

На правах рукописи



ФОМЕНКО ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ

Специальность 25.00.08 — инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого–минералогических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе (МГРИ–РГГРУ) на кафедре инженерной геологии.

Научный консультант: **Пендин Вадим Владимирович,**
доктор геолого–минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой инженерной геологии
МГРИ–РГГРУ

Официальные оппоненты: **Экзарьян Владимир Нишанович,**
доктор геолого–минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой экологии и
природопользования, декан экологического
факультета МГРИ–РГГРУ

Сергеев Сергей Валентинович,
доктор геолого–минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой инженерной геологии и
гидрогеологии НИУ «БелГУ»

Козловский Сергей Викторович,
доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора Института геоэкологии
им. Е. М. Сергеева РАН

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрогеологии и инженерной геологии (ФГУП
«ВСЕГИНГЕО»)

Защита диссертации состоится 27 марта 2014 г. в 15 часов в ауд. 4-73 на заседании диссертационного совета Д 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете им. С. Орджоникидзе по адресу: г. Москва, ул. Миклухо–Маклая, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо–Маклая, д. 23, Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.121.01. Телефон: (495) 433-65-44 (добавочный 11-60, 12-05).

Автореферат разослан «20» февраля 2014 г.

**Ученый секретарь диссертационного
Совета Д 212.121.01, кандидат геолого–
минералогических наук, доцент**

О. Е. Вязкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Математизация научного знания стала приметой нашего времени. Новая методология научных исследований — вычислительный эксперимент — является общепризнанной. Изучение сложных процессов основано на построении и исследовании современными вычислительными средствами соответствующих математических моделей.

Значительный ущерб, приносимый оползнями, а также разнообразие, сложность и многофакторность оползневых процессов делают задачу его познания современными математическими методами архиважной. Применение того или иного расчетного метода для изучения оползневой опасности определяется поставленной задачей, особенностями изучаемого объекта и возможностями метода. Только владея комплексом методов, можно рассчитывать на успешное решение возникающих задач.

Каковы критерии истинности и предпочтительности тех или иных научно-методических подходов? Эти вопросы выходят далеко за рамки узкопрофессиональных знаний, они находятся в сфере методологии — определении путей и способов обеспечения эффективности знания в решении актуальных научных и практических задач [В. Е. Хайн, А. Г. Рябухин, А. А. Неймарк, 2008 г.].

Настоящая диссертационная работа посвящена решению важной научной проблемы: разработке методологии оценки и прогноза оползневой опасности на основе математических методов.

Таким образом, *актуальность* обусловлена необходимостью совершенствования научно-методологических способов оценки и прогноза региональной и локальной оползневой опасности с учетом применения современных методов количественной оценки, входящих в мировую практику исследований оползневых процессов.

Работа выполнялась автором с 2011 по 2013 год на кафедре инженерной геологии МГРИ-РГГРУ им. Серго Орджоникидзе. Научным консультантом является доктор геолого-минералогических наук, профессор В. В. Пендин.

Цель работы:

Разработка комплексного подхода к оценке и прогнозу оползневой опасности на основе методов математического моделирования.

Основные задачи исследования:

1. Современное определение понятийной базы теоретического оползневедения.
2. Сбор, анализ зарубежного и отечественного опыта прогноза региональной и локальной оползневой опасности на современном этапе развития науки. Модификация классификации методов прогнозирования оползневых процессов.
3. Разработка методики комплексного регионального прогноза оползневой опасности, основанной на сочетании стохастического и детерминистского подходов.
4. Разработка актуальной, соответствующей современным требованиям, классификации методов расчета локальной устойчивости склонов.
5. Обзор существующих трехмерных методов расчета устойчивости склонов. Выполнение трехмерных и двумерных расчетов устойчивости методами предельного равновесия, сравнение полученных результатов, выявление преимуществ и недостатков решения при пространственной постановке задачи.
6. Анализ современных перспективных направлений в расчетах устойчивости склонов, с целью увеличения достоверности прогнозов локальной оползневой опасности.
7. Апробация методики комплексной оценки и прогноза при математическом моделировании устойчивости склонов.

Научная и методическая новизна:

1. Сформулированы теоретические основы прогноза региональной и локальной оползневой опасности.

2. В развитие существующих методик оценки региональной оползневой опасности, обосновано применение комплексного подхода, базирующегося на совместном анализе моделей основанных: на факторах восприимчивости территории к оползневому процессу; геолого–гидрогеологическом (на основе индекса стабильности) и морфометрическом критериях. Показано что:

- Анализ модели восприимчивости территории к оползневому процессу позволяет оценить **значимость выявленных факторов оползнеобразования**, общую оползневую опасность территории, без привязки к конкретному типу оползневого процесса, его механизму и объему проявления.
- Модель на основе индекса стабильности позволяет оценить опасность возникновения оползней, формирующихся в элювиально–делювиальных отложениях, **на максимальную глубину проявления процесса**.
- Морфометрическая модель дает возможность прогноза **максимальной оползневой опасности** для случаев, когда генезис отложений тесно связан с формами рельефа.

3. Предложена общая классификация методов расчета устойчивости склонов, основанная на механико–математическом подходе.

4. В оценке устойчивости склонов обосновано применение трехмерного анализа, базирующегося на методах предельного равновесия.

5. Рассмотрены перспективные направления расчетов устойчивости склонов. Установлено что:

- Различие между результатами расчета внутри группы методов предельного равновесия по круглоцилиндрической и оптимизированной поверхностям скольжения более значительны, чем между результатами расчета по оптимизированной поверхности скольжения и моделированием по методу конечных элементов.
- Использование в расчетах устойчивости склонов вероятностного анализа, позволяет выполнить оценку оползневой опасности (в терминах вероятности активизации оползневого процесса).
- Использование в расчетах устойчивости склонов анализа чувствительности позволяет решить задачу зависимости коэффициента устойчивости от закономерного изменения тех или иных параметров.
- При моделировании устойчивости склонов, сложенных анизотропными грунтами, целесообразно рассматривать два типа анизотропии. Первый тип анизотропии связан с природной (литогенетической) анизотропией свойств грунтов, слагающих склон. Второй тип анизотропии обусловлен образованием анизотропных свойств при формировании зон скольжения в виде горизонта максимальных сдвиговых деформаций.

6. Приведены примеры комплексного анализа влияния на активизацию оползневого процесса факторов оползнеобразования (подземных вод и сейсмического воздействия).

Прикладная значимость:

Комплексное использование современных методик расчетов позволяет значительно повысить достоверность прогнозов региональной и локальной оползневой опасности, что

подтверждается 6 актами о внедрении на объектах: магистральный газопровод «КС Изобильный — Невинномысск»; нефтепродуктопровод «Комсомольский НПЗ — порт Де-Кастри»; трубопроводная система «Сахалин II»; спортивно-туристический комплекс «Горная Карусель»; ТПУ «Тестовский»; при расчете устойчивости оползнеопасных склонов плотин «Бабана», «Баллутия» и «Кардаха» в САР и т.д.

Основные теоретические и методологические положения работы могут быть использованы в учебных и научно-исследовательских целях.

Методология и методы исследования:

Для оценки и прогноза оползневой опасности автором изучен и обобщен опыт отечественного и зарубежного математического моделирования. В диссертационной работе использован комплексный подход, учитывающий различные факторы развития оползневых процессов и различные подходы к построению математических моделей.

Расчеты оценки и прогноза региональной оползневой опасности производились с помощью современных программных ГИС-пакетов — Global Mapper и ArcGis, а так же специализированных приложений — SINMAP и SMORPH. Математическое моделирование проводилось посредством расчетов устойчивости склонов с использованием программных комплексов GeoStudio 2007 (GEO-SLOPE International, Ltd.), Slide 6.0 и Phaze2 (Rockscience inc.), SVSlope (SoilVision Systems, Ltd), FLAC/Slope (ITASCA), PLAXIS (PLAXIS BV), LimitState:GEO (LimitState, Ltd) и других.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Комплексная методика регионального прогноза оползневой опасности, основанная на сочетании стохастического и детерминистского подходов, обладает повышенной надежностью получаемых результатов. При проведении стохастического анализа, решаются задачи по определению и оценке значимости комплекса региональных факторов оползнеобразования. На основе детерминистского анализа, решаются задачи количественного прогноза влияния отдельных факторов.

2. Иерархическая структура методов расчета устойчивости склонов основанная на механико-математическом подходе, является выдержанной с позиций формальной логики классификацией и образует соподчиненную систему непересекающихся таксонов.

3. При переходе от двухмерной модели оползневого процесса к трехмерной, следует учитывать следующие аспекты:

Во-первых, меняется концепция описания формы поверхности скольжения. В трехмерной постановке задачи, зона скольжения моделируется (при допущении об однородности свойств грунтов) в виде сегмента эллипсоидальной поверхности. Круглоцилиндрическая поверхность скольжения при расчете в двухмерной постановке не является ее аналогом.

Во-вторых, при трехмерном моделировании устойчивости склонов методами предельного равновесия неопределенность сил, действующих на границах отсеков, распространяется не в одном, а двух направлениях. Таким образом, получаемые различия между результатами 2D и 3D расчетов частично определяются зависимостью между этими силами.

4. Решение задачи по определению формы критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом устойчивости методами предельного равновесия не может считаться завершенным без выполнения процедуры ее оптимизации.

5. Совместное использование вероятностного анализа и анализа чувствительности позволяет реализовать прогноз оползневой опасности. Вероятностный анализ позволяет выполнить оценку оползневой опасности (в терминах вероятности развития). Анализ чувствительности дает возможность прогнозировать изменение коэффициента устойчивости

склона в зависимости от закономерного изменения одного или нескольких факторов оползнеобразования.

6. Моделирование устойчивости склонов, сложенных анизотропными грунтами, должно базироваться на последовательном изучении анизотропии двух типов:

- 1-й тип — анизотропия, связанная с природной неоднородностью, позволяет оценить мгновенную устойчивость склона;
- 2-й тип — анизотропия, возникшая при формировании зоны скольжения (в виде горизонта максимальных сдвиговых деформаций), дает возможность оценить длительную устойчивость склона.

Фактический материал:

В основе работы лежит опыт расчетов и данные, полученные автором при оценке оползневой опасности по трассе трубопроводов на проектах: «Сахалин-1» (2004 г.), «Сахалин-2» (2004–2007 г.), «Изобильный — Невинномысск» (2012 г.), «Южный поток» (2012–2013 г.), на объектах строительства «Сочи–2014» (2010–2012 г.). Центральной кольцевой автодороги (ЦКАД) (2008 г.), при проектировании объектов на о. Русский (к саммиту АТЭС 2012) (2008 г.) и др.

Достоверность научных положений и выводов обосновывается качеством первичной инженерно-геологической информации, применением комплекса современных методов математического моделирования, сопоставимостью полученных результатов и соответствием их физическим представлениям.

Личный вклад автора заключается:

— в комплексном анализе существующих методов прогноза региональной и локальной оползневой опасности, на основе которого были разработаны соответствующие классификации;

— в разработке, совместно с Зыонг Мань Хунгом, комплексного подхода (при региональном прогнозе оползневой опасности), основанного на совместном использовании стохастического и детерминистического методов анализа;

— в комплексном использовании современных подходов при моделировании локальной оползневой опасности;

— в разработке оригинальной методики, совместно с О. В. Зеркалем, учета влияния анизотропии грунтов на устойчивость склонов.

Приведенные практические примеры основаны на работах выполненных автором в период с 2001 по 2013 гг.

Научная апробация и публикации:

Основные результаты настоящей работы были представлены на международных и общероссийских конференциях: «Сергеевские чтения» 2001 г. (Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Фоменко И. К., 2001); «Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем» 2007 г. (Спиридонов Д. А., Фоменко И. К., 2007); «Многообразие современных геологических процессов и их инженерно-геологическая оценка» 2009 г. (Зеркаль О. В., Фоменко И. К., 2009); «ГЕОРИСК–2009» (Галкин В. А., Фоменко И. К., 2009); «Геотехнические проблемы мегаполисов» 2010 г. (Фоменко И. К., Иванов А. И., Волков С. Н., 2010); «EngeoPro-2011» (Fomenko I. K., Zerkal O. V., 2011), (Zerkal O. V., Kalinin E. V., Panasiyan L. L., Fomenko I. K., 2011); «Сергеевские чтения» 2010 г. (Фоменко И. К., Сироткина О. Н., Самаркин-Джарский К. Г., 2010); Proceeding of the technical meeting TC207 – «Workshop on soil-structure Interaction and Retaining Walls» 2011 г. (Fomenko I. K., Zerkal O. V., 2011); «Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование. Синтез знаний в естественных науках» 2011 г. (Зеркаль О. В., Фоменко И. К., 2011); VII Общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в

строительстве в Российской Федерации» 2011 г. (Фоменко И. К., Сироткина О. Н., 2011) и других.

По теме диссертации опубликовано более 40 научных работ, в том числе 10 работ в реферируемых научных изданиях, одно учебное пособие и одна монография.

Автор являлся научным консультантом диссертационной работы Зыонг Мань Хунга «Научно–методические основы регионального прогноза оползневой опасности (на примере района Ха Лонг – Кам Фа на северо–востоке Вьетнама)».

