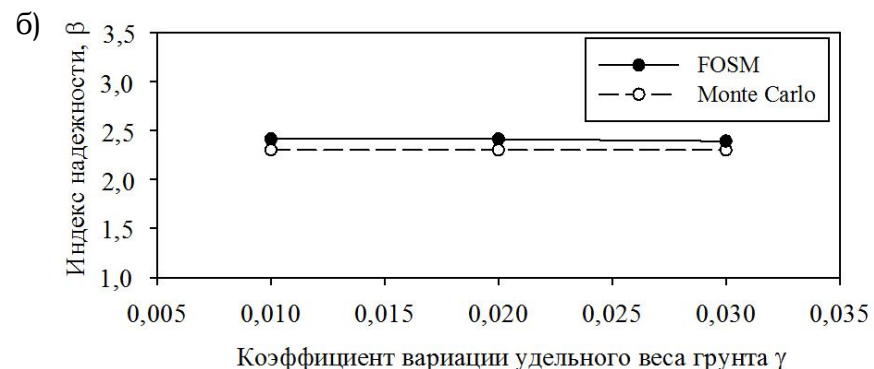
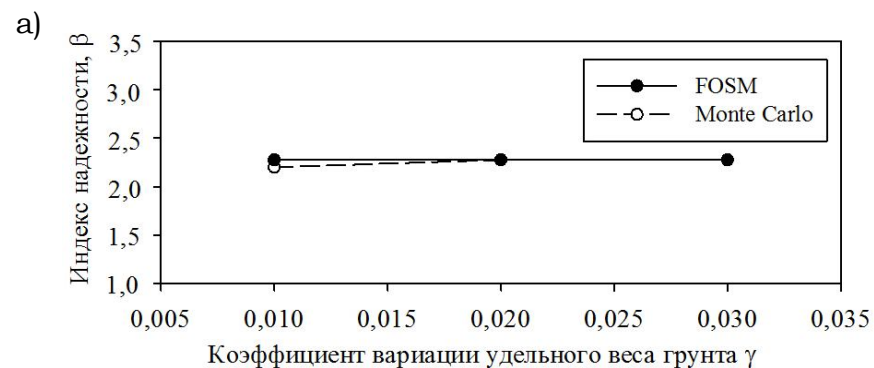


Рисунок 2.21 – Зависимость величины индекса надежности β , полученного вероятностными методами *Монте-Карло* и *FOSM* для неоднородного откоса, от коэффициента вариации удельного веса γ при $K_{вар}$ сцепления $c = 0,1$; $K_{вар}$ угла внутреннего трения $\phi = 0,1$:

а) метод *Janbu*; б) метод *GLE*

2.4 Обоснование применения вероятностных расчетов в практике строительства

Выполним анализ фактической ситуации, сложившейся на одном из участков автомобильной дороги ст-ца Удобная – х. Зеленчук Мостовой в Краснодарском крае. Объект исследования располагается на км 6+430÷6+550. Под влиянием оползневых процессов произошло обрушение откоса, укрепленного монолитным железобетоном (рисунок 2.22), обочины и левой половины проезжей части дороги (рисунок 2.23). Оползень развился в нижней части склона, в толще низового откоса. В месте отрыва грунта хорошо прослеживаются бровка и стенка срыва, проходящие по краям разрушенного асфальтобетонного покрытия.

По данным инженерно-геологических изысканий, на исследуемой территории наблюдаются оползни сдвига с глубиной захвата пород до 4,5 м, а также мелкие очаги мощностью 1–2,5 м, отмеченные в долине ручьев. Выявлены эрозионные процессы. Оползень, сформировавшийся на низовом откосе автомобильной дороги, находится в стадии активного развития, благодаря периодическому замачиванию склона в периоды обильных атмосферных осадков, ливневый сток которых локализуется по обочине дороги.

Из-за отсутствия регламентных работ по очистке бетонных лотков, произошло заиливание водопропускных сооружений и, как следствие, замачивание дорожного полотна в основании с западной стороны склона. В результате в течение длительного времени происходило интенсивное водонасыщение грунтов основания дороги и склона атмосферными осадками и подземными водами. Процесс деформации дороги продолжался и на момент изысканий.



Рисунок 2.22 – Обрушение укрепленного откоса автомобильной дороги ст-ца Удобная – х. Зеленчук Мостовой, км 6+430–6+550



Рисунок 2.23 – Обрушение проезжей части автомобильной дороги ст-ца Удобная – х. Зеленчук Мостовой, км 6+430–6+550

В разрезе строительной площадки выделено шесть инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

- ИГЭ 1в (tQ_{IV}) – насыпной грунт уплотненный;
- ИГЭ-2 (dpQ_{IV}) – глина зеленовато-серая, твердая, легкая пылеватая, с включением мучнистых карбонатов до 10-15 %;
- ИГЭ-3 (dpQ_{IV}) – глина зеленовато-серая, полутвердая, легкая пылеватая, с включением карбонатов до 15 %;
- ИГЭ-4 (adQ_{IV}) – глина зеленовато-серая, твердая, легкая пылеватая, с включением гальки и гравия до 10-15 %;
- ИГЭ-5 ($K2st+cp$) – переслаивание мергелей средней прочности, неразмягчаемых, выветрелых и известняков плотных, средней прочности, неразмягчаемых, выветрелых, трещиноватых.

Физико-механические показатели приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Показатели физико-механических свойств грунтов откоса автомобильной дороги

ИГЭ	Параметр	Среднее значение	SD
1в	Сцепление, с, кПа	8,0	1,2
	Угол внутреннего трения, ϕ , град	12	1,8
	Удельный вес, γ , кН/м ³	27,3	0,38
2	Сцепление, с, кПа	9,0	1,6
	Угол внутреннего трения, ϕ , град	12	2,0
	Удельный вес, γ , кН/м ³	17,3	0,26
3	Сцепление, с, кПа	11	2,0
	Угол внутреннего трения, ϕ , град	10,0	1,7
	Удельный вес, γ , кН/м ³	17,6	0,52
4	Сцепление, с, кПа	17,0	–
	Угол внутреннего трения, ϕ , град	11,0	–
	Удельный вес, γ , кН/м ³	18,0	–

По результатам детерминированного расчета склон на участке имеет коэффициент устойчивости больший нормированного СНиП 22-02-2003. Однако вероятностный анализ показал, что на основное сочетание нагрузок вероятность обрушения составляет 10,5 %, а на особое достигает 29,0 % (рисунки 2.24÷2.28, таблица 2.8). Таким образом, вероятностное моделирование более точно оценивает состояние склонов и откосов.

Таблица 2.8 – Результаты вероятностного расчета устойчивости откоса на основное и особое сочетания нагрузок

Сочетание нагрузок	Основное	Особое
Средняя величина коэффициента устойчивости	1,027	1,036
Наименьшая величина коэффициента устойчивости	0,943	0,805
Наибольшая величина коэффициента устойчивости	1,099	1,202
Индекс надежности	1,234	0,573
Вероятность обрушения, %	10,450	29,000

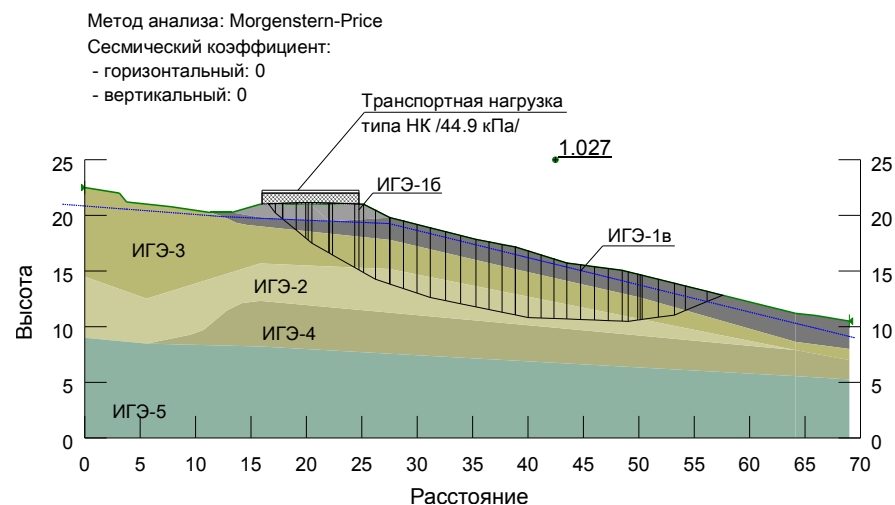


Рисунок 2.24 – Расчет устойчивости откоса автомобильной дороги на основное сочетание нагрузок

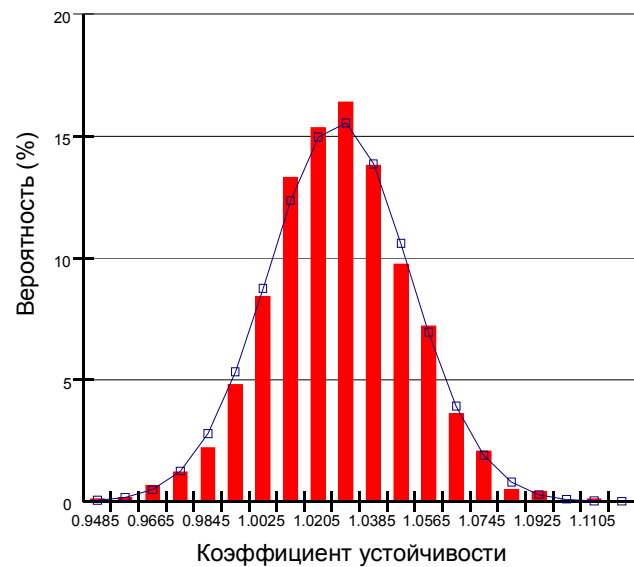


Рисунок 2.25 – Дифференциальная функция распределения величин коэффициента устойчивости на основное сочетание нагрузок

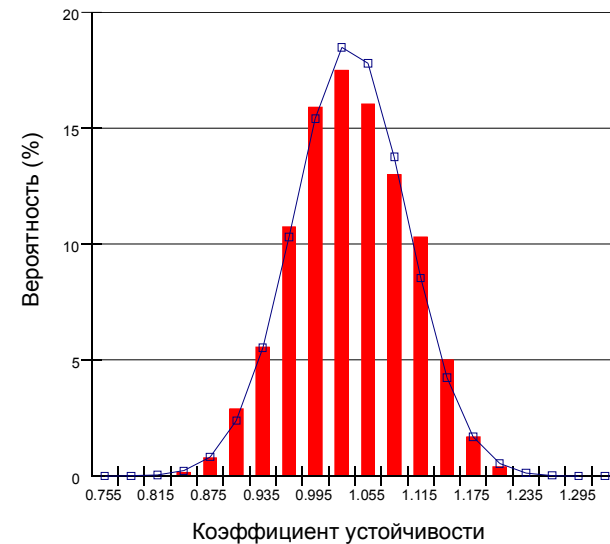


Рисунок 2.27 – Дифференциальная функция распределения величин коэффициента устойчивости на особое сочетание нагрузок

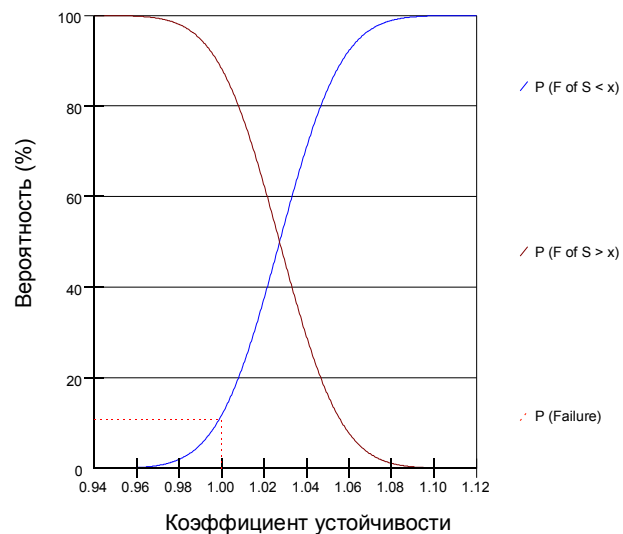


Рисунок 2.26 – Интегральная функция распределения величин коэффициента устойчивости на основное сочетание нагрузок

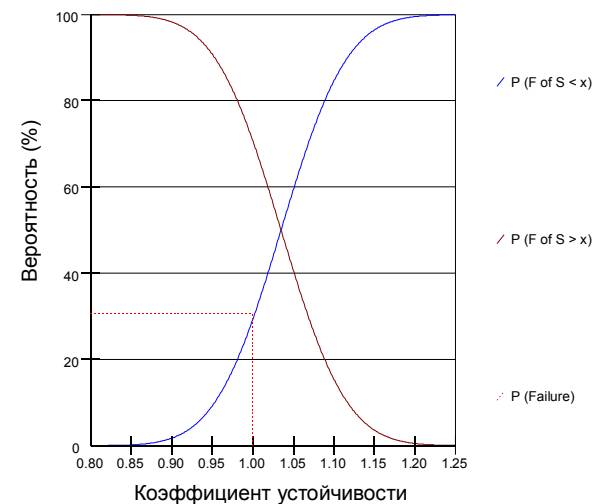


Рисунок 2.28 – Интегральная функция распределения величин коэффициента устойчивости на особое сочетание нагрузок

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА НА ТЕРРИТОРИЯХ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

3.1 Зонирование территории по системе балльных характеристик

Метод зонирования территорий [96] по системе балльных характеристик позволяет провести качественный анализ уровня риска, установить приоритетность при проектировании сооружений или при обосновании укрепительных мероприятий. Конечный результат этого анализа заключается в определении интегрального показателя риска, который подсчитывается с использованием личного опыта специалиста и накопленных знаний.

К недостаткам метода отнесем грубую характеристику основных факторов и отсутствие взвешивающих коэффициентов, недоучет сложности процессов взаимодействия сооружений с геологической средой, упрощения при комплексном учете различных факторов безопасности. Подход не позволяет объективно оценить все инженерно-геологические факторы.

Предметом исследования на стадии разработки ТЭО-проекта был выбран объект строительства сооружений инженерной защиты подъездной автомобильной дороги к резервуарному парку в районе поселка Волна Краснодарского края. Площадка строительства расположена в юго-восточной части Темрюкского района, между ст. Тамань и пос. Волна.

Защищаемые объекты являются компонентами комплекса сооружений, предназначенного для экспорта

сжиженного аммиака, углеводородов, зерна и других товаров через Черное море. Предусмотрены: емкости для хранения зерна (элеваторы); сооружения по перегрузке зерна; подъездная автомобильная дорога; две железнодорожные ветки; сооружения по разгрузке железнодорожных вагонов; вспомогательные объекты.

Исследуемый участок расположен на территории бывшей балки Куца. Рельеф местности спокойный с постепенным понижением отметок с севера на юг. Естественный ландшафт полностью изменен: на площадке выполнен большой объем земляных работ и планировка территории. Естественная гидрографическая сеть отсутствует. С севера площадка ограничена оврагом, образовавшимся в результате строительных работ.

Особенностью грунтов на рассматриваемой площадке является высокая скорость выветривания. Глубина зоны аэрации зависит многих факторов и колеблется от 2 до 4 м (в зависимости от характера переслаивания, трещин и т. д.). Эта особенность оказывает решающее влияние на образование оползней и эрозию. Оползневой процесс активно развивается и захватывает новые участки с высокой скоростью (рисунок 3.1). Глубина смещающихся грунтов, как правило, небольшая и приурочена к зоне выветривания. Эрозионные процессы повсеместно отмечаются на вновь созданных техногенных откосах, не покрытых (или слабо покрытых) луговой растительностью.

Для определения оптимальной зоны инженерной защиты на стадии ТЭО-проект использована методика качественной и полуколичественной оценки оползневого риска [79] с применением зонирования территорий по системе балльных характеристик. Исследуемая территория была условно разделена на участки (рисунок

3.2), для которых определялись: уровень опасности, вероятность обрушения, возможные негативные последствия и уязвимость. Показатель риска R_N для каждого участка вычислялся перемножением вышеуказанных факторов (таблица 3.1), по формуле:

$$R_N = H \cdot P \cdot R \cdot V, \quad (3.1)$$

где H – опасность, P – вероятность обрушения, R – показатель возможных негативных последствий, V – уязвимость.



Рисунок 3.1 – Оползневые процессы на откосе подъездной автомобильной дороги к зерноперегрузочному комплексу в балке Куцая (январь 2004 г.)

На основании сравнения показателей риска участки подразделялись на классы [96]. Выявлено (таблица 3.1), что 2 участка относятся к третьему классу риска, 2 – к четвертому и 1 – к самому высокому классу, то есть пятому. Методика позволила выявить наиболее опасные участки (класс риска 4 и 5), требующие усиления [44]. В результате проведенных исследований определен комплекс мероприятий инженерной защиты подъездной автомобильной дороги и склона от оползневых процессов.

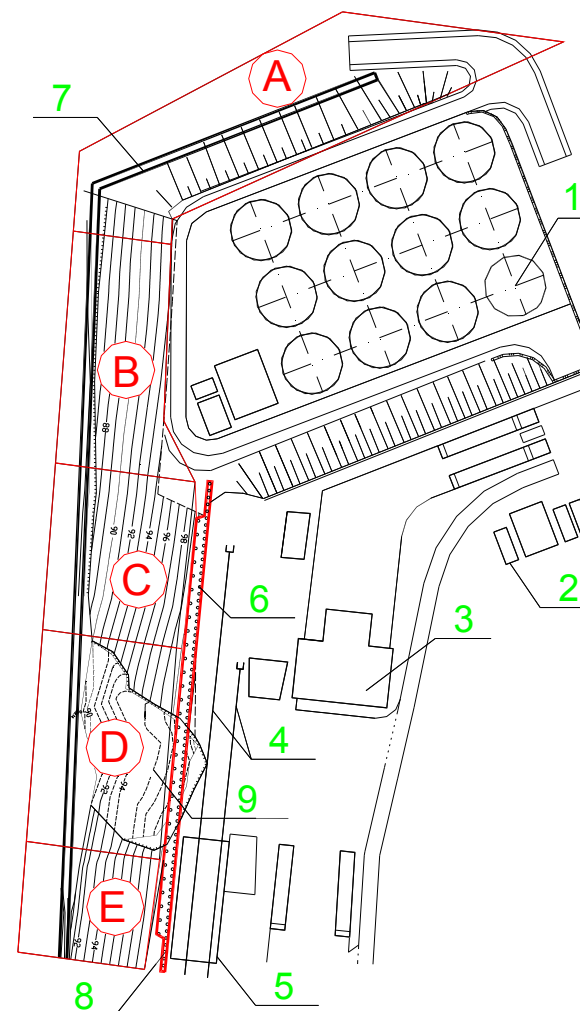


Рисунок 3.2 – Участки (А, В, С, D, Е) для оценки оползневой риска подъездной дороги к зерноперегрузочному комплексу:

- 1 – зерноперегрузочный комплекс, 2 – технические помещения,
- 3 – площадка для складирования грузов, 4 – ветки железной дороги,
- 5 – площадка для ж/д вагонов, 6 – полутора рядное свайное сооружение,
- 7 – подпорная стена габионного типа, 8 – однорядное свайное сооружение,
- 9 – оползень

Таблица 3.1 – Оценка оползневого риска методом зонирования территории

Участки	H , опасность	P , вероятность обрушения	R , потери	V , уязвимость	R_N , риск,	Класс риска
A	3	3	2	2	36	3
B	3	3	3	3	81	4
C	3	3	4	3	108	4
D	3	3	4	4	144	5
E	2	3	3	3	54	3

3.2 Оценка показателей риска с применением табличных форм

Оценка риска с применением табличных форм наиболее эффективна при исследовании большого количества оползневых склонов с целью выявления наиболее опасных участков. Методика заключается в том, что, прежде всего, определяется относительная средняя вероятность обрушения откоса в пределах всей территории исследуемого оползнеопасного региона. Затем, используя систему корректирующих коэффициентов, вычисляется вероятность обрушения искомого откоса P_e по формуле:

$$P_e = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5, \quad (3.2)$$

где F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 – независимые поправочные коэффициенты.

Подход позволяет прогнозировать поведение откосов и склонов путем оценки количественных показателей вероятности обрушения и оползневой опасности, требует выполнения минимальных инженерно-геологических изысканий. Основным недостатком является субъективность принятия ряда коэффициентов, оказывающих влияние на результат.

В рамках проекта «Сахалин-2» требовалось оценить относительную степень опасности и риска около пяти-

десяти оползнеопасных склонов на участках проектирования и строительства вдольтрассовых дорог магистральных трубопроводов. Проектом предусмотрена подземная прокладка магистральных нефте- и газопроводов. В строительный период активизация оползневых процессов оказалась выше, чем предполагалось, исходя из анализа похожих инженерно-геологических условий, в которых осуществлялось строительство трубопроводной системы Сахалин-1 [12].

Отметим, что на Сахалине, а также Курильских островах, помимо оползневой, существует также лавинная и селевая опасности, которым подвергаются ~7500 человек и ~800 объектов различного назначения в 26 основных населенных пунктах. При этом автомобильным и железным дорогам угрожают более 1000 лавиносборов и селевых массивов. Возможный суммарный ущерб оценивается более 150 млн руб. [40, 60, 61].

В районе города Макаров трассы проходят по пересеченной местности (рисунки 3.3, 3.4), на склонах северо-западной экспозиции развиты оползни течения мощностью до 5 м.

Отмечены проявления солифлюкции. На одном из склонов северо-восточной экспозиции выделен древнеоползневой цирк, пораженный густой активной овражно-балочной сетью. Геолого-литологический разрез территории характеризуется делювиальными, делювиально-пролювиальными и элювиальными образованиями, развитыми на осадочных породах верхнего мела быковской свиты. В глинистых грунтах содержатся включения дресвы и щебня осадочных пород от 10 до 25 %. На отдельных участках делювий представлен супесью твердой и пластичной, мощностью 0,8–1,0 м или щебенистыми грунтами с суглинистым заполнителем до 35–40 %. Оползневые отложения представлены аллювиаль-

ными, делювиальными и элювиальными глинистыми грунтами и крупнообломочными грунтами с глинистым заполнителем.



Рисунок 3.3 – Участок строительства газопровода «Сахалин–2»

По условиям залегания на участке выделены следующие типы подземных вод: верховодка, порово-пластовые воды аллювиальных, аллювиально-морских и аллювиально-пролювиальных отложений, пластово-поровые воды и трещинные воды неогеновых отложений. В пределах полосы землеотвода отмечено высачивание грунтовых вод. На склонах водораздельных хребтов развиты линейная эрозию и плоскостной смыв.