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и одного приложения. Она содержит 320 страниц текста, сопровождается 48 таблицами, 149 рисунками и списком литературы из 293 наименований.

Благодарности:

Автор искренне благодарен научному консультанту проф., д.г.–м.н. В. В. Пендину, за внимание к настоящей работе с первых дней ее написания, ценные советы и обсуждения, носившие творческий характер. Глубоко и искренне признателен своим первым научным наставникам и учителям проф., д.г.–м.н. Э. В. Калинин и к.г.–м.н. Л. Л. Панасьян за продолжительное научное общение, способствовавшее формированию научного мировоззрения.

Особенно продуктивными оказались контакты и обмен мнениями с профессорами кафедры инженерной геологии МГРИ–РГГРУ.

Практическая часть работы основана на проведенных в разные годы автором полевых исследованиях совместно с коллегами из компаний ООО «Старстрой», «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.», «Scott Wilson Ltd», ЗАО ПО «Совинтервод», ОАО «РОССТРОЙИЗЫСКАНИЯ», ООО «Инжзащита» и др. За оказанное содействие, автор выражает им свою признательность.

Обилие собранного фактического материала было бы невозможно без участия К.Г. Самаркина. Особо следует отметить плодотворное научное сотрудничество с к.г.-м.н. О.В. Зеркалем, д.ф.-м.н. А.И. Ивановым, к.г.-м.н. Ю.А. Сысоевым, М.Х. Зыонгом и В.Ю. Ионовым. Автор благодарен к.г.-м.н. О.Н. Сироткиной, за замечания и соображения, высказанные при обсуждении работы на всех этапах ее написания. Неоценимую помощь в оформлении диссертационной работы оказали Акимов А.М. и Акимова Е.Б.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены защищаемые положения, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень личного участия автора в получении основных результатов, апробация работы и ее структура.

ГЛАВА 1 Основы теоретического оползневедения

Без всестороннего понимания объекта и предмета исследований, а также причин развития оползней прогноз оползневой опасности невозможен. Это обстоятельство подсказывает необходимость выделения специального научного направления – оползневедения [Емельянова Е. П., 1972].

Под основами теоретического оползневедения, в рамках данной работы, понимается определение следующих понятий:

- Объекта и предмета исследований
- Факторов, определяющих развитие оползневого процесса

- Механизмов оползневой оползневой процесса
- Динамики развития оползневой процесса
- Классификации оползневых процессов
- Прогноза оползневой опасности

Объектом теоретического оползневедения является оползневой процесс или оползень. Под термином оползень часто понимают как процесс, так и геологическое тело [Бондарик Г. К., Пендин В. В., Ярл Л. А., 2007].

Оползневой процесс — потеря склоном (откосом) устойчивости. Он представляет собой перемещение массы горных пород, слагающей этот склон, по другой части склона, остающейся неподвижной, под действием силы тяжести, с сохранением между обеими частями материальной связи.

Оползшую массу называют оползневой телом, а поверхность, по которой происходит оползание — поверхностью скольжения или поверхностью смещения [Петров Н. Ф., 2008].

Оползневой процесс можно определить как последовательность явлений или состояний оползневой тела, а оползневое явление — как фиксированное состояние оползневой тела. Под «состоянием» понимают структуру и свойства объекта в произвольный момент времени. Тогда явление и есть структура и свойства объекта в данный момент, а процесс — изменение структуры и свойств объекта [Петров Н. Ф., 2008].

Предметом теоретического оползневедения является оползневая опасность. Под оползневой опасностью понимается вероятность нанесения ущерба за счет активизации оползневых процессов. Учитывая тот факт, что инженерно-геологическое изучение оползней связано с хозяйственным освоением территории, под оползневой опасностью с точки зрения инженерной геологии можно понимать просто вероятность активизации оползневых процессов.

Под фактором оползневой процесса понимается любое обстоятельство, которое влияет на устойчивость склонов и, следовательно, может способствовать возникновению или повторному смещению оползня.

Считается очевидным, что в задачах о механическом равновесии откоса/склона основным силовым фактором, действующим в геологической среде, является собственный вес этой среды. Всякое оползневое смещение масс горных пород происходит под воздействием силы тяжести и, возможно, только тогда, когда сдвигающая составляющая силы тяжести превысит прочность пород в целом, либо по поверхностям или зонам ослабления.

Наиболее полной, по мнению автора, является классификация по виду влияния фактора на коэффициент устойчивости и на режим устойчивости склона, основанная на подходах Е. П. Емельяновой [Емельянова Е. П., 1971] и И. П. Иванова [Иванов И. П., 2001]. Согласно ей факторы оползнеобразования можно разделить на две группы:

- Группа факторов, объединяющая условия оползнеобразования (определяющая среднюю величину коэффициента устойчивости)
- Группа факторов, объединяющая процессы, изменяющие величину коэффициента устойчивости. Последняя может быть разделена на следующие подгруппы:
 - Подгруппа факторов, изменяющих состав, свойства, состояние и строение горных пород, влияющих на их прочность и деформируемость.

- Подгруппа факторов, изменяющих напряженное состояние массива горных пород (склона или откоса).

Под механизмом оползневого процесса вслед за Е. П. Емельяновой [Емельянова Е. П., 1972] будем понимать последовательность или совокупность промежуточных состояний и элементарных процессов взаимодействия отдельных частей оползня и неподвижного ложа, посредством которых оползень переходит из одного состояния в другое, и тем самым осуществляется протекание оползневого процесса.

В. В. Кюнтцель [Кюнтцель В. В., 1980] по механизму оползневого процесса выделяет шесть типов оползней: скольжения, выдавливания, выплывания, течения, проседания, разжижения. Каждый из этих типов может быть разделен на классы по составу, возрасту и генезису пород основных деформирующихся горизонтов (ОДГ), с которыми связаны оползни. Под ОДГ понимается такое геологическое тело, деформации которого приводят к нарушению естественного залегания и деформациям всего комплекса геологических тел в пределах оползневой зоны. Деформационное поведение пород ОДГ во многом обуславливает особенности механизма оползневого процесса.

Динамика оползневых процессов характеризуется определенными закономерностями их развития во времени. Одни из них образуются внезапно, имеют катастрофический характер, другие — медленно. При анализе каждого конкретного оползня можно восстановить его историю, эволюцию, состоящую из этапов, стадий и фаз.

В динамике формирования каждого оползня различаются три этапа: 1) этап подготовки — постепенного уменьшения устойчивости масс горных пород; 2) этап фактического образования — сравнительно быстрой или резкой потери устойчивости, 3) этап существования — стабилизации, восстановления устойчивости.

Существует большое количество классификаций оползневых процессов.

Классификация — один из фундаментальных процессов в науке. Под термином «классификация» обычно понимается распределение предметов или явлений по заданным классам согласно наиболее существенным признакам.

Различие в существующих классификациях оползневых процессов в первую очередь связано с поставленными целями и используемым базисом.

В соответствии с поставленными целями, классификации оползневых процессов традиционно делятся на три группы: общие; региональные и частные.

В качестве главного базиса обычно используют:

- генетический тип оползневого процесса;
- возраст оползневых явлений;
- морфологию оползневых явлений.

Под прогнозом оползневой опасности в рамках данной работы понимается последовательный анализ оценки оползневой опасности и прогноза устойчивости склона. При этом под оценкой оползневой опасности будем понимать вероятность развития оползневого процесса в зависимости от неоднородности и статистической изменчивости одного или нескольких факторов оползнеобразования. А под прогнозом устойчивости склона — зависимость коэффициента устойчивости склона от закономерного изменения тех или иных параметров, влияющих на устойчивость склона. Таким образом, прогноз оползневой опасности — это оценка оползневой опасности (в терминах вероятности развития оползневого процесса) с учетом закономерного изменения факторов оползнеобразования.

На основе анализа отечественного и зарубежного опыта автором модифицирована классификация методов прогнозирования оползневых процессов, разработанная К. А. Гулакяном, В. В. Кюнтцелем и Г. П. Постоевым (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов прогноза оползневых процессов (авторский вариант)

ГЛАВА 2 Региональное прогнозирование оползневых процессов

Региональный прогноз оползневых процессов предполагает определение возможности возникновения и интенсивности их развития, а также взаимодействие с сооружениями в пределах значительного района. При региональных прогнозах обычно не представляется возможным указать конкретные типы, места и иные показатели оползневых процессов, дается их фоновая характеристика с общими закономерностями развития.

Региональное прогнозирование оползневых процессов может быть как качественным, так и количественным, и может строиться как на вероятностном, так и на детерминированном подходах. В основе региональных прогнозов лежит специальное районирование территории, характеризующее распространение оползней или условия их проявления.

В работе дано описание основных методов прогноза региональной оползневой опасности.

Перспективным направлением является использование технологий, основанных на геоинформационных системах (ГИС), позволяющих максимально автоматизировать процесс регионального прогноза оползневой опасности.

Под комплексным прогнозом региональной оползневой опасности в рамках данной работы понимается его соответствие трем критериям:

- Комплексный анализ региональных инженерно-геологических условий.
- Определение и оценка вклада региональных факторов оползнеобразования на интенсивность и экстенсивность оползневых процессов.
- Использование при моделировании региональной оползневой опасности сочетания стохастического и детерминистского подходов.

На основе стохастического анализа, решаются задачи по определению и оценке значимости комплекса региональных факторов оползнеобразования. На основе детерминистского анализа решаются задачи количественного прогноза влияния отдельных факторов.

В развитие существующих методик оценки региональной оползневой опасности, на примере региона Ха Лонг – Кам Фа (Вьетнам), совместно с Зыонг Мань Хунгом, были использованы современные подходы, базирующиеся на ГИС.

Прогнозирование выполнено при помощи *трех методов*:

- восприимчивости территории к оползневому процессу;
- по морфометрическим критериям рельефа (метод SMORPH);
- по индексу стабильности склонов (метод SINMAP).

Результатом регионального прогноза является районирование территории по оползневой опасности. Итоговые карты районирования, полученные различными методами, приведены на рис. 2 – 4.

Дополнительно методом SMORPH был выполнен региональный прогноз оползневой опасности с учетом сейсмического воздействия (8 баллов). Действие землетрясения моделировалось методом фиктивного откоса. Итоговая карта районирования приведена на рис. 5.

Сравнение результатов прогноза оползневой опасности, полученных методом SMORPH, показало, что в результате прогнозируемого землетрясения в 8 баллов по шкале MSK 64 площадь оползнеопасных участков увеличивается более чем в пять раз, при этом площадь крайне нестабильных участков увеличивается почти в три раза.

По результатам, полученным в процессе исследований, сделаны следующие выводы:

1. Использование метода восприимчивости территории к оползневому процессу позволяет оценить общую оползневую опасность территории без привязки к конкретному типу оползневого процесса, его механизму и объему проявления.

2. Метод SINMAP дает хорошие результаты при оценке опасности возникновения оползней (на максимальную мощность проявления процесса), формирующихся в элювиально–делювиальных отложениях и в латеритовой зоне коры выветривания,

3. Метод SMORPH делает возможным прогноз максимальной опасности от оползней неглубокого заложения, формирующихся в элювиально-делювиальных отложениях (для случаев, когда генезис отложений тесно связан с формами рельефа). Данный метод требует калибровки для установления связи морфометрических

критериев с фактическими данными по проявлению оползневых деформаций на изучаемой территории.

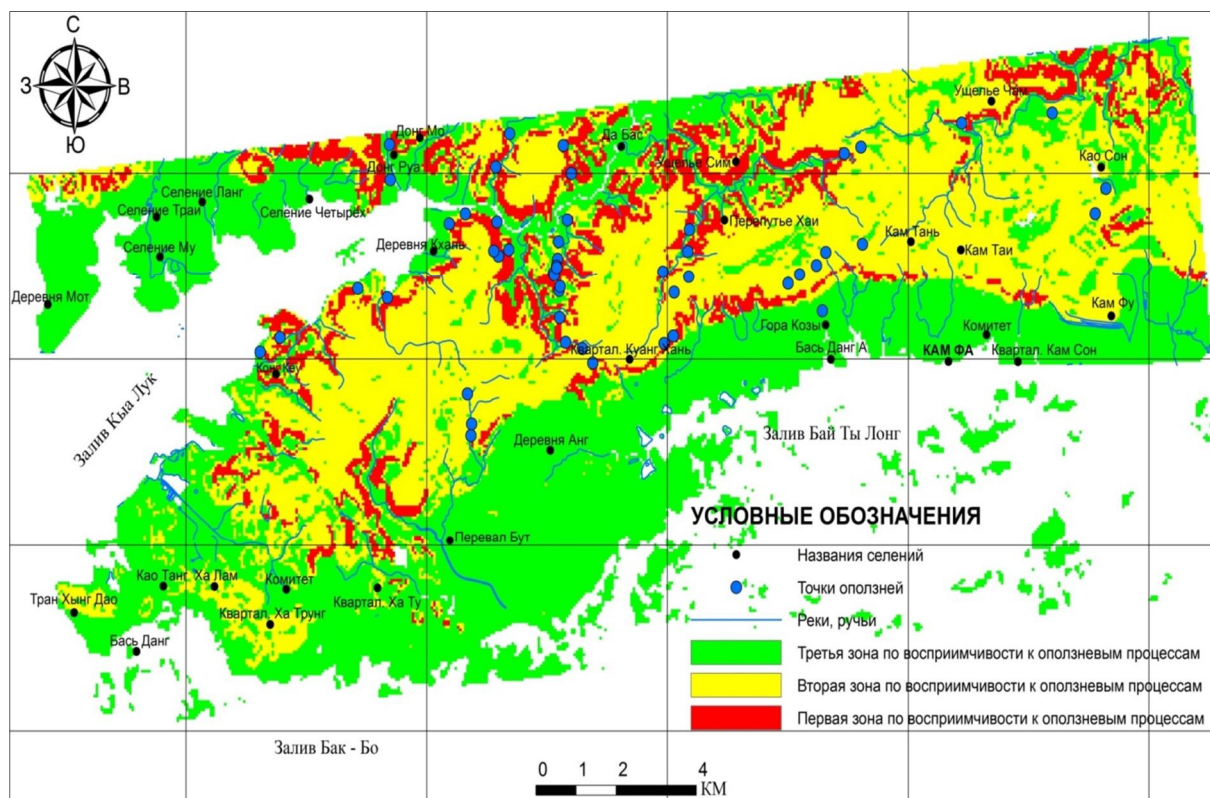


Рис. 2. Карта районирования региона Ха Лонг – Кам Фа по степени восприимчивости территории к оползневому процессу.