Участок № 106 (рисунок 3.5), представляет собой блоковый оползень мощностью до 9 м, длиной порядка 180 м, шириной около 40 м. Активизация склоновых

процессов вызвана обводненностью грунтов и подмывом языка оползня. Трасса подъездной дороги трубопровода проходит по водоразделу в голове оползня.



Рисунок 3.4 – Ситуационный план прохождения трассы трубопровода



Рисунок 3.5 – Оползнеопасный участок № 106

Надежность и эффективность противооползневых мероприятий непосредственно зависит от достоверности прогноза местной устойчивости откосов и оползневой опасности. На поведение оползнеопасного склона в значительной степени влияет освоение человеком земель, водный баланс, изменчивость природы, а также другие факторы.

Оценим оползневую опасность на участке № 106 с использованием методики табличных форм. Пределы возможных значений поправочных коэффициентов (формула 3.2) для исследуемого участка приведены в таблице 3.2. Значения коэффициентов получены эмпирически путем обследования большого числа оползнеопасных склонов, позволяя учесть их инженерно-геологические и гидрогеологические условия. Приняты во внимание сведения об исторической активизации склона, техногенный фактор и другие показатели, влияющие на степень оползневой опасности.

В таблице 3.3. приведены результаты оценки вероятности обрушения откоса участка № 106. Расчеты показали, что этот показатель находится в диапазоне от

1,6 % до 36,1 %. Аналогичные оценки выполнены и для остальных оползнеопасных участков, на которых расположены подъездные дороги и другие проектируемые объекты трубопроводов «Сахалин-2».

Таблица 3.2 – Диапазон значений поправочных коэффициентов

Кoeffи- циент	Диапазон принимаемых значений		Независимые показатели	Характеристика	Относительная значимость
F_1	1,25	0,25	Возраст	Возраст	Высокая
F_2	4	0,9	Геология	Неблагоприятные грунтовые условия. Процессы выветривания	Очень высокая. Высокая
F_3	2	0,1	Геометрия откоса	Высота склона	Высокая
F_4	4	0,1	Геоморфо- логия	Уклон откоса	Очень высокая
F_5	4	0,5	Грунтовые воды	Уровень грунтовых вод. Дренажные условия. Наличие растительно- сти на откосе. Техногенный фактор	Очень высокая. Средняя. Высокая Очень высокая
F_e	6	0,5	Случаи потери устойчивости склона	Наличие трещин разрыва	Очень высокая

На основании проведенных исследований рекомендован комплекс инженерных мероприятий, включающий устройство откосов с бермами в сочетании с противоэрозионными покрытиями и дренажными сооружениями [35, 45, 95]. Отметим, что достоверность оценки оползневой опасности оказывает доминирующее влияние на величину риска, а значит, на жизнь и здоровье людей, безопасность движения транспорта, экономическую эффективность строительства.

Таблица 3.3 – Оценка вероятности обрушения откоса № 106 по методике табличных форм и поправочных коэффициентов (проект «Сахалин-2»)

Поправочный коэффициент, F	Диапазон значений, характеристика	Участок № 106
Трещины отрыва (F_1)	1,10 – незначительные; 1,25 – средние; 1,45 – крупные.	1,10
Высота (F_2)	0,5 – до 2 м; 0,6 – 2,5; 0,8 – 4; 1,0 – 6; 1,1 – 8; 1,2 – 12; 1,3 – 20; 1,5 – >25.	1,20
Уклон (F_3)	0,6 – 30°; 0,8 – 35°; 0,9 – 40°; 1,0 – 45°; 1,2 – 50°; 1,3 – 60°; 1,4 – 70°; 1,6 – >70°.	1,30
Мощность ОГП (F_4)	0,7 – до 2 м; 1,0 – 2,3; 1,2 – 3,5; 1,3 – 5,7; 1,4 – >7.	1,30
Эрозионные процессы (F_5)	0,8 – слабая; 1,0 – средняя; 1,2 – сильная.	1,00
Растительность (F_6)	0,9 – склон залесен; 1,0 – луговая растительность; 1,15 – нет.	1,00
Грунтовые воды (F_7)	1,1 – 1/3 часть склона; 1,2 – 2/3 части склона; 1,45 – полное водонасыщение.	1,45
Итоговый поправочный коэффициент	$F = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \cdot F_6 \cdot F_7 \cdot P_{cp}^*$	3,235
Средняя вероятность	P_{cp}^*	0,102
Вероятность обрушения откоса	$P_{cp}^* \cdot F$	0,330

Примечание – P_{cp}^* представляет собой среднюю величину вероятности обрушения в оползнеопасном регионе (оценивается по системе балльных весовых коэффициентов СБВК на основе 1 категории риска)

3.3 Диагностика оползневых участков автомобильных дорог г. Сочи

Диагностирование автомобильных дорог регионального значения в г. Сочи (рисунки 3.6–3.9) выполнялось в связи с тем, что на исследуемой территории практически повсеместно распространены неблагоприятные инженерно-геологические процессы: оползневые, эрозионные, выветривание, плоскостной смыв и др. [7].



Рисунок 3.6 – Оползневой участок автомобильной дороги Подъезд к селу Красная Воля, км 1+100



Рисунок 3.7 – Разрушенный оползнем участок дороги Веселое – Нижняя Шиловка, км 3+900



Рисунок 3.8 – Оползень на низовом склоне участка автомобильной дороги Макопсе – Наджиги, км 5+300



Рисунок 3.9 – Разрушение водопропускной трубы на автомобильной дороге Лазаревское – Кирова, км 3+600

Участки дорог почти на всем протяжении проходят в выемках и полувыемках, насыпях и полунасыпях, что значительно увеличивает вероятность возникновения оползневых очагов, которая существовала еще и до освоения территории.

В ходе диагностики обследовано более шестидесяти оползнеопасных склонов и участков трасс [18, 43]. Работы включали в себя сбор, обработку и анализ литературных и фондовых материалов, визуальное обследование территории, выявление признаков и факторов развития оползневых процессов, составление карт инже-

нерно-геологических процессов участков автомобильных дорог, оценку оползневой опасности и риска.

В геологическом строении территории принимают участие породы мелового, палеогенового и четвертичного возрастов. В структурном положении участки приурочены к Сочи-Адлерской депрессии, являющейся наземным восточным замыканием Туапсинского предгорного прогиба, большая часть которого заложена на шельфовой зоне Черного моря. Отложения представлены преимущественно карбонатно-терригенным комплексом платформенного и субплатформенного типа. Основными факторами развития оползней являются:

- экзогенные – увлажнение пород атмосферными и подземными водами, гидростатическое и гидродинамическое давления, подсечка склонов эрозией, выветривание;

- антропогенные – деятельность человека: количество антропогенных оползней, вызванных дорожным строительством, на исследуемой территории значительно возросло; активизация оползней вызвана, в первую очередь, подсечкой склонов выемками и полувыемками, устройством насыпей и полунасыпей, понижающих устойчивость оползневых склонов, отсутствием организованного стока поверхностных вод.

Как показало обследование, в настоящее время оползневой процесс активно развивается, деформируя полотно автомобильных дорог. В ходе диагностики нами разработан метод, позволяющий оценить оползневой риск при исследовании большого количества оползневых и оползнеопасных склонов на стадии ТЭО-проекта. Подход не требует специального выполнения инженерно-геологических изысканий. Позволяет классифицировать участки по категориям оползневого риска, выявить

наиболее опасные участки, установить приоритетный порядок и рекомендовать мероприятия для проектирования и выполнения комплекса инженерной защиты. В итоге оценки определяется интегральный показатель, который подсчитывается с использованием личного опыта специалиста и накопленных знаний. К недостаткам метода можно отнести недоучет нередко сложного многоэтапного сценария развития процессов взаимодействия сооружений с геологической средой, а также некоторые упрощения при комплексном учете разнообразных факторов оползневой опасности.

Рассматривались следующие факторы: категория и степень повреждения полотна дороги; наличие трещин отрыва и величина их раскрытия; протяженность, высота и уклон оползнеопасного участка; наличие растительности; наличие мероприятий инженерной защиты, уровень повреждения; существование угрозы населению и объектам; техногенное воздействие.

Каждому фактору, способствующему оползневому риску, присваивались относительные коэффициенты от 1 до 10, величины которых получены эмпирически путем анализа результатов обследований порядка ста оползнеопасных склонов (таблица 3.4).

Коэффициенты позволяют учесть инженерно-геологические и гидрогеологические особенности исследуемых участков, данные об исторической активизации склона, техногенный фактор и другие показатели оползневой опасности.

В качестве примера, приведем результаты исследований пяти участков дорог; относительные коэффициенты назначались индивидуально (таблица 3.5). На рисунке 3.10 представлено распределение величины риска и стоимости мероприятий инженерной защиты.

Таблица 3.4 – Коэффициенты факторов оползневой риска

Коэффициент	Диапазон значений		Факторы оценки	Характеристика	Относительная значимость
1	2		3	4	5
K_1	2	10	Категория автомобильной дороги	Значения коэффициентов в соответствии с категорией дороги: I – 10; II – 8; III – 6; IV – 4; V – 2	Очень высокая
K_2	3	10	Степень повреждения полотна дороги	Оползневые явления с захватом проезжей части или деформации дорожного полотна (просадки, трещины и т.д.): повреждение до ¼ части дорожного полотна или незначительные трещины – 3; от ¼ до ½, трещины, просадки – 6; от ¾ до полного нарушения целостности участка дороги – 10	Очень высокая
K_3	3	9	Наличие трещин отрыва, величина их раскрытия	Образование трещин отрыва, бровок срыва, наличие других факторов, свидетельствующих об активном оползневом процессе: крупные бровки срыва, трещины – 9; средние – 6; незначительные – 3	Очень высокая
K_4	1	10	Уклон оползнеопасного участка	При уклоне до 30° – 1; от 30° до 35° – 2; от 35° до 40° – 3; от 40° до 45° – 4; от 45° до 50° – 5; от 50° до 60° – 6; от 60° до 70° – 8; свыше 70° – 10	Очень высокая

Продолжение таблицы 3.4

1	2		3	4	5
K_5	2	10	Протяженность оползнеопасного участка	В зависимости от протяженности участка развития ОГП, значения коэффициентов: длина до 20 м – 2; от 20 до 40 м – 3; от 40 до 60 м – 4; от 60 до 80 м – 5; от 80 до 100 м – 6; от 100 до 150 м – 8; более 150 м – 10	Высокая
K_6	1	10	Высота склона	При высоте склона или откоса до 2 м, принимается коэффициент 1; от 2 до 3 м – 2; от 3 до 5 м – 3; от 5 до 7 м – 4; от 7 до 10 м – 5; от 10 до 15 м – 6; от 15 до 25 м – 8; свыше 25 м – 10	Высокая
K_7	–	6	Подмыв берега рекой	Размыв берега в результате активной деятельности рек – 4	Средняя
K_8	1	3	Растительность на склоне	Если откос покрыт растительностью, залесен, «пьяный» лес отсутствует – 1; склон задернован, с травой – 2; отсутствие растительности на склоне – 3	Низкая
K_9	0	6	Уровень повреждения мероприятий инженерной защиты	Наличие искусственных сооружений на склоне (водоотводные лотки, дренаж, подпорные стены), в хорошем состоянии – 0; искусственные сооружения в удовлетворительном состоянии – 4; в аварийном состоянии или при значительных видимых повреждениях – 10	Средняя

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5
K_{10}	–	10	Угроза жилым объектам и населению	Очень высокая
K_{11}	2	6	Техногенный фактор	Средняя
			В случае, когда в непосредственной близости от оползнеопасного участка находится населенный объект или места скопления людей, и существует реальная угроза жизни населения, коэффициент принимает значение 10	
			При наличии результатов антропогенной деятельности человека, которые негативно повлияли на устойчивость исследуемого участка (насыпи, подрезки, а также при нарушении технологии строительного производства), – 6; при незначительном техногенном воздействии – 2	

В зависимости от величины интегрального показателя риска определены соответствующие категории. Участки, относящиеся к первой категории, – самые опасные в оползневом отношении и требуют первоочередного выполнения инженерной защиты.

Пятая категория присуща участкам склонов, находящимся в период исследований в стабилизированном состоянии (без видимых признаков проявления оползневой активности), на которых необходимо выполнять плановые осмотры и обследования.

С помощью предлагаемого метода в сжатые сроки и при минимуме данных инженерно-геологических изысканий были определены категории оползневой опасности более шестидесяти исследуемых участков автомобильных дорог (рисунок 3.11). Этот факт чрезвычайно важен в ходе разработки ТЭО-проектов, а также при обосновании инвестиций строительства противооползневых мероприятий.

Таблица 3.5 – Классификация оползневых участков автомобильных дорог на основе факторов риска

№ п/п	Факторы оценки оползневой опасности	Наименование участка автомобильной дороги				
		Макопсе – Наджиги, км 5+300	Лазаревское – а. Кирова, км 9+400	Дагомус – Солох аул, 7+500	Подъезд к с. Красная Воля, км 1+100	Веселое – Нижняя Шиловка, км 6+900
1	Категория дороги	4 (IV)	4 (IV)	4 (IV)	4 (IV)	4 (IV)
2	Степень повреждения дорожного полотна	6 (+)	3 (+)	– (–)	– (–)	6 (+)
3	Наличие трещин отрыва и величина их раскрытия	3 (+)	3 (+)	3 (+)	6 (+)	6 (+)
4	Протяженность оползнеопасного участка	8 (120 м)	3 (40 м)	2 (20 м)	2 (15–20 м)	4 (50–60 м)
5	Высота склона	4 (5–7 м)	8 (20 м)	5 (10 м)	8 (20–25 м)	4 (5–6 м)
6	Уклон оползнеопасного участка	6 (60°)	4 (40°)	6 (60°)	8 (60°–65°)	5 (45°)
7	Подмыв берега рекой	4 (+)	– (–)	4 (+)	– (–)	4 (+)
8	Растительность на склоне	1 (+)	2 (+)	1 (+)	1 (+)	2 (+)
9	Наличие мероприятий инженерной защиты и уровень повреждения	4 (+)	– (–)	– (–)	– (–)	– (–)
10	Угроза жилым объектам и населению	– (–)	– (–)	– (–)	– (–)	– (–)
11	Техногенный фактор	– (–)	– (–)	– (–)	– (–)	– (–)
Суммарный показатель риска		40	27	25	28	35
Категория риска		I	IV	V	III	I



Рисунок 3.10 – Диаграмма распределения величины риска и стоимости защитных мероприятий на участках автомобильных дорог

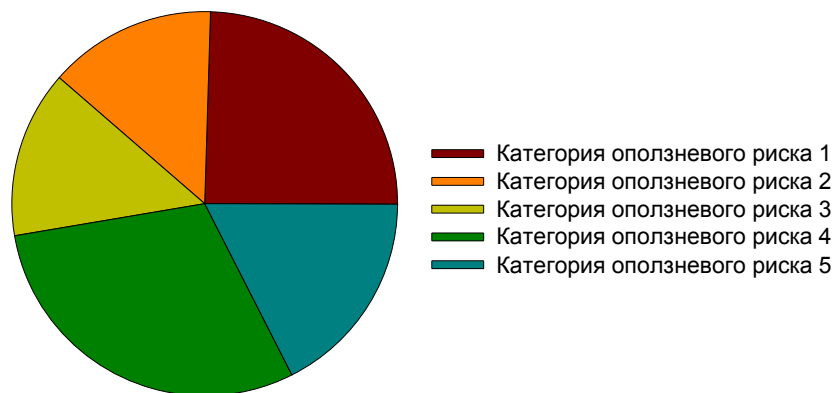


Рисунок 3.11 – Процентное распределение исследуемых участков автомобильных дорог по категориям оползневой риска

В результате проведенных исследований был незамедлительно определен комплекс мероприятий инженерной защиты региональных автомобильных дорог в г. Сочи. Таким образом, предлагаемый подход позволяет в кратчайшие сроки, при минимальных трудовых и материальных затратах, на стадиях предпроектных проработок и ТЭО-проект объективно классифицировать объекты по приоритетности работ и уровню потенциальных затрат.

Классификация участков по баллам – хорошо зарекомендовавший себя подход к оценке опасностей и рисков инженерно-геологических процессов. В зависимости от поставленных задач, данный метод может иметь существенные отличия. Так, некоторыми исследователями геотехнических рисков на линейных сооружениях (в частности, трассах магистральных газопроводов) также предлагается балльная оценка интенсивности проявления геодинамических процессов, например, склоновой эрозии, как представлено в [52].

Однако шкала баллов упрощена и сведена к минимуму, включая в себя три балльных величины (1, 2, 3), соответствующих определенной характеристике и интенсивности проявлений геодинамических процессов (слабая, средняя, сильная).

Аналогичная шкала, включающая в себя 3 категории опасности процессов (умеренно опасные, опасные, весьма опасные), использовалась для составления карты опасности экзогенных геологических процессов в г. Иркутске [57]. В работах [36, 38] также представлена методика, позволяющая оценивать факторы оползневой риска на склонах и откосах автомобильных дорог, однако в ряде случаев полученные результаты занижены.

В методике учтены результаты систематизации и уточнения роли отдельных факторов и значений соот-

ветствующих весовых коэффициентов. Выявлено следующее:

- при визуальном обследовании, без отбора керна, не представляется возможным определить степень водонасыщения грунта;

- наличие в подножье верхового склона воды не влияет существенно на интенсивность проявления оползневых процессов;

- процессы выветривания можно не рассматривать как влияющий фактор, так как его действие проявляется с течением времени, и в ряде случаев активизация оползня происходит независимо от их развития;

- в большинстве случаев при визуальном обследовании не представляется возможным установить мощность грунтов, которые вовлечены (или могут быть вовлечены) в смещение, даже ориентировочно, особенно, если отсутствует стенка срыва.

На основании результатов исследований, предлагается исключить из рассмотрения названные факторы на стадии предпроектных разработок, так как иначе категория оползневой риска может быть установлена не верно. Кроме этого, в [31] введены коэффициенты (H_{11} и H_{12}), учитывающие состояние подпорных стен и вспомогательных сооружений, однако, не принимается во внимание случай отсутствия на участке мероприятий инженерной защиты. Введен весовой коэффициент, учитывающий факт наличия или отсутствия таких мероприятий с учетом уровня их повреждения. Также в [31] отдельно рассматриваются факторы, влияющие на вероятность смещения грунтов, и факторы, определяющие ущерб, что усложняет применение в процессе визуального обследования.

В отличие от [31], предлагаются следующие значения весовых коэффициентов, полученные эмпирически

в зависимости от значимости каждого рассматриваемого фактора в развитии конкретного оползня:

- низкой значимости (например, наличие растительности на склоне) соответствует диапазон значений весовых коэффициентов 1–3;

- при средней значимости (подмыв берега рекой, техногенный фактор и др.) наибольшее значение весового коэффициента возрастает до 6;

- при очень высокой значимости (категория автомобильной дороги, степень повреждения полотна, наличие трещин отрыва и др.) весовые коэффициенты могут принимать значения от 2 до 10.

Описанная методика апробирована на порядка ста участках автомобильных дорог. Используемая на стадии предпроектных разработок, она позволяет обоснованно, адекватно и в кратчайшие сроки оценить оползневой риск на автомобильных дорогах.

3.4 Оценка оползневой риска по методике наименьших потерь

В процессе обследования автомобильной дороги регионального значения Лазаревское – Кирова (рисунок 3.12), выявлено развитие оползневых процессов на прилегающих склонах и откосах. Сложившаяся инженерно-геологическая ситуация представляет опасность и для трассы, и для населения. Поэтому выполнена оценка риска эксплуатации примыкающих к трассе объектов на основе методики наименьших потерь.

Методика наименьших потерь позволяет определить следующие показатели:

- индивидуальный риск населения в здании;

- социальный и потенциальный риски негативных последствий;

- распределение степени риска согласно проявлению оползневых процессов в различных частях склона;

- оценить допустимость уровня риска.



Рисунок 3.12 – Общий вид оползнеопасного участка автомобильной дороги с. Лазаревское – п. Кирова, км 2+800

К недостаткам данной методики можно отнести грубую характеристику основных факторов [34], отсутствие взвешивающих коэффициентов, а также субъективный характер, затрудняющий интерпретацию результата. Однако, метод позволяет в кратчайшие сроки и при недостаточном объеме инженерно-геологических данных оценить степень риска исследуемого объекта. В результате расчетов определяется ряд количественных показателей риска, на основании которых осуществляется классификация исследуемых объектов по степени опасности и приоритетности защиты.

В качестве примера рассмотрим жилой дом (рисунок 3.13), расположенный в языке оползневого склона уклоном 1:2 ниже (в плане) полотна дороги [9]. В здании, шириной 10 м, постоянно проживает семья из четырех человек. Здание находится под угрозой разрушения от воздействия оползня.

На основании карт геологической опасности региона, а также исторических данных об активизации склона, оползневые процессы имеют следующую частоту образования:

- небольшие оползни (объемом до 50 м^3) = 1/год;
- крупные оползни (объемом от 50 до 500 м^3) = 0,1/год.

Зона распространения оползневых масс, по данным изысканий прошлых лет, представлена в таблице 3.7.



Рисунок 3.13 – Автомобильная дорога Лазаревское – Кирова, км 2+800: жилой дом, находящийся под угрозой разрушения действующим оползнем

Таблица 3.7 – Потенциальное проявление оползневых процессов

Горизонтальная зона влияния, м	Вероятность для небольших оползней, %	Вероятность для крупных оползней, %
20	90	40
40	10	60

Так как максимальная зона распространения потенциального оползня составляет 40 м, разделим пространство перед зданием на четыре равных участка от А до D (рисунок 3.14) длиной по 10 м. Участок Е находится на расстоянии более 40 м от здания и не входит в зону влияния. Поскольку в здании проживают четыре человека, распределение их присутствия по времени суток представлено в соответствии с таблицей 3.8.