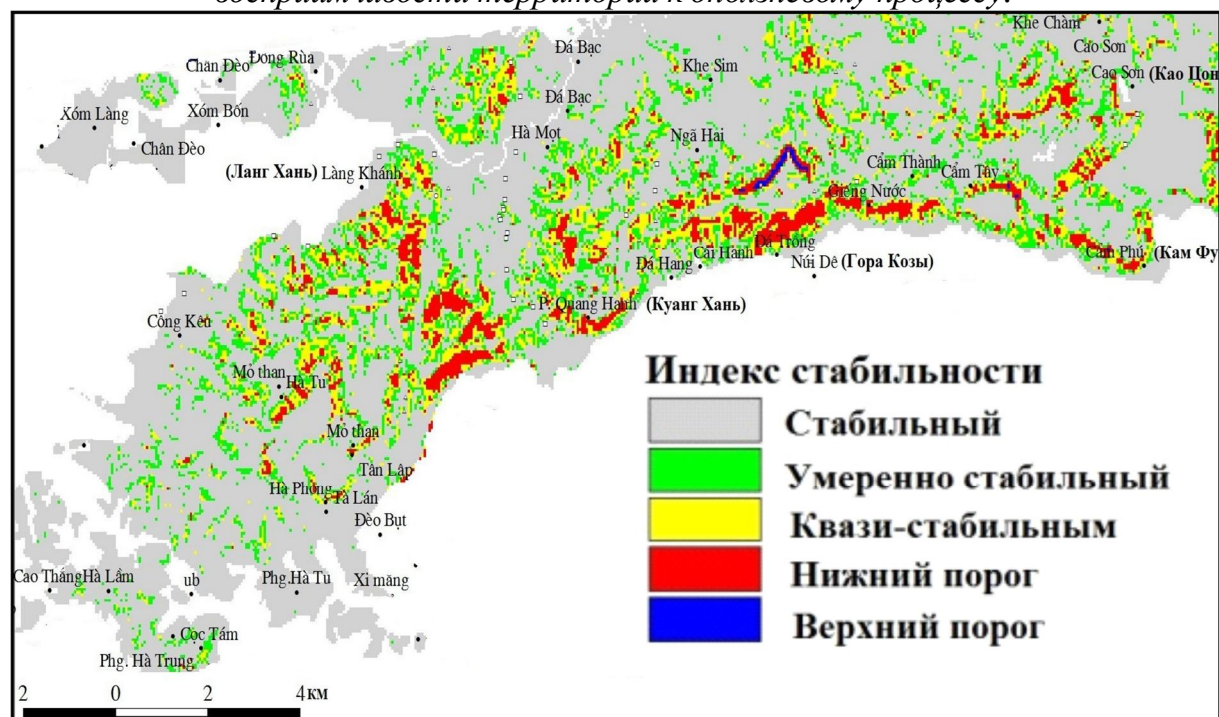


Рис. 3. Карта районирования региона Ха Лонг – Кам Фа по индексу стабильности склонов (метод SINMAP)

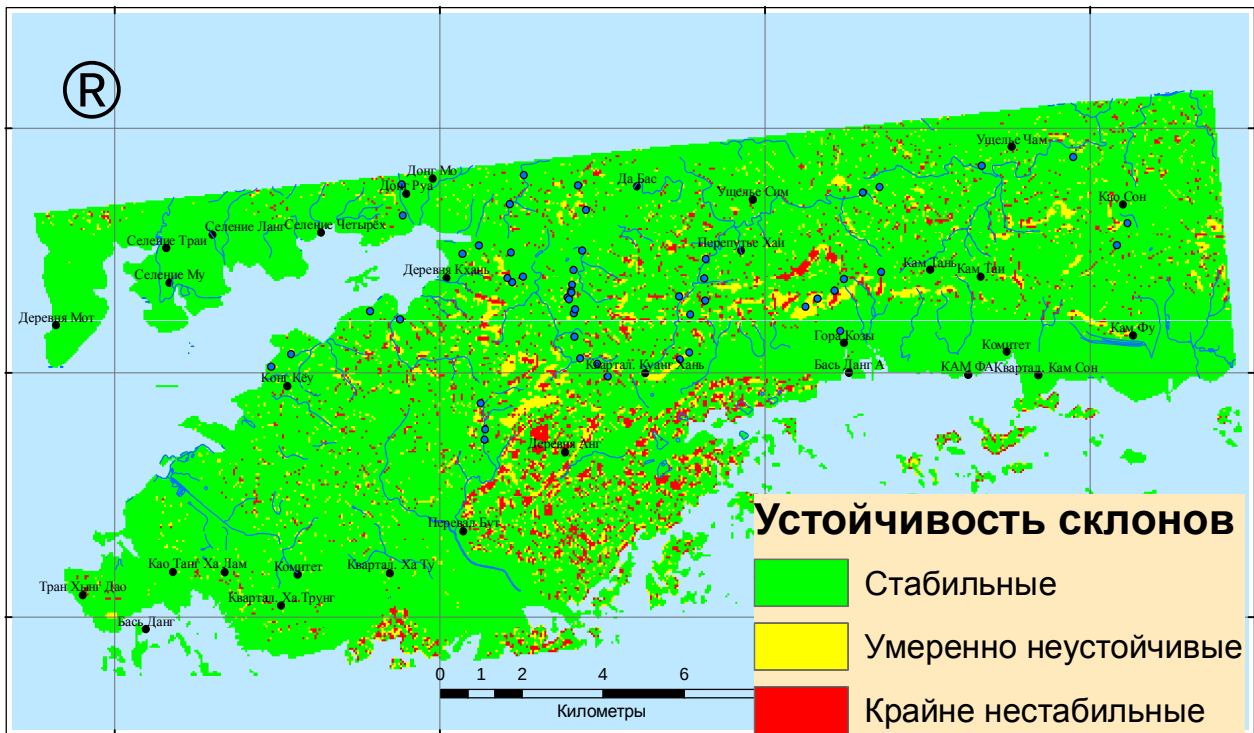


Рис. 4. Карта районирования региона Ха Лонг – Кам Фа по морфометрическим критериям рельефа (метод SMORPH)

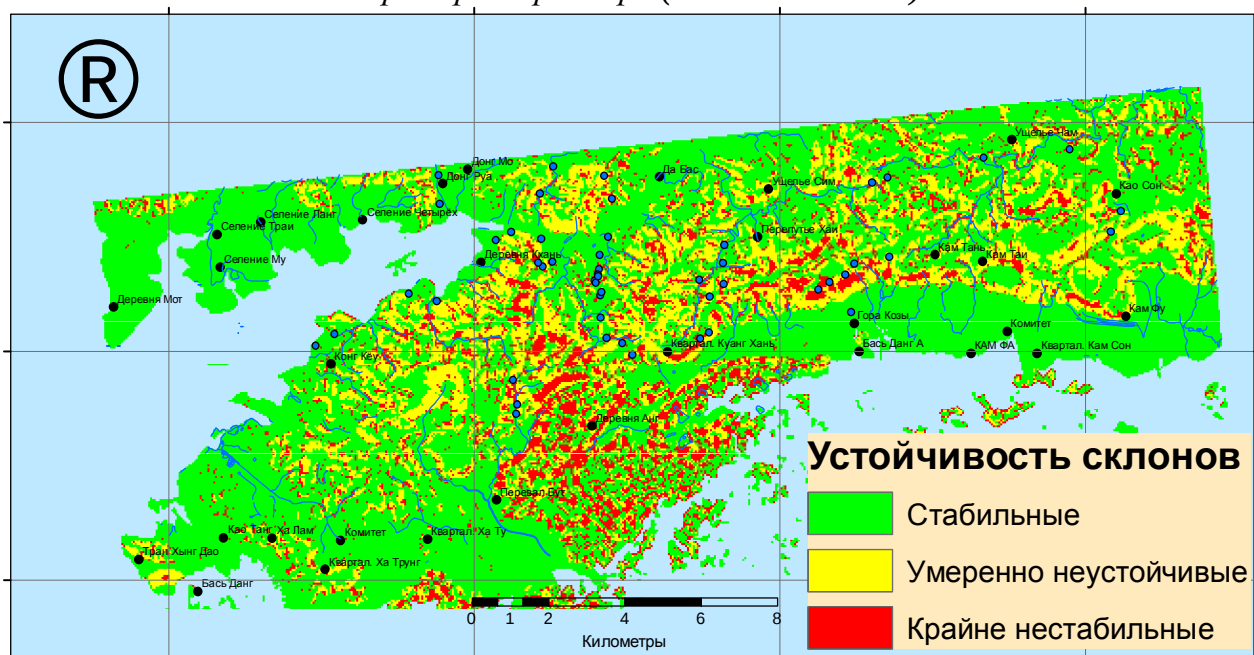


Рис. 5. Карта районирования региона Ха Лонг – Кам Фа по морфометрическим критериям рельефа (метод SMORPH) с учетом сейсмического воздействия в 8 баллов

4. Комплексная методика регионального прогноза оползневой опасности, основанная на сочетании стохастического и детерминистского подходов, обладает повышенной надежностью получаемых результатов. При проведении стохастического анализа, решаются задачи по определению и оценке значимости региональных факторов оползнеобразования. На основе

детерминистского анализа, решаются задачи количественного прогноза влияния отдельных факторов.

ГЛАВА 3 Локальное прогнозирование оползневых процессов

Локальные прогнозы относятся к определенным типам склоновых процессов, местам их проявления и во взаимодействии с конкретными сооружениями. Они глубже оценивают природу оползневого процесса и имеют наибольшее практическое значение.

Локальный прогноз устойчивости склонов осуществляется в два последовательных этапа [ПНИИИС., 1984]:

- прогноз изменений факторов оползнеобразования;
- анализ изменения состояния склона в зависимости от изменения факторов оползнеобразования.

При прогнозе оползневой опасности могут решаться два вида задач:

- расчеты устойчивости с целью оценки опасности развития оползневого процесса;
- оценка динамики состояния склона (в том числе оценка скорости смещения оползневых масс)

Локальное прогнозирование оползневых процессов может быть как качественным, так и количественным.

При изучении локальной устойчивости оползней широкое применение находят следующие три класса методов:

- методы аналогий;
- методы физического моделирования;
- методы математического моделирования.

Истории расчетов устойчивости склонов более 250 лет. Она делится на четыре периода:

- **Первый период:** с конца XVIII века до середины XIX века — время зарождения направления по расчету устойчивости склонов;
- **Второй период:** с конца XIX века до первой половины XX века (точнее до 40-х гг.) — этап становления методов расчета устойчивости склонов (УС), основанных на теории предельного равновесия;
- **Третий период:** с 1950 до начала 70-х гг. — время расцвета методов предельного равновесия в расчетах УС;
- **Четвертый период:** с 1970 по настоящее время — стадия интенсивного развития компьютерных технологий и значительных изменений в методологии расчетов устойчивости склонов.

ГЛАВА 4 Общая классификация методов расчета устойчивости склонов

В связи с интенсивным развитием расчетов устойчивости склонов, многие ранее используемые критерии для классификации в настоящий момент не могут быть применены ко всему множеству методов.

С целью создания системы непересекающихся таксонов, с учетом постоянно развивающихся и совершенствующихся методов прогнозирования локальной оползневой опасности, при классификации методов расчета устойчивости склонов целесообразно в

качестве основного признака-базиса использовать механико-математический подход. Методы расчета УС, в соответствии с предложенным базисом классификации условно можно разделить на несколько принципиальных классов: интуитивные; основанные на анализе предельного равновесия; основанные на предельном анализе; основанные на структурном анализе; методы вероятностного анализа; комбинированные методы, в том числе с использованием ГИС анализа (рис. 6).

В рамках разработанной классификации в работе приведено описание основных методов расчета локальной устойчивости склонов.