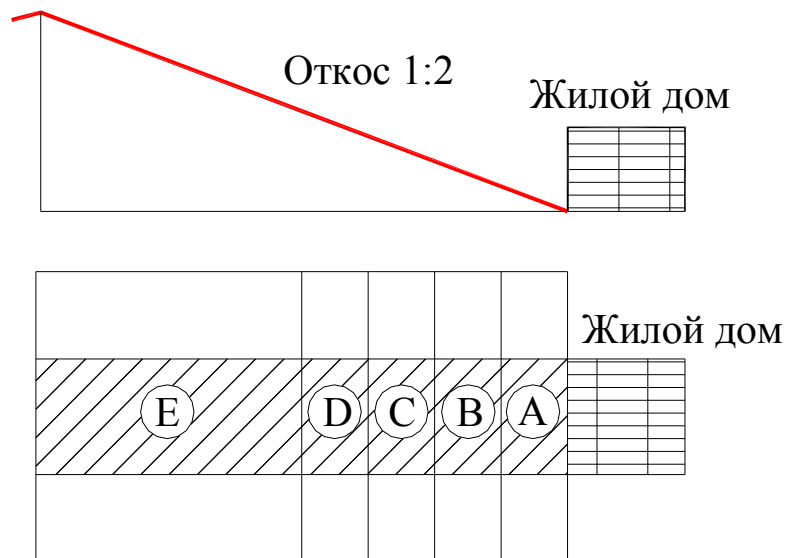


Рисунок 3.14 – Ситуационный план и сечение исследуемого участка автомобильной дороги

Таблица 3.8 – Время пребывания жителей в здании

Время суток	08.00–14.00	14.00–20.00	20.00–08.00
Количество человек	1	3	4

Среднее количество человек в зоне риска:

$$1 \cdot 25 \% + 3 \cdot 25 \% + 4 \cdot 50 \% = 3 \text{ человека.}$$

Потенциальная частота оползнеобразования:

- для небольших оползней = $1,25 \% \cdot 1 = 0,0125/\text{год}$;
- для крупных оползней = $1,25 \% \cdot 0,1 = 0,00125/\text{год}$.

На основании полученных данных определяем коэффициенты уязвимости (рисунок 3.15). Определяем потенциальный риск гибели людей (таблица 3.9):



Рисунок 3.15 – График распределения коэффициентов уязвимости для оползней различного масштаба

В случае, когда все 4 человека находятся в здании, индивидуальный риск населения = $8,85 \cdot 10^{-3}/\text{год}$. Социальный риск [96] составляет: ΣPLL = средний риск для населения $\times \Sigma P = 2,66 \cdot 10^{-2} PLL/\text{год}$.

Определяем вероятность проявления несчастных случаев (таблица 3.10). На основании полученных данных о количестве несчастных случаев и частоты, по диаграмме допустимого уровня риска (рисунок 3.16) оцениваем риск негативных последствий [107]. Как видно из графика, степень риска для данного случая превысила допустимый предел.

Таблица 3.9 – Потенциальный риск гибели людей

Зона	Средн. расст. от зоны до дома	Частота оползней (кол.-во/год)		Зона влияния (м)	Вероятн., P_1	Зона влияния перед домом (м)	Козф. уязвимости, V	Вероятн. ущерба, $P=f \cdot P_1 \cdot V$	$PLL = 3 (P)$
A	5	0,0125		20	0,9	15	0,3	0,003375	0,010125
				40	0,1	35	0,4	0,000500	0,001500
			0,00125	20	0,4	15	0,9	0,000450	0,001350
				40	0,6	35	0,9	0,000675	0,002025
B	15	0,0125		20	0,9	5	0,1	0,001125	0,003375
				40	0,1	25	0,4	0,000500	0,001500
			0,00125	20	0,4	5	0,3	0,000150	0,000450
				40	0,6	25	0,9	0,000675	0,002025
C	25	0,0125		20	0,9	–	–	0	0
				40	0,1	15	0,3	0,000375	0,001125
			0,00125	20	0,4	–	–	0	0
				40	0,6	15	0,9	0,000675	0,002025
D	35	0,0125		20	0,9	–	–	0	0
				40	0,1	5	0,1	0,000125	0,000375
			0,00125	20	0,4	–	–	0	0
				40	0,6	5	0,3	0,000225	0,000675
								$\Sigma P = 0,008850$	$\Sigma PLL = 0,026550$

Таблица 3.10 – Вероятность N и более несчастных случаев

Количество погибших, N	Вероятность появления людей в здании, P_p	Вероятность N несчастных случаев, $P_N = P_p \times \Sigma P$	Вероятность N и более несчастных случаев, F
4	0,5	0,0044250	0,0044250
3	0,25	0,0022125	0,0066375
2	0	0	0,0066375
1	0,25	0,0022125	0,0088500

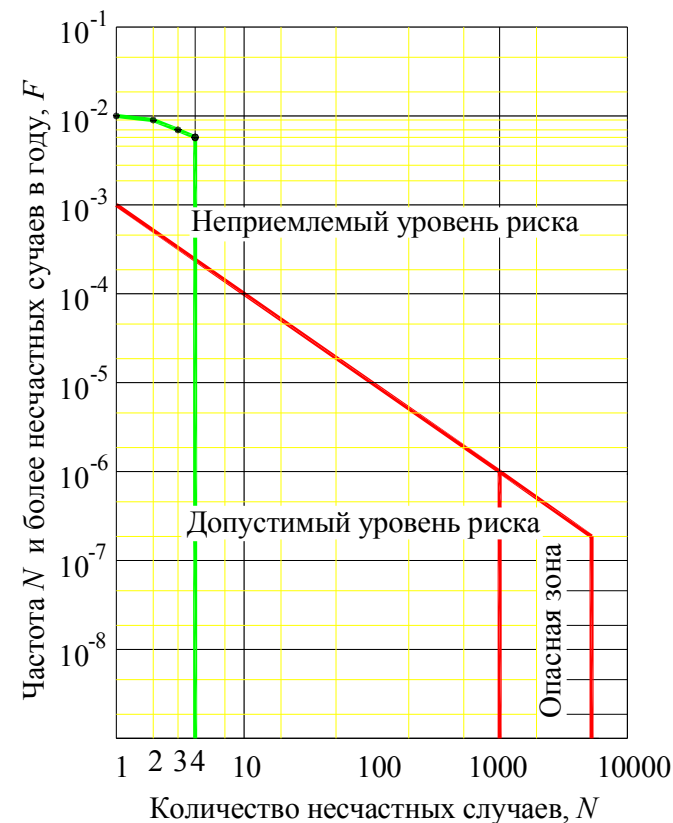


Рисунок 3.16 – График определения допустимого уровня риска

Оцениваем риск для каждой зоны оползнеобразования (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Распределение риска для каждой зоны

Зона	A	B	C	D	Сумма
Риск для зоны, $R (PLL / \text{год})$	0,01500	0,00735	0,00315	0,00105	$\Sigma R = 0,02655$
Процент возрастания риска для зоны = $= R / \Sigma R \cdot 100 \%$	56,50	27,68	11,86	3,96	$\Sigma = 100 \%$

По результатам исследования, уровень индивидуального риска населения составил $8,85 \cdot 10^{-3}$ /год, что превысило допустимый предел для данного случая. На участке автомобильной дороги и прилегающем оползневом склоне рекомендовано провести срочные аварийно-восстановительные работы для снижения степени риска. До окончания строительных работ жильцов следует переселить.

3.5 Методика комплексного инженерно-технического управления оползневым риском транспортных сооружений с учетом стадии проектирования

Транспорт имеет определяющее значение для экономики страны. Развиваясь, транспортное строительство сталкивается со множеством неопределенностей самого различного рода. Это не только структурные и системные риски, но и риски, обусловленные опасными природными и техногенными процессами.

Согласно А. А. Рагозину [54], риск возникает только при взаимодействии опасностей с объектом и не существует без них. Поэтому методика управления должна учитывать этот факт и не рассматривать опасности отдельно от сооружений, чтобы не разрывать логическую цепь и не потерять смысл понятия риска как итога взаимодействия опасности и объекта.

Оползневой риск оценивается по двум основным показателям: вероятности риска и величины риска, которые представляют собой, соответственно, вероятность возникновения ущерба (экономического, социального, экологического) в случае поражения оползнем рассматриваемого объекта (автомобильная или железная дорога, коммуникации, магистральный трубопровод и т. д.) и величину этого ущерба, выраженную в стоимостных или физических единицах [63, 72]. Оползневые подвижки могут приводить и к весьма значительному косвенному ущербу, например, в отношении геологической среды (загрязнение воздуха при разрушении оползнями экологически опасных объектов, подтопление и т. д.). Косвенный ущерб может быть связан с экономическими и со-

циальными последствиями (убытки от перерыва производства, от прекращения движения транспорта и т. п.).

В процессе прогнозирования природных опасностей и управления рисками можно выделить два основных направления [49]:

1) развитие и совершенствование методов изучения и оценки природных опасностей;

2) развитие и совершенствование методов контроля (мониторинга) природных опасностей и их прогнозирования.

При этом, методы изучения природных опасностей должны опираться на историко-генетический подход, комплексность исследований и системный подход, позволяющий рассматривать природный (техноприродный) процесс как сложную систему, элементы которой взаимосвязаны. Методы прогнозирования необходимо основывать на периодически (или постоянно) осуществляемых визуальных наблюдениях, инструментальных исследованиях, аналитических решениях.

В совокупности, результаты оценки и прогнозирования опасности являются основой для разработки мероприятий в составе управления природными (техноприродными) рисками. Инженерно-технический метод управления оползневым риском начинается с идентификации природной опасности, генезиса и механизма развития процесса, интенсивности явления. Прогнозирование опасных геологических процессов наиболее адекватно отражают комплексные вероятно-детерминированные методы. Общая структура оценки и управления риском включает в себя анализ опасности, анализ последствий, расчет риска, оценивание риска (сопоставление с критериями допустимого или приемлемого уровня), разработка мероприятий снижения риска, контроль за ситуацией [73, 75, 76].

Безусловно, что управление любым риском, в том числе оползневым, затрагивает многие сферы жизнедеятельности, включая политические стремления, общественные требования, регулирование ситуации, финан-

совые ресурсы, т. е. рассматривает социальную, экономическую, политическую точки зрения [97]. Поэтому исследования в области оползневой опасности и риска являются социально значимыми.

Процесс управления природными рисками можно рассматривать как комплекс взаимосвязанных и взаимодополняющих мероприятий, осуществляемых на всех уровнях управления – от локального до глобального [48]. Управление риском в сложных инженерно-геологических условиях заключается в таком регулировании факторов взаимодействия, при котором достигается снижение риска до приемлемого для общества уровня [67].

В случае оползневой опасности необходим постоянный контроль его уровня на основе долговременного мониторинга за безопасностью удерживающего противооползневое сооружение и инженерно-геологической средой. Использование новой расширенной системной модели вероятностного взаимодействия сооружения с геологической средой больше соответствует реальным инженерно-геологическим условиям, обычно характеризующимся значительной сложностью и длительным развитием многообразных и многоэтапных сценариев потенциально опасных процессов. Замена концепции абсолютной надежности откосов и склонов при определении коэффициента их устойчивости с помощью методов предельного равновесия на концепцию допустимого риска является более прогрессивным методологическим решением, способствующим повышению точности оценки уровня безопасности в условиях невозможности абсолютно полного изучения природных условий и искоренения техногенного фактора.

Управление оползневой опасностью на конкретном объекте следует осуществлять поэтапно, начиная с освоения территорий под строительство, предпроектных проработок, разработки проектно-сметной документации, строительства, капитального ремонта и реконструкции. В этом случае, мы вовремя получаем сведения о вероятных проявлениях таких инженерно-геологических опасностей, которые повлекут за собой различные потери.

Задача инженерно-технического управления риском транспортных сооружений – выполнение предупредительных мероприятий по защите объектов от оползней, а не борьба с их последствиями. Угрозы можно и нужно упредить и предотвратить и, в некоторых случаях, предсказать, а негативные последствия свести к минимуму [27]. Концепция приемлемого риска заключается в замене политики «реагировать и выправлять» нежелательные последствия на «предвидеть и предупреждать» такие изменения.

Лучший способ снижения риска – избегать строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры на оползневых склонах. Но социальные, политические, экономические, рыночные факторы часто делают освоение неблагоприятных территорий единственной альтернативой.

Управление оползневой опасностью – итерационный процесс, требующий постоянного контроля эффективности мероприятий по снижению риска на основе долговременного мониторинга с применением методов анализа техно-природного риска [53], научного сопровождения [68] и других мер, позволяющих обеспечивать безопасность функционирования строительных объектов. Даже, если при оценке тенденции развития опасных экзогенных процессов в разных регионах России окажется невозможным предотвратить какие-либо негативные события, то ведение мониторинга позволит минимизировать их неблагоприятные последствия [32]. В общем виде, систему мониторинга можно разделить на 3 типа [55]: медленное реагирование (преобладают функции исследований); быстрое реагирование (аварийно-предупредительные функции); смешанный.

Анализируя и обобщая вышесказанное, предлагается методика управления оползневой опасностью на транспортных объектах. Общая структура методики с учетом стадийности проектирования представлена на блок-схемах (рисунки 3.17, 3.18).

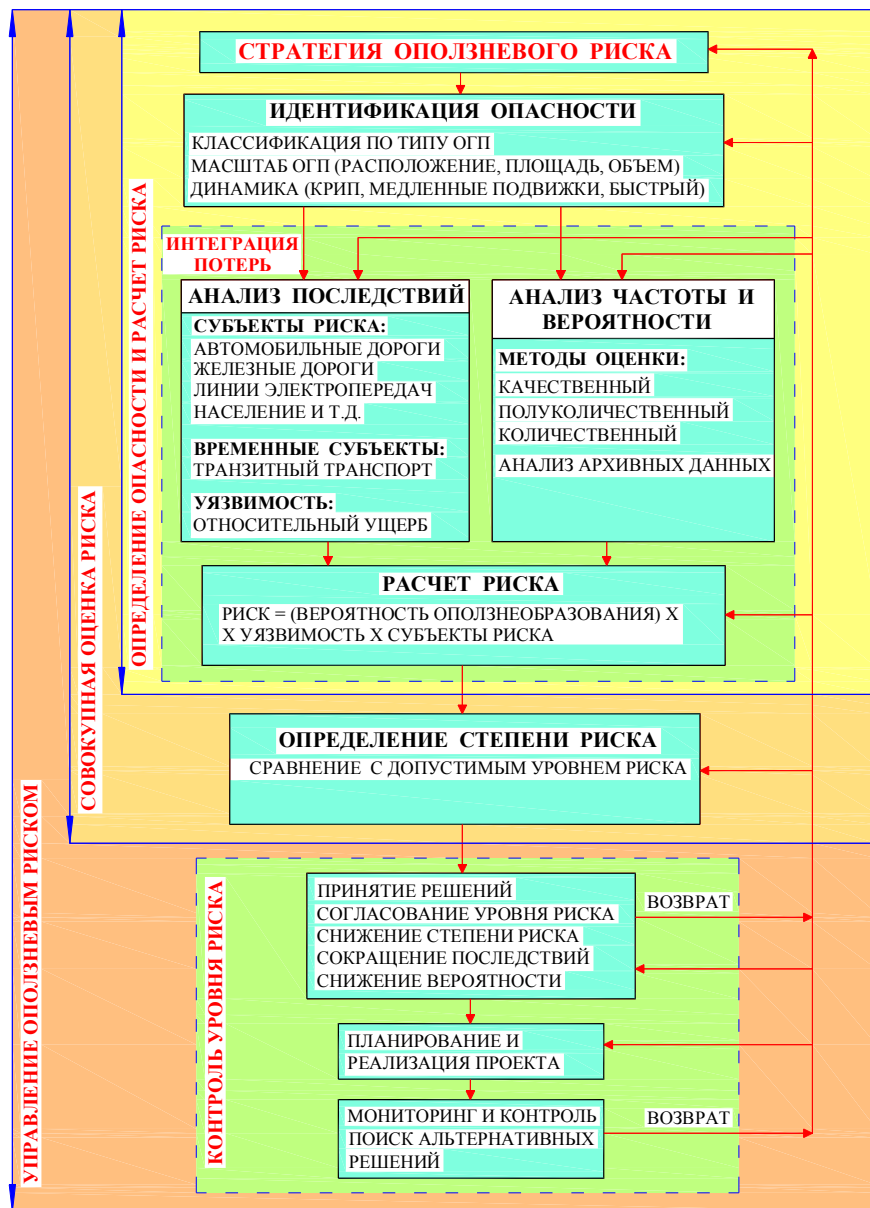


Рисунок 3.17 – Блок-схема методики управления оползневым риском

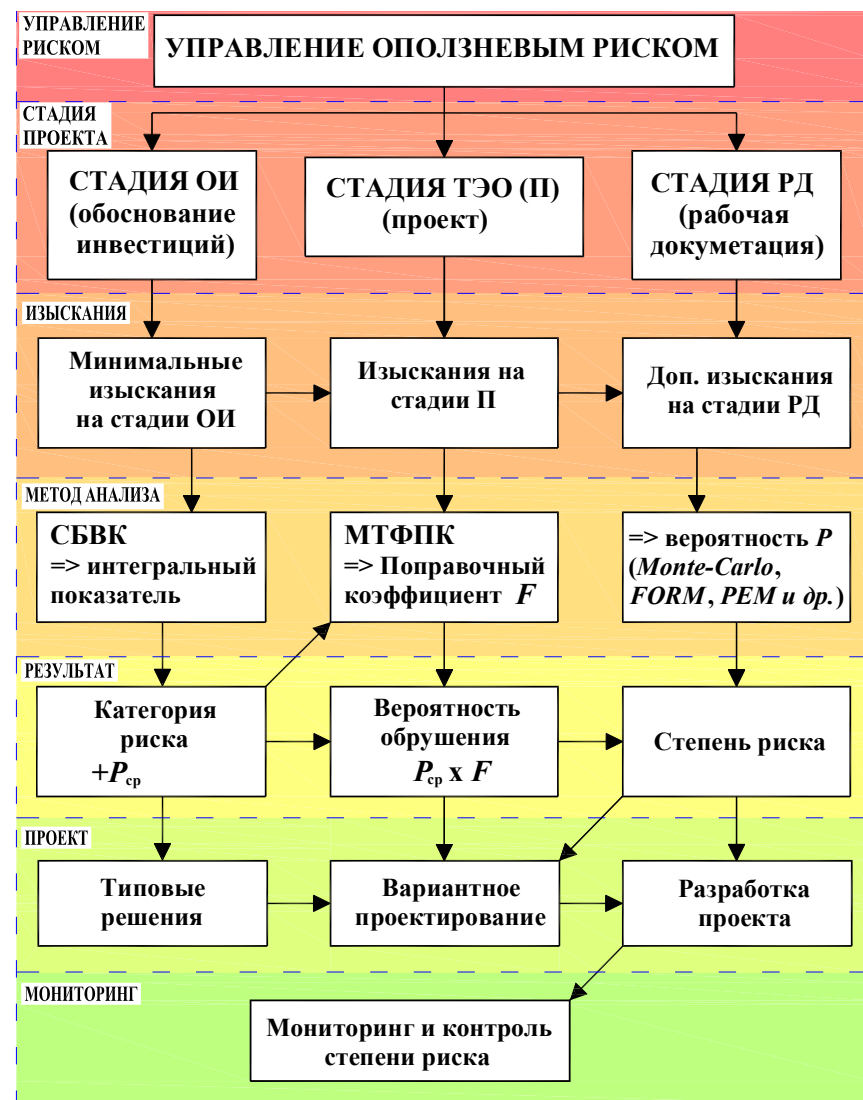


Рисунок 3.18 – Комплексная методика управления оползневым риском на стадиях проектирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов расчета устойчивости оползневых склонов на основе вероятностного моделирования позволяет в большей степени, чем детерминированный расчет, учесть неопределенности исходных данных, получить более достоверный результат и предотвратить возникновение аварийных последствий на автомобильных дорогах.

По результатам исследования 177 активных оползневых участков на автомобильных дорогах Краснодарского края выявлено, что для 56 случаев детерминированный расчет дает коэффициент устойчивости выше нормированного. При этом вероятностные расчеты для 138 рассматриваемых оползневых участков показали вероятность обрушения выше 34 %, что подтверждает необходимость мероприятий инженерной защиты.

Влияние изменчивости физико-механических свойств грунта на устойчивость однородного и неоднородного откосов, а также индекс надежности, выражается линейной зависимостью. При этом результаты, полученные с помощью различных расчетных методов (*Ordinary*, *Bishop*, *Janbu*, *GLE*) имеют удовлетворительную сходимость и отличаются не более чем на 10 %;

Анализ устойчивости откосов и склонов, выполняемый на основе вероятностного моделирования методом *Монте-Карло*, повышает надежность результата, по сравнению с использованием *FOSM*, в среднем на 23 % вследствие большего объема вычислений при обработке исходных данных.

Оценку оползневой опасности на территориях транспортного строительства рекомендуется выполнять на стадиях предпроектных проработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев В. П. Специальная инженерная геология: учебник / В. П. Ананьев, А. Д. Потапов, Н. А. Филькин. – М.: Высш. шк., 2008. – 263 с.
2. Андреева И. В. Использование ГИС для моделирования процесса выветривания в дорожном строительстве / И. В. Андреева, Е. Д. Осенняя // Повышение надежности и долговечности автомобильных дорог и искусственных сооружений: материалы Всерос. науч.-практич. конф. – Краснодар: Изд-во ТУ КубГТУ, 2000. – С. 6–7.
3. Безруков В. Ф. Физико-механические свойства горных пород Сочинского района // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. Сочи, 1971. – Вып. 3. – С. 39–55.
4. Безуглова Е. В. Инженерная защита транспортных сооружений на оползневых территориях / Е. В. Безуглова, С. И. Маций // Транспортное строительство. – 2011. – № 2. – С. 14–17.
5. Безуглова Е. В. Инженерно-геологическое обоснование надежности противооползневой защиты сооружений / Е. В. Безуглова, С. И. Маций, О. Ю. Ещенко // Инженерные изыскания. – 2010. – № 9. – С. 44–48.
6. Безуглова Е. В. Оползневая опасность и риск смещений грунтов на склонах: дисс. ... канд. техн. наук. – Краснодар: КубГАУ, 2005. – 200 с.
7. Безуглова Е. В. О причинах развития оползней на откосах автомобильных дорог / Е. В. Безуглова, С. И. Маций // Инженерная геология. – 2009. – № 2. – С. 50–53.
8. Билеуш А. И. Оползни и противооползневые мероприятия / А. И. Билеуш. – К.: Наукова думка, 2009. – 330 с.
9. Богомолов А. Н. Оценка оползневой опасности на основе методики наименьших потерь / А. Н. Богомолов, Д. В. Плешаков, С. И. Маций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета: Серия: Строительство и архитектура. – 2007. – Вып. 8 (27). – С. 22–27.
10. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М., 1978. – 447 с.