Наибольшее применение в практике расчетов устойчивости склонов нашли методы основанных на анализе предельного равновесия, методы дискретной оптимизации, метод конечных разностей и метод конечных элементов.

В работе, на основе тестовой модели склона, предложенной Д. Г. Френлундом и Дж. Краном [Fredlund D. G., and Krahn J., 1977] выполнено сравнение результатов расчета коэффициента устойчивости (K_y) наиболее востребованными в практике методами. В сравнительной табл. 1 и на рис.7 приведены результаты расчетов.

Анализ результатов показал, что разница значений K_y , полученных разными методами, не превышает 10%. Однако стоит отметить, что положение потенциальной поверхности скольжения, полученной методами предельного равновесия и конечных элементов (PLAXIS), отличается от положения поверхности скольжения, полученной методами конечных разностей и дискретной оптимизации. Это различие не имеет принципиального значения (что видно при анализе сдвиговых деформаций полученных в результате расчета в программе Phaze).

Комплексное применение современных методов, основанных на разных принципах, оценка их сходимости позволяют значительно повысить достоверность получаемых результатов.

Таблица 1. Сравнение результатов расчета УС различными методами

Расчетный метод Результат расчета	Группа методов предельного равновесия			Методы конечных элементов		Метод конечных разностей	Метод дискретной оптимизации
	Моргенштерн-Прайс (М-Р)	Бишопа	Янбу	Plaxis	Phaze	FLAC	LimitState: GEO
Коэффициент устойчивости	1,66	1,66	1,55	1,67	1,68	1.61	1.70
Различие в K_y (за эталон принят метод М-Р)	1	0,99	0,93	1,01	1,01	0,97	1,02

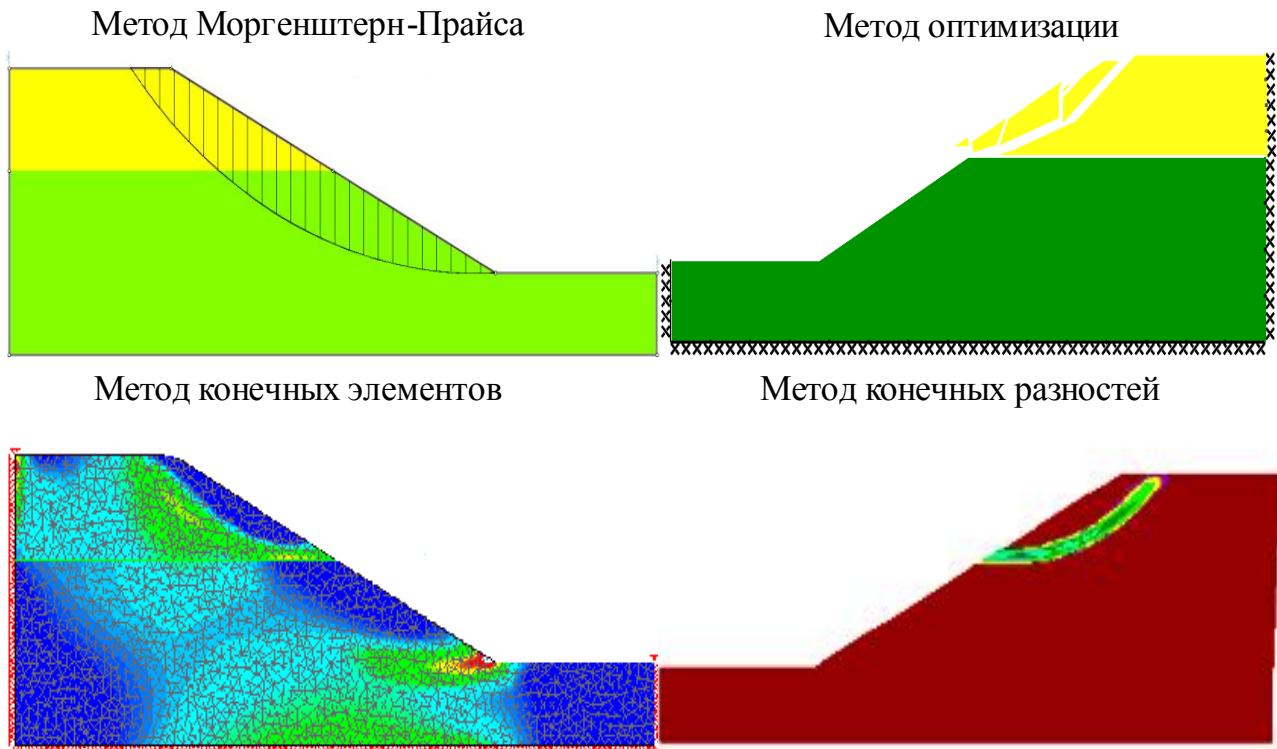


Рис. 7. Геомеханические схемы расчета УС различными методами

ГЛАВА 5 Трехмерное моделирование в расчете устойчивости склонов

Важным и активно развивающимся направлением в расчетах устойчивости склонов является трехмерный анализ. Моделирование устойчивости склонов в трехмерном варианте более правильно и перспективно в сравнении с двухмерными моделями, а связанные с объемным анализом преимущества очевидны. Укажем на некоторые из них [Фоменко И. К., Зеркаль О. В., 2011]:

Во-первых, в случае двухмерного варианта допускается большое количество условий, которые необходимо соблюдать при решении задачи. В их числе однородность геологического строения и топографическая однородность склона в направлении его простирания. На практике существует множество примеров, когда именно эти факторы оказывают существенное влияние на устойчивость склонов.

Во-вторых, важным преимуществом трехмерной оценки устойчивости склонов является тот факт, что полученный расчет позволит прогнозировать развитие оползневого процесса не только по глубине захвата, но и в плане. При этом может решаться задача по нахождению наименее устойчивой области на оползнеопасном склоне, что позволяет более объективно оценивать риски, связанные с пространственной активизацией оползневого процесса.

Основными методами трехмерного анализа устойчивости склонов являются методы предельного равновесия и численные методы, основанные на механике сплошной среды.

Опыт трехмерных расчетов устойчивости склонов [Фоменко И. К., Зеркаль О. В., 2011], приобретенный автором данной работы, основан на бета-тестировании программного продукта SVSlope 3D компании SoilVisionSystems, Ltd (Канада).

К расчету устойчивости склонов при трехмерной постановке задачи были применены следующие методы:

- метод Янбу (относится к группе методов, удовлетворяющих равновесию горизонтальных сил);
- метод Бишопа (относится к группе методов, удовлетворяющих равновесию моментов);
- метод Спенсера (относится к группе методов, удовлетворяющих общему равновесию моментов и сил).

В качестве алгоритма поиска критических поверхностей скольжения в трехмерной постановке был использован метод «входа–выхода» (Entry and Exit). Результаты моделирования методом Спенсера представлены на рис. 8. Сравнение результатов расчета трехмерного и двухмерного моделирования представлено в табл. 2.

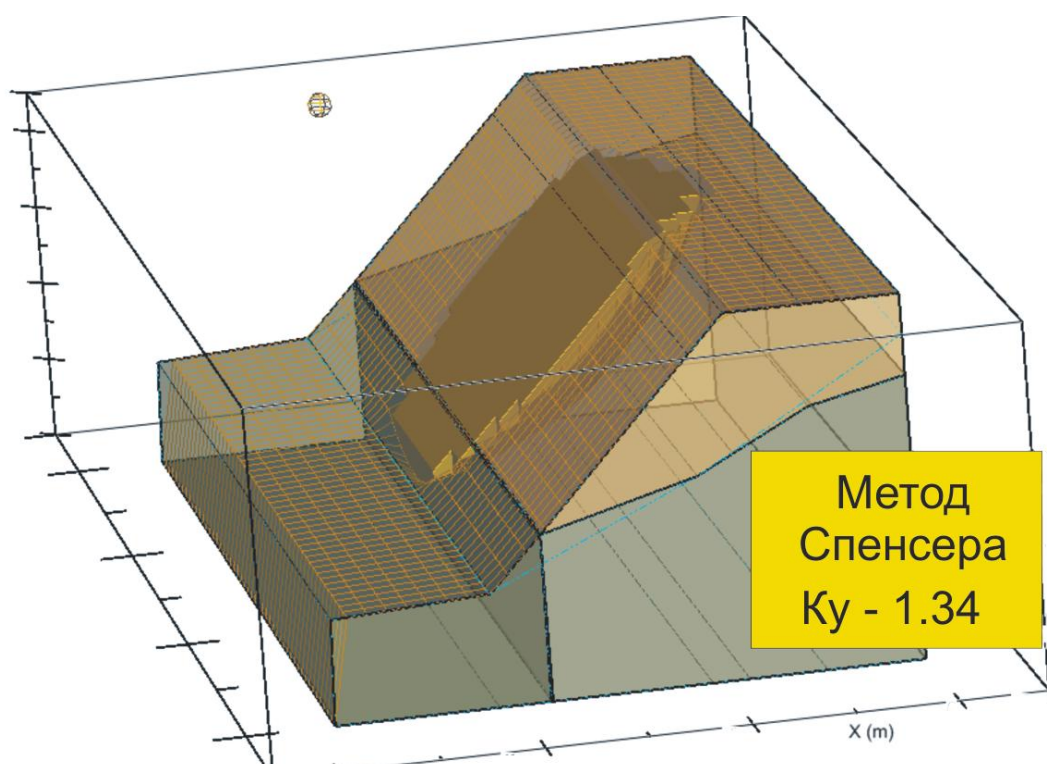


Рис.8. Геомеханическая схема расчета устойчивости склона методом Спенсера

Таблица 2. Сравнение результатов 3D и 2D расчетов устойчивости склона

Вариант расчета	Расчетный метод		
	Спенсера	Бишопа	Янбу
3D	1.34	1.29	1.25
2D	1.27	1.25	1.22
Отношение K_y 3D/2D	1.05	1.03	1.03

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- Полученные в результате трехмерного моделирования коэффициенты устойчивости склона выше аналогичных коэффициентов устойчивости, полученных при решении задачи в плоской постановке.
- *При переходе от двумерной постановки задачи к трехмерной следует учитывать следующие аспекты:*

Во-первых, меняется концепция описания формы поверхности скольжения. В трехмерной постановке зона скольжения моделируется (при допущении об однородности свойств грунтов) в виде сегмента эллипсоидальной поверхности. Круглоцилиндрическая поверхность скольжения при расчете в двумерной постановке не является ее аналогом.

Во-вторых, при трехмерном моделировании устойчивости склонов методами предельного равновесия неопределенность сил, действующих на границах отсеков, распространяется не в одном, а двух направлениях. Таким образом, получаемые различия между результатами 2D и 3D расчетов частично определяются зависимостью между этими силами.

В настоящее время, общепризнанным подходом для решения проблемы о величине и направлении сил, действующих на границе отсеков, является использование зависимости, предложенной Моргенштерном и Прайсом (1965):

$$X = E \lambda f(x) \quad (1)$$

где: $f(x)$ — некоторая функция; λ — процентное соотношение (в десятичной форме) примененной функции; E и X — соответственно перпендикулярная сила и сила сдвига, действующие на границе отсеков.

При этом стоит отметить, что функция $f(x)$ может быть любой и методика ее определения, в большей степени лежит в области философии, нежели механики.

ГЛАВА 6 Современные направления в расчете устойчивости склонов

Компьютерные технологий и новые возможности анализа устойчивости склонов значительно повышают достоверность результатов расчета.

Следует обратить внимание на следующие направления в расчетах устойчивости склонов:

- оптимизация поверхности скольжения;
- вероятностный анализ и анализ чувствительности;
- возможные способы учета влияния гидрогеологических условий и сейсмического воздействия;
- использование современных моделей поведения грунтов и критериев прочности.

Оптимизация поверхности скольжения (ПС).

Определение формы и пространственного положения критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом устойчивости является одним из ключевых вопросов анализа устойчивости склонов.

Первоначально, в расчетах устойчивости склонов, были определены простые виды поверхностей, по которым происходит возможное смещение оползневых тел:

- смещение по плоской поверхности;
- смещение по круглоцилиндрической поверхности;
- смещение по поверхности в форме логарифмической спирали;
- смещение по поверхности в форме циклоиды;
- смещение по блоковой поверхности скольжения;
- Смещение по заранее заданной поверхности скольжения.

Определение критической поверхности скольжения (если она не задана априори) в методах предельного равновесия является многошаговым. Сначала определяется вероятная ПС и высчитывается коэффициент устойчивости склона. Эта процедура повторяется для целого ряда возможных ПС. В итоге поверхность скольжения с наименьшим коэффициентом устойчивости определяется как критическая.

Однако в случае неоднородных склонов реальные ПС существенно отличаются от простых. Часто поверхность скольжения контролируется стратиграфическими границами или приурочена к отдельным геологическим телам (основному деформирующему горизонту [Кюнтцель В. В., 1980]). Исследования последних лет выявили возможность инкрементального изменения частей поверхности скольжения [Greco, 1996, Malkawi АН, Hassan WF, Sarma SK, 2001], в результате которого происходит снижение коэффициента устойчивости склона, а сама ПС при этом приобретает вид, отличный от простого. Данная техника минимизации коэффициента устойчивости за счет пошагового изменения частей вычисленной простой ПС получила название оптимизации поверхности скольжения [Krahn J., 2004].