11. Габибов Ф. Г. Методика проведения риск-анализа оползневых склонов при их освоении и эксплуатации / Ф. Г. Габибов, Ф. Ш. Мамедов, К. С. Махмудов // ГЕОРИСК-2009: материалы международной науч.-практич. конф. – Т. 2. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 15–18.

12. Галкин В. А. Риск аварий магистральных нефтепроводов от воздействия опасных геологических процессов (ОГП) / В. А. Галкин, И. К. Фоменко // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 2. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 87–91.

13. Гинзбург А. К. Противооползневые удерживающие конструкции / А. К. Гинзбург. – М.: Стройиздат, 1979. – 80 с.

14. Гольдштейн М. Н. Об исследовании механических свойств грунтов / М. Н. Гольдштейн, С. С. Бабицкая // Вопросы геотехники. – Днепропетровск, 1972. – № 21. – С. 11–23.

15. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.

16. ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования.

17. Гудкова Н. К. Об активизации опасных геодинамических процессов в результате увеличения техногенной нагрузки при строительстве в Сочинском регионе / Н. К. Гудкова, М. Г. Оноприенко // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2011. – Т. 7. – № 3. – С. 37–40.

18. Диагностика оползневых участков на автомобильных дорогах регионального значения г. Сочи. – Т. I. – Краснодар: ООО «ГеоПроект», 2007.

19. Добров Э. М. Исследование вопросов оценки и обеспечения устойчивости откосов в дорожном строительстве с учетом ползучести грунтов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Э. М. Добров. – М.: Союздорнии, 1977. – 34 с.

20. Добров Э. М. Обеспечение устойчивости склонов и откосов в дорожном строительстве с учетом ползучести грунтов / Э. М. Добров. – М.: Транспорт, 1975. – 216 с.

21. Ермолаев Н. Н. Надежность оснований сооружений / Н. Н. Ермолаев, В. В. Михеев. – Л.: Стройиздат, 1976. – 152 с.

22. Ещенко О. Ю. Армогрунтовые насыпи и основания: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / О. Ю. Ещенко. – Ленинград. гос. техн. ун-т. – СПб, 1991. – 21 с.

23. Защита горных дорог от опасных геологических процессов / В. Д. Казарновский, Б. Б. Каримов, Х. Я. Мурадов, З. И. Рогозина, Г. А. Федотов. – К.: Логос, 1998. – 252 с.

24. Инженерные сооружения в транспортном строительстве. В 2 кн. Кн. 2: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [П. М. Саламахин, А. В. Маковский, В. И. Попов и др.]; под ред. П. М. Саламахина. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 272 с.

25. Казарновский В. Д. Влияние циклического промерзания-оттаивания и набухания-высушивания на сопротивление глинистых грунтов сдвигу / В. Д. Казарновский, Ю. М. Львович // Вопросы инженерной геологии: докл. совет. ученых к Междунар. конгрессу Междунар. ассоциации инженер-геологов. – М., 1970. – С. 106–117.

26. Караулов В. Б. Геология. Основные понятия и термины: Справочное пособие. Изд. 5-е / В. Б. Караулов, М. И. Никитина. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 152 с.

27. Карлин А. Н. Концепция управления безопасным функционированием сложных систем в условиях ЧС с использованием инструмента риска / А. Н. Карлин, А. А. Музалевский, Е. А. Яйли // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 2. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 306–310.

28. Клименко В. И. Пути повышения эффективности противооползневых мероприятий на черноморском побережье Кавказа / В. И. Клименко, Н. И. Дубровин // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. – Сочи, 1973. – Вып. 5. – С. 91–101.

29. Крымский В. Г. Интервально-вероятностное оценивание риска от влияния опасных гидрологических факторов на участки территорий / В. Г. Крымский, А. Х. Абдуллин // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 2. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 77–82.

30. Кузахметова Э. К. Особенности прогноза осадки при индивидуальном проектировании насыпей автомобильных дорог из местных грунтов / Э. К. Кузахметова // Повышение надежности и долговечности автомобильных дорог и искусственных сооружений: материалы Всерос. науч.-практич. конф. Краснодар: Изд-во ТУ КубГТУ, 2000. – С. 128–131.

31. Любарский Н. Н. Полуколичественная оценка риска оползневых склонов автомобильных дорог в Краснодарском

крае: дисс. канд. техн. наук / Н. Н. Любарский. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 147 с.

32. Мальнева И. В. Современные тенденции развития опасных природных процессов на территории России / И. В. Мальнева, Н. К. Кононова // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 1. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 176–181.

33. Маслов Н. Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства / Н. Н. Маслов. – М.: Стройиздат, 1984. – 176 с.

34. Материалы 1-й Международной школы по оценке и управлению оползневым риском LARAM-2006. – Равелло, 2007.

35. Маций С. И. Новые методологические подходы к определению степени оползневого риска в строительстве / С. И. Маций, Д. В. Плешаков // Известия вузов: Строительство. – 2008. – № 5 (593). – С. 93–98.

36. Маций С. И. Полуколичественная оценка оползневого риска на участках автомобильных дорог / С. И. Маций, Е. В. Безуголова // ГеоРиск. – 2009. – № 2. – С. 22–25.

37. Маций С. И. Противооползневая защита / С. И. Маций. – Краснодар: АлВи-дизайн, 2010. – 288 с.

38. Маций С. И. Управление оползневым риском / С. И. Маций, Е. В. Безуголова. – Краснодар: АлВи-дизайн, 2010. – 240 с.

39. Мурый А. А. Неотектоническая активизация оползневых процессов на территории Большого Сочи (на примере кепшинского оползня) / А. А. Мурый, О. А. Вадачкория // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 1. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 208–213.

40. Оценка экономического ущерба от потенциальной лавинной опасности на территории Сахалинской области / В. Е. Сучков, А. В. Иванов, Э. Като, С. Ким // Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах. – Южно-Сахалинск, 2006. – С. 215–218.

41. Пальшин Г. Б. Оползни-потоки и опыт борьбы с ними на Черноморском побережье Кавказа / Г. Б. Пальшин, С. А. Гогоуадзе // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. – Сочи, 1973. – Вып. 5. – С. 110–141.

42. Петрова Е. Г. Природно-техногенные опасности в России в условиях климатических изменений / Е. Г. Петро-

ва // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 1. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 148–152.

43. Плешаков В. Д. Диагностика оползневых участков автомобильных дорог на основе методики оптимального риска / Д. В. Плешаков, С. И. Маций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета: Серия: Строительство и архитектура. – 2008. – Вып. 10 (29). – С. 200–205.

44. Плешаков Д. В. Качественная и полуколичественная оценка оползневого риска / Д. В. Плешаков, С. И. Маций // Риск – 2006: материалы Всерос. конф. – М.: Изд-во Росс. ун-та дружбы народов, 2006. – С. 213–216.

45. Плешаков Д. В. Оценка оползневой опасности на проекте магистрального трубопровода «Сахалин-2» / Д. В. Плешаков, С. И. Маций // Городские агломерации на оползневых территориях: материалы III Междунар. науч. конф., посвященной 75-летию строительного образования в г. Волгограде. – Волгоград, 2005. – Ч. I. – С. 157–162.

46. Постоев Г. П. К вопросу количественной оценки оползневого риска / Г. П. Постоев // Риск – 2003: материалы Всерос. конф. – Т. 2. – М.: Изд-во Росс. ун-та дружбы народов, 2003. – С. 48–50.

47. Пояснительная записка к карте оползневой пораженности к проекту «Строительство центральной автомагистрали г. Сочи «Дублер Курортного проспекта от км 172 федеральной автодороги М-27 Дзубга – Сочи с реконструкцией участка автомобильной дороги от р. Бзугу до р. Сочи (вторая очередь)», Краснодарский край. – ГУП «Кубаньгеология». – Краснодар, 2009.

48. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / под ред. А. А. Рагозина. – М.: КРУК, 2003. – 320 с.

49. Природные опасности России. Природные опасности и общество. Тематический том / под ред. В. И. Осипова, С. К. Шойгу. – М.: КРУК, 2002. – 248 с.

50. Противооползневые и противозрозионные мероприятия в районе б. Куца и г. Зеленского. Рабочий проект. – Том 1. – Пояснительная записка. – Краснодар: ООО «ГеоПроект», 2004.

51. Пырченко В. А. Проблемы практического применения оценок природного риска / В. А. Пырченко // ГЕОРИСК-2009:

материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 2. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 23–27.

52. Пыстина Н. Б. Использование результатов производственного экологического мониторинга трасс магистральных газопроводов для идентификации и управления геоэкологическими рисками / Н. Б. Пыстина // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 2. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 336–343.

53. Пшеничкина В. А. Методы анализа риска в системе мониторинга технического состояния зданий и сооружений / В. А. Пшеничкина, В. Н. Соснов // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – Т. 3. – № 3. – С. 88–92.

54. Рагозин А. А. Теория и практика оценки геологических рисков: дисс. в виде науч. докл. на соискание ученой степени д-ра геол. – минерал. наук: 04.00.007 / ПНИИИС. – М., 1997. – 62 с.

55. Разработка программного комплекса ведения автоматизированного геоэкологического мониторинга для обеспечения безопасности инженерных сооружений / Т. В. Орлов, П. В. Березин, К. В. Фессель, А. А. Викторов, А. С. Викторов // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 1. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 88–92.

56. Рубцов И. В. Закрепление грунтов земляного полотна автомобильных и железных дорог / И. В. Рубцов, В. И. Митраков, О. И. Рубцов. – М.: АСВ, 2007. – 184 с.

57. Рыбченко А. А. Оценка опасности экзогенных геологических процессов г. Иркутска / А. А. Рыбченко // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. 1. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 153–156.

58. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения / Минстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1997.

59. Строительство транспортной развязки на пересечении Курортного проспекта и ул. 20 Горнострелковой дивизии (км 184, «Стадион») на автомобильной дороге М-27 Дзубга-Сочи до границы с Грузией (на Тбилиси, Баку), Краснодарский край. Проект. Материалы изысканий. – Том 2К. 65/2008-И-ИГИ. Отчет об инженерно-геологических изысканиях (Корректировка по замечаниям и предложениям ФГУ «Главгосэкспертизы России»). – ЗАО «Институт «Стройпроект», ООО «Сочитранстоннельпроект ТО-44». – СПб, 2009.

60. Сучков В. Е. Влияние снежных лавин и селевых потоков на содержание автомобильных дорог Сахалина / В. Е. Сучков // Дороги, Уфа. – 2007. – № 4. – С. 34–35.

61. Сучков В. Е. Мероприятия по уменьшению рисков лавинной и селевой опасности на Сахалине и Курильских островах / В. Е. Сучков // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. II. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 281–288.

62. Тихвинский И. О. К инженерно-геологической оценке опыта борьбы с оползнями на берегу Черного моря северо-западнее Сухуми / И. О. Тихвинский, М. П. Самохвалова // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. – Сочи, 1973. – Вып. 5. – С. 102–109.

63. Тихвинский И. О. Оценка оползневого риска на региональном и локальном уровнях / И. О. Тихвинский // Оценка и управление природными рисками. Материалы Общероссийской конференции «Риск – 2000». – М.: Анкил, 2000. – С. 242–246.