Основными методами оптимизации поверхности скольжения являются: метод Греко; алгоритм имитации отжига; метод динамического программирования.

Применение процедуры оптимизации поверхности скольжения позволяет существенно увеличить надежность, получаемых при расчете устойчивости склонов, результатов.

Вероятностный анализ и анализ чувствительности.

Вероятностный анализ при расчете УС делает доступным проведение анализа оползневой опасности (в терминах вероятности активизации процесса). Сущность вероятностного анализа заключается в определении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона, в зависимости от вероятностных функций распределения факторов оползнеобразования.

Консервативные, детерминистические методы расчетов устойчивости склонов, применяемые в отечественной практике, учитывают изменчивость факторов оползнеобразования опосредованно, через использование в математических моделях их расчетных (в статистической терминологии) значений. Полученные на основании подобных расчетов коэффициенты устойчивости склонов в действительности не определяют фактический уровень опасности, поскольку невозможно установить взаимосвязь между ними и вероятностью развития оползневого процесса.

Важной характеристикой устойчивости склона при вероятностном анализе является показатель надежности (β), который определяется следующим образом:

$$\beta = \frac{K_y - 1,0}{\sigma_K} \quad (2)$$

где: σ_K – среднеквадратическое отклонение коэффициента устойчивости склона (K_y).

Из двух склонов большую устойчивость и меньшую вероятность активизации оползневой процесса имеет тот, у которого значение показателя надежности (β) выше.

Если известна форма вероятностного распределения K_y , показатель надежности (β) может быть напрямую связан с вероятностью развития оползневой процесса. На рис. 9. показано взаимоотношение показателя надежности (β) и вероятности развития оползневой процесса для нормально распределенного коэффициента устойчивости.

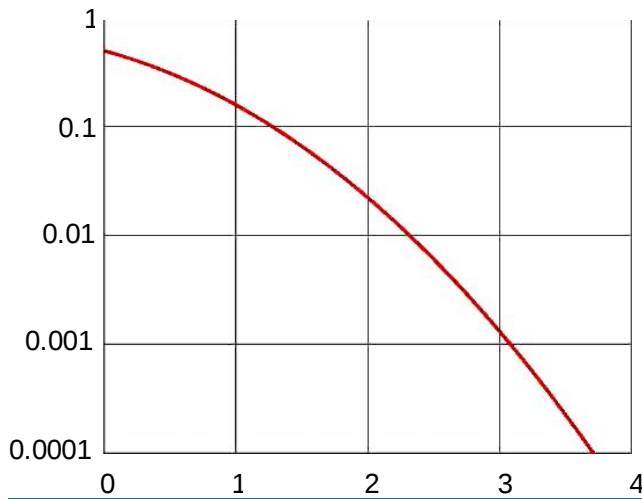


Рис. 9. Взаимосвязь между показателем надежности и вероятностью развития оползневой процесса

Анализ чувствительности близок к вероятностному анализу, однако вместо задачи о вероятности развития оползневой процесса в зависимости от вероятности изменчивости факторов оползнеобразования, в этом случае решается задача о степени зависимости коэффициента устойчивости от закономерного изменения тех или иных параметров.

Таким образом, **совместное использование вероятностного анализа и анализа чувствительности позволяет выполнить прогноз оползневой опасности.**

Вероятностный анализ позволяет выполнить оценку оползневой опасности (в терминах вероятности активизации оползневой процесса).

Анализ чувствительности позволяет выполнить прогноз изменения коэффициента устойчивости склона в зависимости от закономерного изменения одного или нескольких факторов оползнеобразования.

Учет влияния подземных вод

Действие грунтовых вод на состояние оползневой склона проявляется различными путями:

- За счет гидростатического взвешивания
- За счет изменения порового давления
- За счет возникающего фильтрационного давления водного потока

Вода также изменяет физико-механические характеристики грунтов и обуславливает развитие фильтрационных деформаций.

Гидростатическое взвешивание учитывается при определении объемного веса пород, слагающих оползневое тело: выше уровня подземных вод собственный вес оползня устанавливается на естественной плотности пород, а вес части оползня, расположенного между кривой депрессии и поверхностью скольжения, обычно определяется с учетом взвешивания в воде.

Однако вопрос о взвешивании в глинистых грунтах нельзя считать окончательно решенным. Особому исследованию подлежат:

- влияние плотности глинистых грунтов на величину взвешивания;
- влияние плотности связанной воды на величину взвешивания;
- способность связанной воды и воды переходного типа (осмотически поглощенной, капиллярной) между частицами определять гидростатическое взвешивание.

Например, при пористости меньше объемной максимальной молекулярной влагоемкости, когда только физически связанная вода заполняет поры, глинистые грунты не способны взвешиваться.

Влияние порового давления на сопротивление сдвигу описывается следующим уравнением:

$$\tau = (\sigma - u) \times \operatorname{tg} \varphi + c \quad (3)$$

где τ — сопротивление сдвигу, u — поровое давление; σ — эффективные напряжения; φ — угол внутреннего трения; c — сцепление.

Для проведения анализа устойчивости склонов с учетом порового давления могут быть использованы два подхода [Хуан Я. Х., 1988].

Первый подход основан на рассмотрении прочности на сдвиг при дренировании в эффективных напряжениях. Результат влияния порового давления в этом случае может учитываться следующими способами:

- На основе линии пьезометрического уровня подземных вод.
- Введением в расчет коэффициента порового давления R_u [Bishop A. W. and Morgenstern N., 1960].
- Методом B-bar [Skempton, 1954].
- Расчетом методом конечных элементов.

Второй вид анализа — оценка прочности на сдвиг в отсутствии дренажа (недренируемая схема) [Хуан Я. Х., 1988]. В его основе предположение, что угол внутреннего трения грунтов зоны скольжения равен 0. При этом поровое давление вдоль любого участка поверхности скольжения (в пределах которого прочность грунта соответствует условиям отсутствия дренирования) принимается равным 0. Этот прием подразумевает, что при возрастании порового давления величина $(\sigma - u)$ из уравнения (3) может оказаться равной 0, и тогда сопротивление сдвигу τ будет зависеть только от сцепления c .

Фильтрационное давление водного потока является силой, действующей по касательной к линии тока в каждой точке элементарной меры воды. Величина массовой силы на единицу объема породы равна произведению веса воды в единице объема на гидравлический градиент (последний равен потере высоты напора воды на единицу длины пути потока).

При расчете устойчивости склонов фильтрационное давление может быть учтено путем введения равной по величине фиктивной объемной силы или за счет уменьшения угла внутреннего трения грунтов (метод фиктивного угла).

Поток подземных вод (помимо фильтрационного давления) способствует процессам кольматации и суффозии грунтов, которые, в свою очередь, могут оказывать значительное влияние на устойчивость склонов. За счет кольматации грунтов возрастает поровое давление, за счет суффозии (физической и химической) происходит разуплотнение грунтов и снижение их прочностных характеристик.

При расчете устойчивости склонов преобладающую роль может играть либо поровое, либо давление водного потока — в зависимости от фильтрационных свойств грунтов, слагающих склон. В хорошо проницаемых грунтах, например, в песках, фильтрационное давление будет оказывать большее влияние на устойчивость склонов, чем поровое. В плохо проницаемых, например, в глинах — наоборот: устойчивость склонов будет определяться величиной порового давления.

Сейсмическое воздействие

Учет сейсмического воздействия может быть осуществлен тремя способами:

- интуитивного подхода;
- псевдостатического анализа;
- динамического анализа.

Интуитивный анализ включает два метода:

- метод фиктивного откоса;
- метод фиктивного сейсмического угла.

Идея *метода фиктивного откоса* [Чугаев Р. Р., 1967, Калинин Э. В., 2006] заключается в повороте склона на угол отклонения от вертикали равнодействующей гравитационной и горизонтально направленной сейсмической силы.

Идея *метода сейсмического угла* заключается в том, что при расчетах устойчивости склонов сейсмическое воздействие может быть учтено за счет уменьшения угла внутреннего трения грунтов ОДГ на некоторую величину, называемую сейсмическим углом.

При *псевдостатическом анализе* эффект от землетрясения моделируется путем введения дополнительных инерционных сил, определяемых следующим образом [Krahn J., 2004]:

$$F_h = \frac{a_h}{g} \cdot W = k_h \cdot W \quad (4)$$

$$F_v = \frac{a_v}{g} \cdot W = k_v \cdot W \quad (5)$$

где a_h — горизонтальное сейсмическое ускорение, a_v — вертикальное сейсмическое ускорение, g — ускорение свободного падения, W — вес расчетного сегмента, k_h и k_v — безразмерные коэффициенты в горизонтальном и вертикальном направлении.

Следовательно, для расчета устойчивости склонов при сейсмическом воздействии в качестве исходных данных необходимо знать пиковые ускорения, характерные для исследуемой территории.

С целью оценки применимости методов интуитивного анализа при расчете устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия (бальность землетрясения — 7 баллов), было выполнено их сравнение с методом псевдостатического анализа. В качестве расчетного профиля использована тестовая модель склона, предложенная Д. Г. Фредлундом и Дж. Краном [Fredlund D. G., and Krahn J., 1977]. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3. Оценка влияния сейсмического воздействия на устойчивость склона

Метод	Фиктивного откоса	Фиктивного сейсмического угла	Псевдостатического анализа
Результат расчета	1,411	1,385	1,384

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о хорошей сходимости полученных K_y . Таким образом, для используемой частной модели склона допустима замена псевдостатического анализа интуитивными методами. Однако, для общего случая расчета устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия тезис о применимости последних требует дополнительного обоснования.

Динамический анализ

Расчет по этому методу основывается на данных акселерограмм, что позволяет принимать во внимание продолжительность и интенсивность землетрясений.

В основе динамического анализа лежит конечно–элементное решение уравнения движения следующего вида:

$$[K] \{d\} + [D] \{v\} + [M] \{a\} = \{F\} \quad (6)$$

где: d — смещение; v — скорость; a — ускорение; $[K]$ — матрица жесткости; $[D]$ — матрица затухания колебаний; $[M]$ — матрица масс; $\{F\}$ — вектор узловых сил.

При сейсмическом воздействии может происходить изменение прочностных свойств грунтов. В первую очередь это относится к водонасыщенным грунтам с их способностью к разжижению [Вознесенский Е. А., 1997, Ишихара К., 2006].

Динамический анализ дает два типа информации, которую можно использовать при оценке оползневой опасности, связанной с разжижением [Krahn J., 2004]. Во–первых, изменение порового давления при динамическом воздействии, во–вторых — определение зон, где возможно разжижение грунта.

Модели поведения и критерии прочности грунтов.

При расчете устойчивости склонов необходим выбор такой модели грунта, чтобы ее поведение максимально соответствовало механизму развития оползневого процесса.

Наиболее существенной частью любой расчетной теории является группа физических соотношений, представляющих собой математическую модель деформирования. Физические соотношения целесообразно рассматривать в двух взаимосвязанных аспектах:

- уравнения, описывающие зависимость между напряжениями и деформациями;
- критерии прочности, устанавливающие условия перехода грунтов в предельное состояние.

Очевидно, что корректный выбор концептуальной модели поведения грунта (а также используемого в расчете критерия прочности) оказывает существенное влияние на результаты численного анализа устойчивости склона и представляет собой важную часть построения геомеханической модели. При неполной адекватности расчетной модели реальной ситуации точность расчета может оказаться недостаточной.

ГЛАВА 7 Практические примеры оценки оползневой опасности

При моделировании локальной устойчивости склонов в рамках данной работы под комплексной методикой будем понимать следующее:

- использование при расчете коэффициента устойчивости склона методов с различным механико-математическим аппаратом и оценку их сходимости;
- расчет устойчивости склонов в неоднородных грунтах по круглоцилиндрической поверхности скольжения методами предельного равновесия должен включать процедуру ее оптимизации;

- применение при расчете коэффициента устойчивости склона вероятностного подхода и анализа чувствительности.

Применение методов оптимизации при поиске оптимальной поверхности скольжения.

Для оценки влияния оптимизации поверхности скольжения на K_y рассмотрим пример расчета устойчивости склона по круглоцилиндрической и оптимизированным ПС. В качестве модельного профиля будет выступать инженерно-геологический разрез левого борта долины реки Кирпичной (проект «Сахалин II»).

При расчетах K_y были использованы следующие методы оптимизации: метод Gresco и алгоритм имитации отжига. Дополнительно выполнен расчет устойчивости склона методом конечных элементов. Геомеханические схемы расчетов представлены на рис. 10.

Анализ результатов расчета (табл. 4) позволяет сделать следующие выводы:

- Различия в K_y полученных в результате расчета по круглоцилиндрической и оптимизированным ПС могут составлять порядка 10%, а в некоторых — до 30% [Фоменко И. К., Сироткина О. Н., 2011].
- Коэффициент устойчивости, полученный по оптимизированной поверхности скольжения, очень близок K_y , полученному по МКЭ.
- Зона максимальных сдвигающих деформаций, полученная в результате моделирования МКЭ, по форме и положению близка к оптимизированной поверхности скольжения, полученной в результате расчета методом GLE.
- Различие между результатами расчета внутри группы методов предельного равновесия по круглоцилиндрической и оптимизированным ПС более значительны, чем между результатами расчета по оптимизированным поверхностям скольжения и моделированием по методу конечных элементов. Факт зависимости коэффициента устойчивости от алгоритма поиска ПС в методах предельного равновесия, частично связан с одним из существенных ограничений — отсутствие связи между силами (напряжениями) и смещениями (деформациями) [Фоменко И. К., 2012].