64. Уязвимость сооружений, проектируемых и эксплуатируемых на структурно-неустойчивых грунтах Азербайджана / Ф. Г. Габибов, Ф. Ш. Мамедов, А. Т. Амрахов, К. С. Махмудов // ГЕОРИСК-2009: материалы Международной науч.-практич. конф. – Т. I. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – С. 273–277.

65. Факторы риска, влияющие на устойчивость объектов гражданского и промышленного назначения / Ю. В. Нарышкин, В. Б. Болтыров, В. Ф. Булатов, Ю. Н. Карнет // Риск – 2006: материалы Всерос. конф. – М.: Изд-во Росс. ун-та дружбы народов, 2006. – С. 322–324.

66. Федотов Г. А. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2 кн. Кн. 2: учебник / Г. А. Федотов, П. И. Поспелов. – М.: Высш. шк., 2010. – 519 с.

67. Фелелова И. А. Управление природными рисками / И. А. Фелелова // Риск – 2006: материалы Всерос. конф. – М.: Изд-во Росс. ун-та дружбы народов, 2006. – С. 331–334.

68. Цернант А. А. Научное сопровождение объектов как условие обеспечения комплексной безопасности строительства / А. А. Цернант // Транспортное строительство. – 2009. – № 3. – С. 2–5.

69. Шадунц К. Ш. Некоторые особенности проектирования порталных стен тоннелей на дороге Адлер – Красная Поляна / К. Ш. Шадунц, Э. Н. Амелина, С. И. Мацый // Повышение надеж-

ности и долговечности автомобильных дорог и искусственных сооружений: материалы Всерос. науч.-практич. конф. Краснодар: Изд-во ТУ КубГТУ, 2000. – С. 197–200.

70. Шадунц К. Ш. Расчет высоты подпорных стен для стабилизации оползней-потоков / К. Ш. Шадунц, А. К. Рябов // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. – Сочи, 1973. – Вып. 5. – С. 142–146.

71. Шадунц К. Ш. Экспериментальные исследования механизма возникновения оползней в покровных образованиях глинистых грунтов / К. Ш. Шадунц // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. – Сочи, 1973. – Вып. 5. – С. 59–65.

72. Шеко А. И. Проблемы опасности и риска от экзогенных геологических процессов / А. И. Шеко // Оценка и управление природными рисками: материалы Общерос. конференции «Риск – 2000». – М.: Анкил, 2000. – С. 211–213.

73. A framework for landslide risk assessment and management / R. Fell, K. K. S. Ho, S. Lacasse, E. Leroi // Proc. Int. conf. on Landslide risk management, Vancouver, Canada. – Published by: A. A. Balkema Publishers, a member of Taylor & Francis Group plc, 2005. – P. 3–25.

74. Alonso E. E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays / E. E. Alonso // Geotechnique. – 1976. – № 26 (3). – P. 453–472.

75. Australian Geomechanics Society. Landslide risk management concepts and guidelines / Australian Geomechanics Society, Sub-Committee on Landslide Risk Management. – Australian Geomechanics, 2000. – Vol. 35. – P. 49–92.

76. Australian Geomechanics Society. Practice note guidelines for landslide risk management 2007. – Australian Geomechanics. – 2007. – Vol. 42. – № 1. – P. 63–114.

77. Baecher G. B. Reliability and statistics in geotechnical engineering / G. B. Baecher and J. T. Christian. – John Wiley and Sons, Chichester. – New York, 2003.

78. Benjamin J. R. Probability, statistics and decision making for civil engineers / J. R. Benjamin and C. A. Cornell. – McGraw Hill, London, New York, 1970.

79. Boggett A. D. South Shore Cliffs, Whitehaven – geomorphological survey and emergency cliff stabilization works / A. D. Boggett, N. J. Mapplebeck, R. J. Cullen // Quarterly Journal of engineering Geology and Hydrogeology. – London, 2000. – Pp. 213–226.

80. Bromhead E. N. The stability of slopes. 2nd edition / E. N. Bromhead. – Taylor & Francis Group London and New York, 2005. – 242 p.

81. Cheng Y. M. Slope stability analysis and stabilization. New methods and insight / Y. M. Cheng and C. K. Lau. – Routledge Taylor & Francis Group London and New York, 2008. – 242 c.

82. Chowdhury R. Geotechnical slope analysis / R. Chowdhury, Ph. Flentje, G. Bhattacharya. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2010. – 738 p.

83. Chowdhury R. Role of slope reliability analysis in landslide risk management / R. Chowdhury, P. Flentje. – Bull. Eng. Geol. Env. (2003) 62. – Pp. 41 – 46.

84. Christian J. T. Point-estimate method as numerical quadrature / J. T. Christian and G. B. Baecher. – J. Geotech. Geoenv. Eng., ASCE. – 1999. – № 125 (9). – Pp. 779–786.

85. Cornell C. A. A probability-based structural code / C. A. Cornell. – Journal of the American Concrete Institute. – 1969. – № 66 (12). – Pp. 974–985.

86. Ditlevson O. Structural reliability and the invariance problem / O. Ditlevson.. – Technical report 22. – Solid mechanics division. – University of Waterloo. – Canada, 1973.

87. Fan K. An interstice force function for limit equilibrium slope stability analysis / K. Fan, D. G. Fredlund, G. W. Wilson // Canadian Geotechnical Journal. – 1986. – Vol. 23. – P. 287–296.

88. Fenton Gordon A. Risk assessment in geotechnical engineering / Gordon A. Fenton, D. V. Griffiths – John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 462 p.

89. Fredlund D. G. Comparison of slope stability methods of analysis / D. G. Fredlund, J. Krahn // Canadian Geotechnical Journal. – 1977. – Vol. 14. – № 3. – P. 429–439.

90. Geo-Slope International Ltd. 1996. Slope/W for slope stability analysis, user's guide, version 3. Geo-Slope International Ltd., Calgary, Alta.

91. Harr M. E. Reliability based design in civil engineering / M. E. Harr. – McGraw Hill, London, New York, 1987.

92. Hasofer A. M. Exact and invariant second-moment code format / A. M. Hasofer and N. C. Lind. – Journal of the engineering mechanics division ASCE. – 1974. – № 100. – Pp. 111–121.

93. Husein Malkawi A. I. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability / A. I. Malkawi, W. F. Hassan, F. A. Abdulla // Structural Safety. – 2000. – № 22. – P. 161–187.

94. Krahn J. The 2001 R. M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses / J. Krahn // Canadian Geotechnical Journal. – 2003. – 40. – P. 643–660.

95. Landslide Hazard Assessment at «Sakhalin-2» Main Pipeline Project / S. I. Matsiy, A. P. Sheglov, D. V. Pleshakov // ECI Conf. on Geohazards. – Lillehammer, Norway, 2006. – Paper 42. – [http:// services. bepress. com/eci/ geohazards/42](http://services.bepress.com/eci/geohazards/42).

96. Lee E. M. Landslide risk assessment / E. M. Lee and D. K. C. Jones. – Thomas Telford limited, 2004. – 454 p.

97. Leroi E. Risk assessment and management / E. Leroi, Ch. Bonnard, R. Fell, R. McInnes // Proc. Int. conf. on Landslide risk management, Vancouver, Canada. – Published by: A. A. Balkema Publishers, a member of Taylor & Francis Group plc, 2005. – P. 159–198.

98. Liang R. Y. A reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dams / R. Y. Liang, O. K. Nusier, A. H. Malkawi // Engineering Geology, 1999. – № 54. – Pp. 271–285.

99. Li K. S. Probabilistic design of slopes / K. S. Li, P. Lumb // Canadian Geotechnical Journal. – 1987. – № 24. – P. 520–535.

100. Lumb P. The variability of natural soils / P. Lumb // Canadian Geotechnical Journal. – 1966. – № 3 (2). – P. 74–97.

101. Matsiy S. I. Landslides on the roads to Sochi / Matsiy S. I., Bezuglova E. V. // Environmental geosciences and engineering survey for territory protection and population safety. International conference EngeoPro. – 2011. – Abstracts to Proceedings. – Moscow, 2011. – Pp. 100–101.

102. Morgenstern N. R. The analysis of the stability of general slip surfaces // N. R. Morgenstern, V. E. Price // Geotechnique. – 1965. – 15. – № 1. – P. 79–93.

103. Rosenblueth E. Point estimates for probability moments / E. Rosenblueth. – Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 1975. – № 10. – Pp. 3812–3814.

104. Rosenblueth E. Two-point estimates in probabilities / E. Rosenblueth. – Appl. Math. Modelling. – 1981. – № 5. – Pp. 329–335.

105. Slope stability and stabilization methods. Second edition / Lee W. Abramson, Thomas S. Lee, Sunil Sharma, Glenn M. Boyce. – A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, INC., 2002. – 712 p.

106. Sunuwar L. A preliminary landslide risk assessment of road network in mountainous region of Nepal / L. Sunuwar, M. B. Karkee, D. Shrestha // Proc. Int. conf. on Landslide risk management, Vancouver, Canada. – Published by: A. A. Balkema Publishers, a member of Taylor & Francis Group plc, 2005. – P. 411–421.

107. Wong H. N. Landslide risk assessment for individual facilities / H. N. Wong // Proc. Int. conf. on Landslide risk management, Vancouver, Canada. – Published by: A. A. Balkema Publishers, a member of Taylor & Francis Group plc, 2005. – P. 237–299.

108. [http://www. adc-tehnika. ru/content/iziskania/ 4001/ Informacionnyj-byulleten-O-sostoyanii-nedr-na-territorii-RF-v-2005-godu-CHast-2/](http://www.adc-tehnika.ru/content/iziskania/4001/Informacionnyj-byulleten-O-sostoyanii-nedr-na-territorii-RF-v-2005-godu-CHast-2/).

109. [http://geo. opensochi. org/node/296](http://geo.opensochi.org/node/296).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ	4
1.1 Транспортные сооружения на горных территориях.....	4
1.2 Проблемы инженерной защиты автомобильных дорог от оползневых воздействий.....	11
1.3 Оценка риска проявления оползневых процессов на транспортных сооружениях.....	18
1.4 Вероятностные методы в оценке риска	25
ГЛАВА 2. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ	36
2.1 Неопределенности моделирования оползневых процессов	36
2.2 Вероятностный анализ и оценка неопределенности в расчете устойчивости однородного откоса	42
2.3 Вероятностный анализ и оценка неопределенности в расчете устойчивости неоднородного откоса	57
2.4 Обоснование применения вероятностных расчетов в практике строительства	67
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА НА ТЕРРИТОРИЯХ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ	73
3.1 Зонирование территории по системе балльных характеристик	73
3.2 Оценка показателей риска с применением табличных форм	77
3.3 Диагностика оползневых участков автомобильных дорог г. Сочи.....	83
3.4 Оценка оползневого риска по методике наименьших потерь	94
3.5 Методика комплексного инженерно-технического управления оползневым риском транспортных сооружений с учетом стадии проектирования	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108

Научное издание

Маций Сергей Иосифович
Безуглова Екатерина Вячеславовна
Плешаков Дмитрий Вадимович

ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Монография

В авторской редакции

Компьютерная верстка – А. А. Багинская
Дизайн обложки – Н. П. Лиханская

Подписано в печать 20.05.2015. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. – 7. Уч.-изд. л. – 5,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 330.

Типография Кубанского государственного аграрного университета.
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13