Таблица 4. Сравнение результатов расчета по круглоцилиндрической и оптимизированным поверхностям скольжения

Результат расчета \ Расчетный метод	Моргенштерна-Прайса (М-П)	Бишопа	Янбу	М-П/МКЭ
K_{y1} по круглоцилиндрической поверхности скольжения	1,31	1,31	1,27	1,08
K_{y2} по оптимизированной поверхности скольжения, метод Gresco	1,23	1,22	1,18	1,01
K_{y3} по оптимизированной поверхности скольжения, алгоритм имитации отжига	1,23	1,22	1,19	1,02
Отношение K_{y1}/K_{y2}	1,06	1,08	1,07	

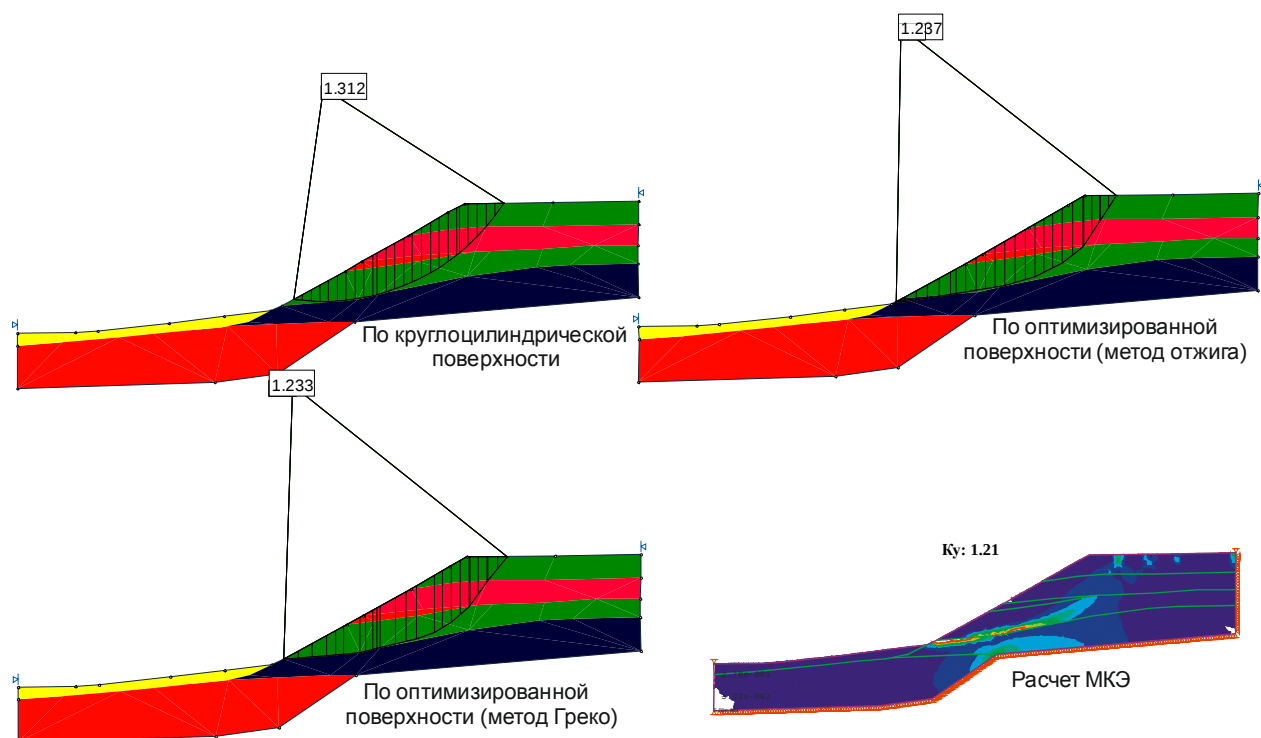


Рис. 10. Геомеханические схемы расчетов УС

Таким образом, **решение задачи по определению формы критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом устойчивости методами предельного равновесия не может считаться завершенным без выполнения процедуры ее оптимизации.**

Применение вероятностного анализа при оценке оползневой опасности

В качестве примера вероятностного анализа оползневой опасности рассмотрим моделирование устойчивости склонов долины р. Хоямбусибин (проект «Сахалин 1») [Сысоев Ю. А., Фоменко И. К., 2011]. Геомеханическая схема расчетов представлена на рис. 11.

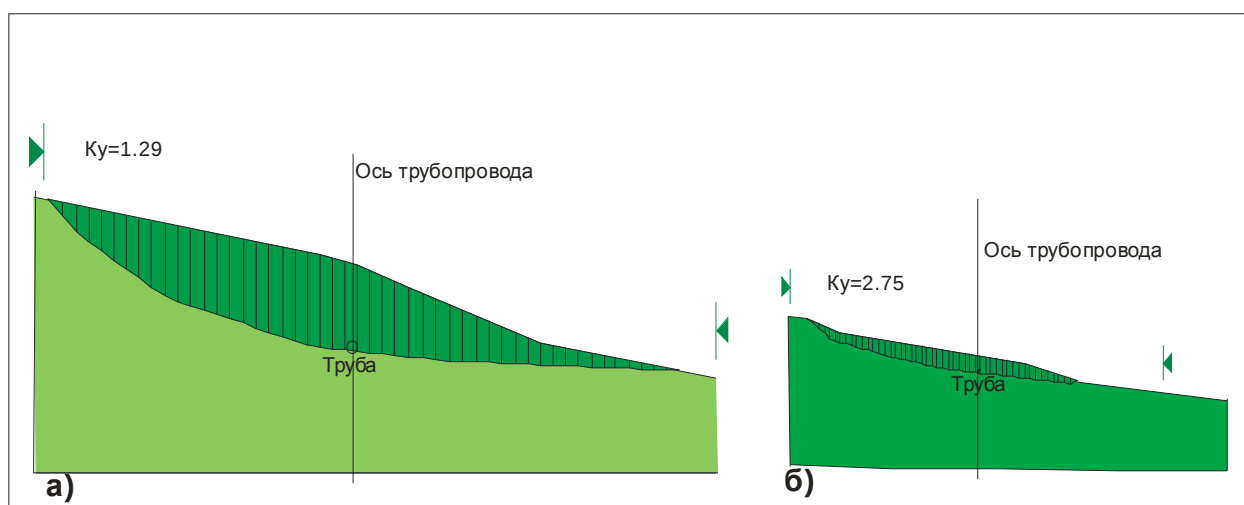


Рис. 11. Геомеханические схемы с результатами расчета УС:
а) расчетный профиль № 1; б) расчетный профиль № 2

Результаты расчетов, приведенные в табл. 5, и графики, показанные на рис. 12, наглядно демонстрируют различия между детерминистическим и вероятностным подходами к оценке устойчивости склонов. Детерминистические расчеты, основанные на средних значениях характеристик грунтов при общей устойчивости обоих склонов ($K_y > 1$), указывают на бóльшую устойчивость второго склона ($K_y = 2,75$) по сравнению с первым. А вероятностные расчеты, основанные на частных значениях физико-механических характеристик, говорят о противоположном. Это связано с тем, что расчетный профиль № 1 сложен грунтами, ранее не затронутыми оползневой процессом, с достаточно однородными свойствами. Грунты расчетного склона № 2 представлены делювиальными образованиями и характеризуются значительным разбросом физико-механических свойств. При отсутствии вероятности активизации оползневой процесса на склоне № 1 (показатель надежности $\beta = 5,01$) вероятность перехода склона № 2 в неравновесное состояние ($K_y < 1$) составляет порядка 7% (показатель надежности $\beta = 1,47$).

Таблица 5. Результаты вероятностных расчетов устойчивости склонов

№ расчетного профиля (склона)	Средний коэффициент устойчивости склона K_y	Вероятностные параметры для анализа опасности образования оползня по поверхности скольжения, захватывающей трубопровод*			
		$K_{\min}$	$K_{\max}$	β	f_k , %
1	1,29	1,08	1,58	5,01	0,00
2	2,75	0,11	7,38	1,47	6,97

* $K_{\min}$ – минимальный коэффициент устойчивости; $K_{\max}$ – максимальный коэффициент устойчивости; β – показатель надежности; f_k – вероятность развития оползневой процесса.

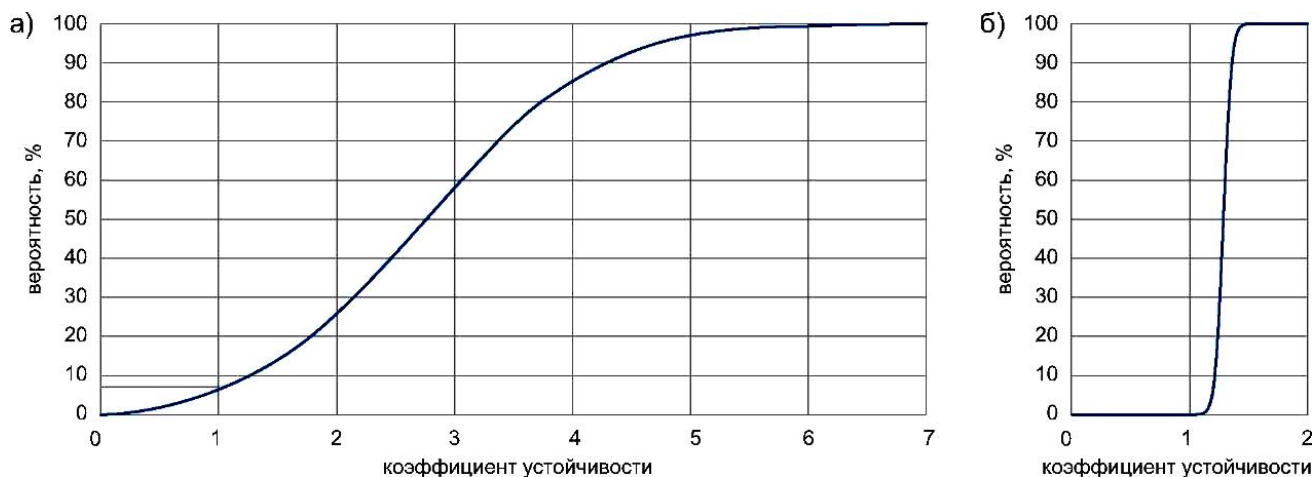


Рис. 12. Интегральные функции распределения коэффициентов устойчивости расчетных склонов: № 1 (а) и № 2 (б)

Применение анализа чувствительности при расчете устойчивости склонов.

В качестве примера использования анализа чувствительности для прогноза изменения K_y склона, в зависимости от закономерного изменения факторов оползнеобразования приведем результаты расчета устойчивости оползневого участка на объекте: «Магистральный газопровод ДУ-1200 мм КС «Изобильненская» — КС «Невинномысская» [Фоменко И. К., Пендин В. В., Ионов В. Ю., Зыонг М. Х., 2013]. Участок расположен на правом берегу р. Чибрик на склоне южной экспозиции.

Основными факторами, определяющими УС на данном участке, являются гидрогеологические условия и сейсмическое воздействие. Для оценки их влияния на устойчивость склона был выполнен анализ чувствительности K_y к изменению данных параметров.

Геомеханическая схема расчета устойчивости представлена на рис. 13.

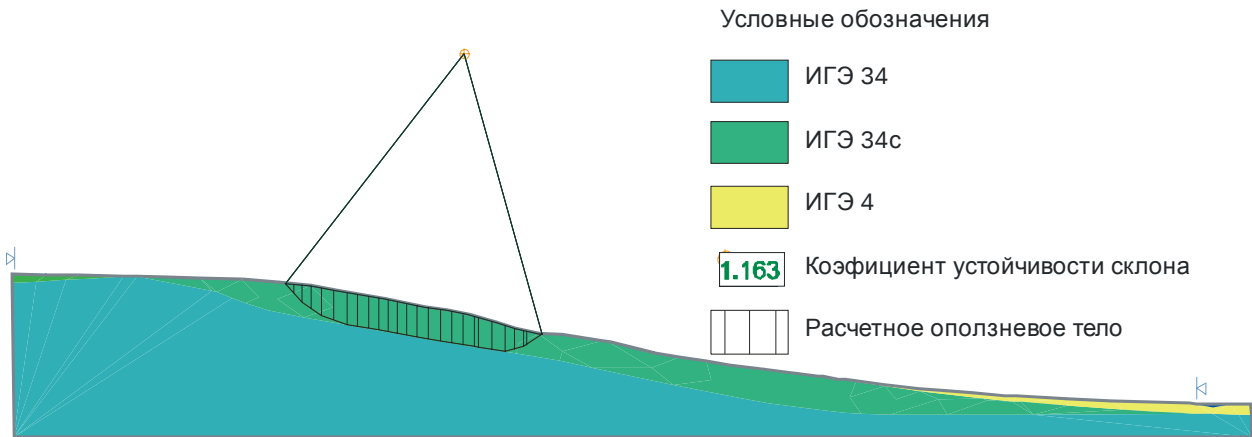


Рис. 13. Геомеханическая схема расчета устойчивости склона на правом берегу р. Чибрик.

На рис. 14 представлены графики зависимости K_y от положения УГВ и мощности прогнозируемого землетрясения.

Анализ полученных результатов показывает, что при повышении УГВ на 0,6 м от минимального прогнозного уровня, склон теряет устойчивость и начинается активизация оползневого процесса.

Аналогичная ситуация наблюдается в случае сейсмического воздействия (при величине горизонтального сейсмического ускорения 0.004 в долях G , где G — ускорение свободного падения).

Стоит отметить, что падение K_y за счет подъема УГВ (на 0,5 м от фактически замеренного на момент выполнения инженерно-геологических изысканий) эквивалентно 6-бальному землетрясению по шкале MSK 64.

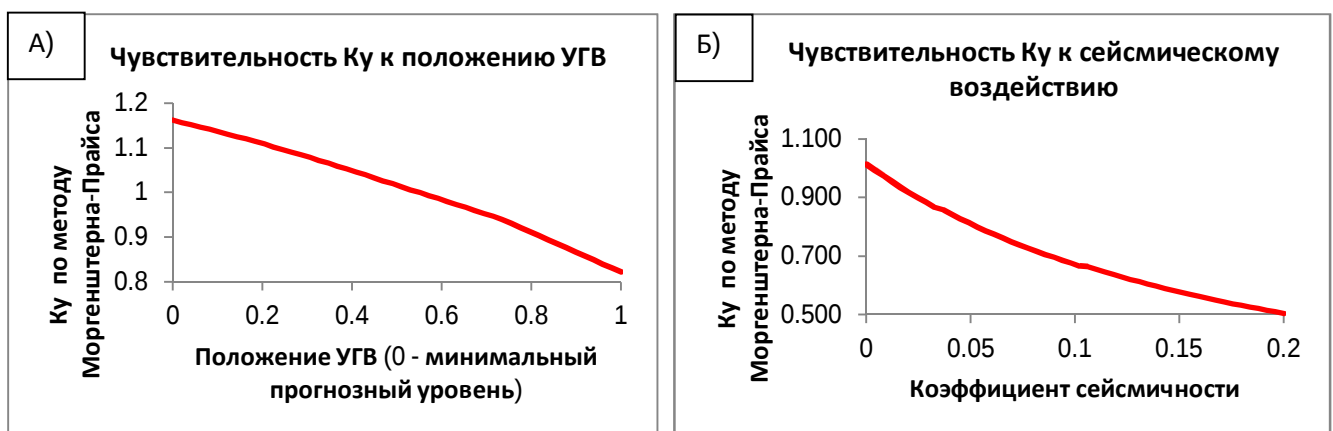


Рис.14. Графики зависимости K_y от глубины УГВ (А) и величины сейсмического воздействия (Б)

Учет влияния подземных вод на устойчивость склонов

В дополнение к выше выполненным расчетам для оценки влияния подземных вод, на примере оползневого участка (правый берег р. Чибрик), приведем примеры анализа устойчивости по следующим вариантам:

- с учетом гидростатического взвешивания;
- с учетом порового давления (недренируемая схема: прочность на сдвиг рассмотрена в отсутствии дренажа для грунтов, слагающих ОДГ);
- с учетом порового давления методом конечных элементов.

При определении величины порового давления методом конечных элементов дополнительными параметрами при расчете, являются фильтрационные характеристики грунтов (коэффициент фильтрации K_f). С целью оценки влияния фильтрационных характеристик ОДГ, анализ устойчивости модельного склона был выполнен при различных значениях коэффициентах фильтрации (K_f) грунтов ($K_{f1} = 10^{-5}$ м/с и $K_{f2} = 10^{-10}$ м/с).

Результаты расчета устойчивости склона приведены в табл. 6.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Гидростатическое взвешивание влияет на устойчивость склонов неоднозначно и может не только уменьшать, но и увеличивать K_y склона. По этой причине вопрос учета гидростатического взвешивания грунтов приобретает особую актуальность, т.к. неверная оценка данного явления может приводить к неверным и, что особенно критично, завышенным значениям K_y при расчете устойчивости склонов.

Таблица 6. Результаты расчета устойчивости склона на правом берегу р. Чибрик, с учетом влияния подземных вод

Вариант расчета	Коэффициент устойчивости оползневого склона
Оценка влияния гидростатического взвешивания (УГВ совпадает с профилем склона)	1,89
Оценка влияния порового давления (при рассмотрении прочности на сдвиг в отсутствии дренажа)	0,61
Оценка влияния порового давления методом конечных элементов ($K_{f1} = 10^{-5}$ м/с)	0,92
Оценка влияния порового давления методом конечных элементов ($K_{f2} = 10^{-10}$ м/с)	0,83

- Анализ результатов оценки устойчивости склона с учетом порового давления методом конечных элементов показал, что при увеличении коэффициента фильтрации грунтов ОДГ, коэффициент устойчивости склона так же возрастает, что вполне логично, т.к. уменьшение K_f ухудшает дренируемость грунтов и, как следствие увеличивает в грунтах ОДГ поровое давление. Коэффициент устойчивости, полученный по недренируемой схеме, является минимальным среди всех расчетов, выполненных с учетом влияния подземных.

Учет влияния сейсмического воздействия на устойчивость склонов

В сейсмических районах расчет устойчивости склонов должен производиться с учетом силы возможных землетрясений.

В качестве расчетного, был выбран один из оползней, расположенный в долине реки Мзымты (район Красной поляны) [Фоменко И. К., Захаров В. С., Самаркин-Джарский К. Г., Сироткина О. Н., 2009].

Для расчета устойчивости оползневого склона с учетом сейсмического воздействия на основе динамического анализа были использованы данные по Рачинскому землетрясению ($M_s=6.9$, $M_w=6.8$, $H=5\text{ км}$), которое произошло 29.04.1991 г. Запись сделана на станции Akhalkalaki (удаленность от очага землетрясения — 115 км). Акселерограмма горизонтальных ускорений, используемая в расчете, приведена на рис. 15.

Чтобы сравнить результаты динамического и псевдостатического анализов, для последнего выполнен анализ чувствительности коэффициента устойчивости склона к величине сейсмического воздействия. При сравнении учитывались только горизонтальные сейсмические ускорения.

Результаты моделирования приведены на рис. 16-17.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- В результате динамического анализа, полученный K_y ниже, чем в результате псевдостатического анализа.
- Учитывая тенденцию изменения K_y , при сейсмическом воздействии большей интенсивности K_y , полученный в результате псевдостатического анализа станет меньше K_y полученного в результате динамического анализа.

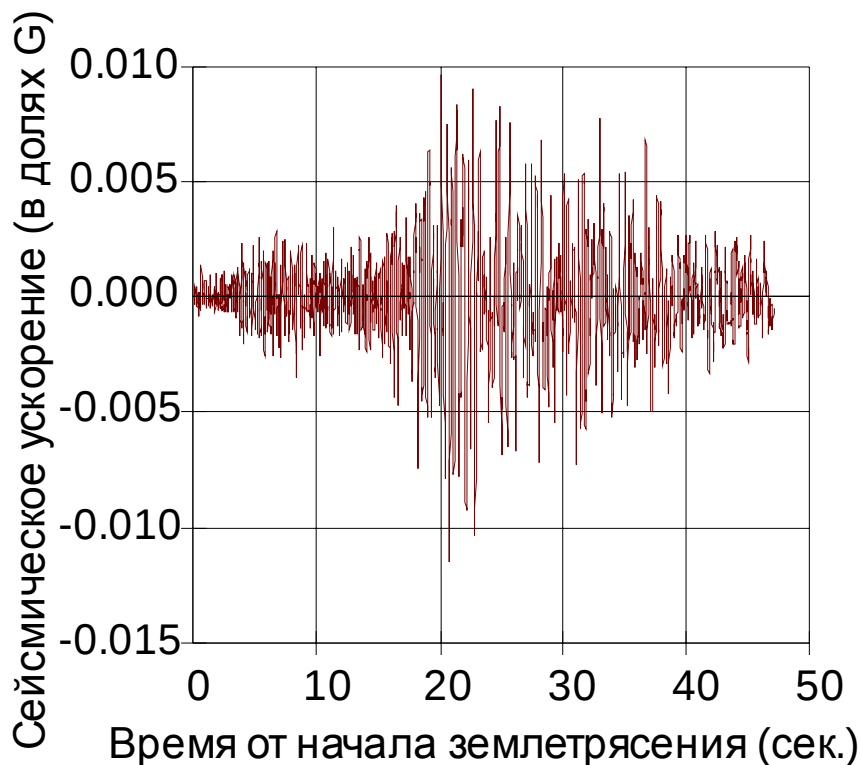


Рис. 15. Акселерограмма горизонтальных сейсмических ускорений

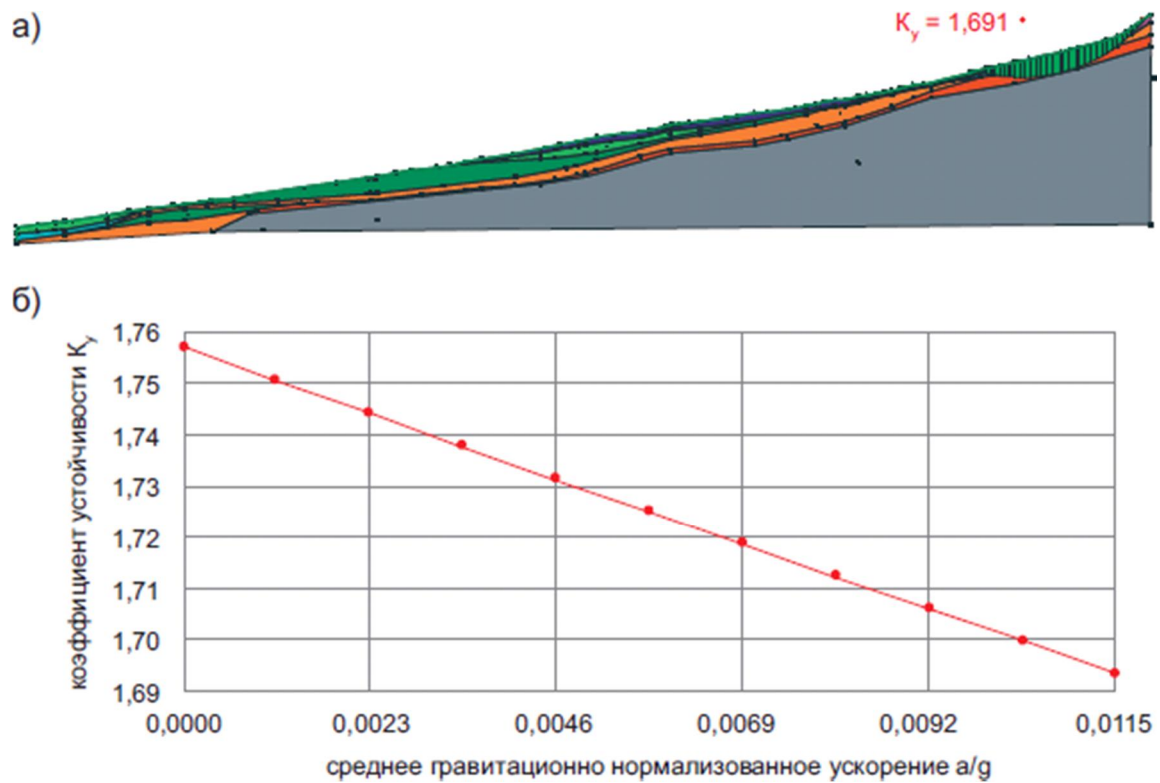


Рис. 16. Геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона на основе псевдостатического анализа (а) и график зависимости коэффициента устойчивости склона от горизонтального сейсмического ускорения (б)

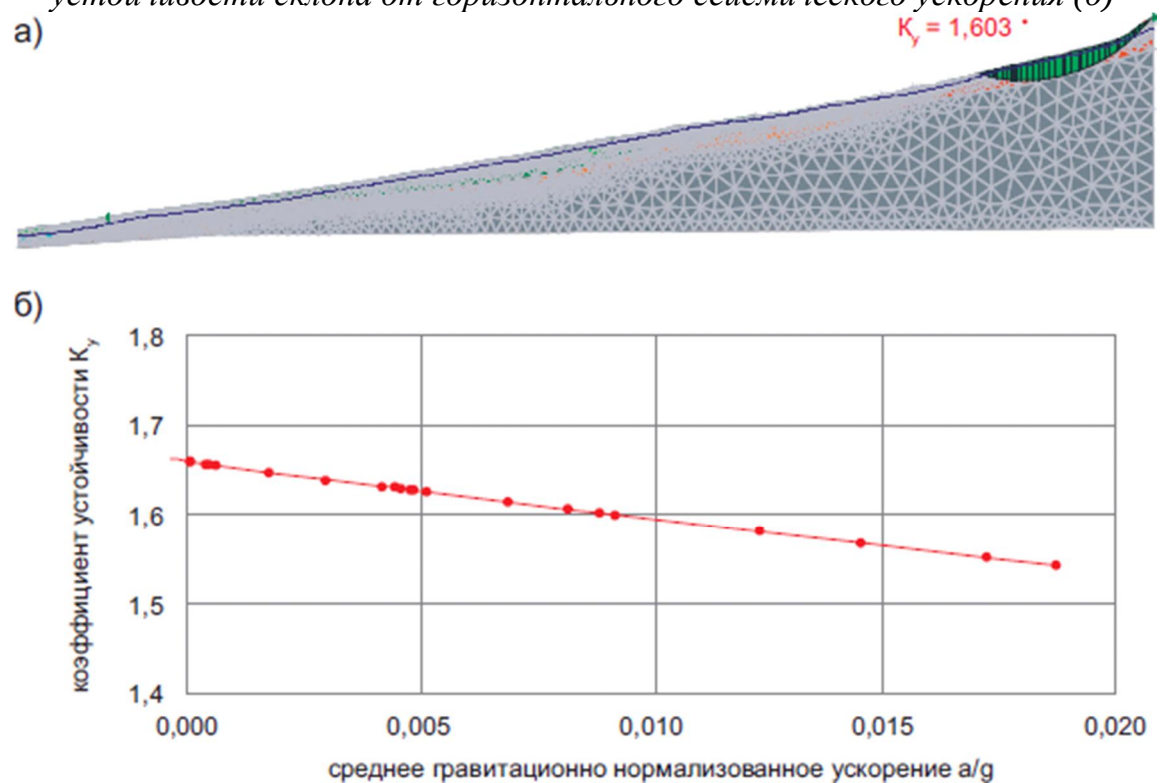


Рис. 17. Геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона на основе динамического анализа (а) и график зависимости коэффициента устойчивости склона от горизонтального сейсмического ускорения, полученный на основе динамического анализа (б)

Влияние анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов

В качестве примера учета новых моделей поведения грунта и критериев прочности рассмотрим влияние анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов.

Анализ возможного характера анизотропии свойств грунтов склонового массива позволяет выделить два типа, требующие учета при моделировании устойчивости склонов:

I тип — когда характер распределения свойств грунтов в массиве связан с природной неоднородностью;

II тип — когда характер распределения свойств грунтов в массиве обусловлен созданием анизотропных условий при формировании зон скольжения в виде горизонта максимальных сдвиговых деформаций.

Учет структурной анизотропии (I тип) при расчете устойчивости склона проводился путем рассмотрения анизотропии прочностных характеристик грунта. Эта модель использует следующую зависимость для определения сцепления c и угла внутреннего трения φ , в зависимости от пространственного положения плоскости изотропии:

$$c = c_h \cos^2 \alpha + c_v \sin^2 \alpha; \quad (7)$$

$$\varphi = \varphi_h \cos^2 \alpha + \varphi_v \sin^2 \alpha, \quad (8)$$

где α — угол уклона плоскости изотропии; нижние индексы h и v обозначают горизонтальное и вертикальное направление распространения свойств грунтов (вдоль и перпендикулярно напластованию соответственно).

Данная модель позволяет учитывать анизотропность грунтов при моделировании устойчивости склонов в трансверсально–изотропном случае.

Двухэтапность процедуры анализа является принципиальной особенностью расчета устойчивости склонов с учетом анизотропии свойств грунтов. На первом этапе проводится расчет устойчивости склона с учетом анизотропии I типа. В результате выявляется положение плоскостей скольжения, и, как следствие, зоны формирования горизонта максимальных сдвиговых деформаций. На втором этапе выявленные плоскости скольжения рассматриваются в качестве зон неоднородности (анизотропии II типа), проводится повторный расчет общей устойчивости склона с учетом всех типов неоднородностей распределения свойств грунтов в склоновом массиве.

Оценка влияния анизотропии свойств грунтов при численном анализе опасности развития оползневых деформаций проводилась на примере расчета устойчивости склона левого борта долины реки Мзымты (Юго–Западный Кавказ), где на момент проведения исследований наблюдалось широкое развитие оползневых деформаций.

Расчеты проводились с использованием метода Моргенштерна–Прайса и выполнялись по следующим вариантам:

- **Вариант 1** — грунты, слагающие массив, рассматривались как анизотропные (I тип анизотропии);
- **Вариант 2** — грунты, слагающие массив, рассматривались как изотропные, при расчете принимались физико-механические свойства, определенные по напластованию;
- **Вариант 3** — грунты, слагающие массив, рассматривались как изотропные, при расчете принимались физико-механические свойства, определенные перпендикулярно напластованию;
- **Вариант 4** — грунты, слагающие массив, рассматривались как анизотропные (I тип анизотропии) и в склоновом массиве сформировался горизонт основных сдвиговых деформаций — II тип анизотропии.

Геомеханическая схема расчета приведена на рис. 18.

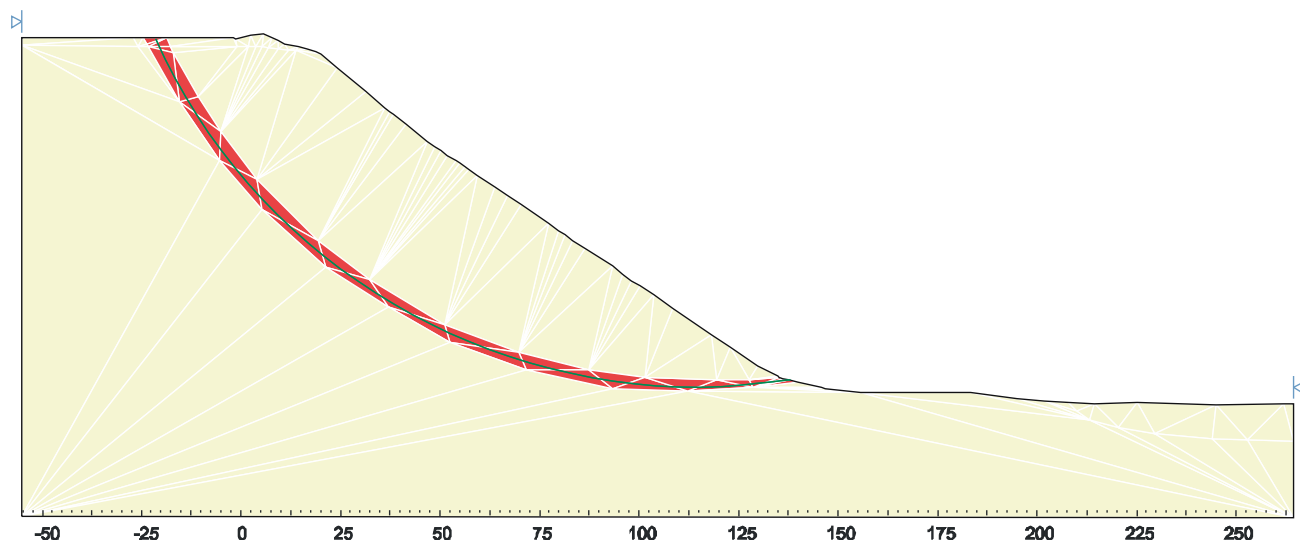


Рис.18. Геомеханическая схема расчета устойчивости склона (оценка влияния анизотропии прочностных свойств грунтов на K_y)

Результаты количественной оценки устойчивости модельного склона с учетом влияния анизотропии представлены в табл. 7.

Модельный анализ общей оценки устойчивости склонов с учетом анизотропии свойств грунтов показал, что она оказывает влияние, как на положение расчетной поверхности скольжения, так и на величину коэффициента устойчивости склона. Введение в расчетную геомеханическую схему анизотропных условий I типа показывает несколько более высокие (примерно на 5%) значения коэффициента устойчивости по сравнению с результатами расчетов с принятием свойств по напластованию и существенно более низкие (примерно на 15%) величины коэффициента устойчивости по сравнению с итогами расчетов с использованием свойств перпендикулярно напластованию.

Таблица 7. Результаты оценки влияния анизотропии свойств грунтов на величину коэффициента устойчивости склона

Вариант расчета	Коэффициент устойчивости (метод М-П*)	Радиус поверхности скольжения м.	Площадь проекции потенциального оползневого тела, м ²	Состояние склона
1	1,79	150,23	4958,43	устойчив
2	1,70	148,63	4724,20	устойчив
3	2,06	149,12	4823,41	устойчив
4	1,01	150,23	4958,43	в состоянии предельного равновесия

* М-П — Метод Моргенштерна – Прайса

Для установления зависимости устойчивости склона от пространственного положения плоскости изотропии (I тип анизотропии) был дополнительно выполнен анализ влияния на K_y соотношения угла наклона плоскости изотропии и ориентировки склона (рис. 19).

Расчеты показали, что минимальная величина $K_y=1,74$ характерна для условий падения плоскости анизотропии под углом порядка 30° в сторону склона (т.е. по склону), в то время как максимальное значение $K_y=2,022$ было получено при падении плоскости анизотропии под углом порядка 60° в направлении, противоположном направлению склона (т.е. «в склон»). Для слагающих склон грунтов коэффициент анизотропии (K_a) по сцеплению составил 1,24, по углу внутреннего трения — 1,15, по коэффициенту устойчивости — 1,16.

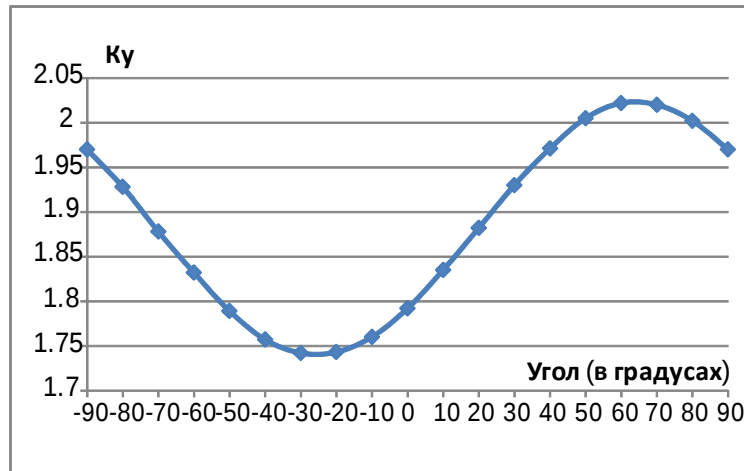


Рис. 19. Зависимость коэффициента устойчивости склона от угла наклона плоскости изотропии

Наибольший интерес представляют результаты численного анализа устойчивости склонов с учетом анизотропии II типа (варианта расчета 4). При реализации данного сценария, т.е. при формировании горизонта основных сдвиговых деформаций, устойчивость склона существенно снижается и он переходит из устойчивого состояния в состояние предельного равновесия с высокой вероятностью развития оползневого процесса (рис. 20).

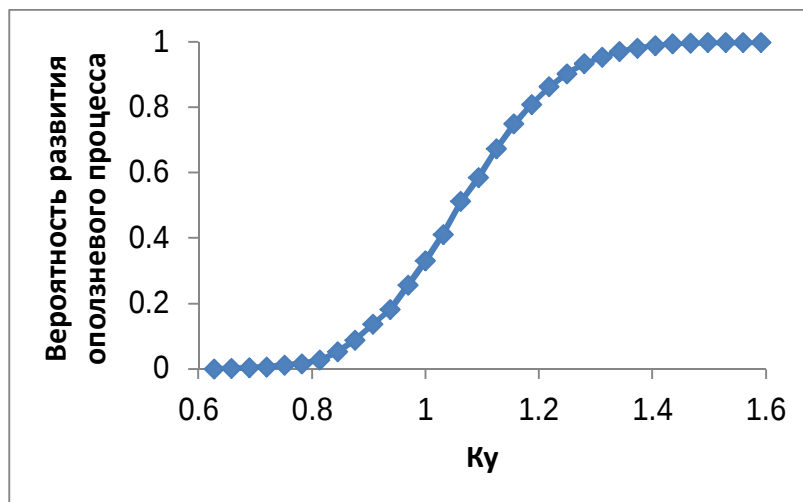


Рис. 20. Интегральная функция распределения коэффициента устойчивости расчетного склона, в зависимости от изменчивости свойств грунтов ослабленной зоны (горизонта основных сдвиговых деформаций)

Таким образом, моделирование устойчивости склонов, сложенных анизотропными грунтами, должно базироваться на последовательном изучении анизотропии двух типов: 1-й тип — анизотропия, связанная с природной неоднородностью, позволяет оценить мгновенную устойчивость склона; 2-й тип — анизотропия, возникшая при формировании зоны скольжения (в виде горизонта максимальных сдвиговых деформаций), дает возможность оценить длительную устойчивость склона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа является научным обобщением теоретических и методологических исследований автора. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Сформулированы теоретические основы прогноза региональной и локальной оползневой опасности.

2. Дано описание основных методов прогноза региональной оползневой опасности. Обосновано применение комплексной методики прогноза региональной оползневой опасности с использованием ГИС. На основе выполненного моделирования показано, что она должна базироваться на сочетании стохастического и детерминированного подходов. На основе стохастического анализа решаются задачи по определению и оценке значимости комплекса региональных факторов оползнеобразования. На основе детерминированного анализа решаются задачи количественного прогноза влияния отдельных факторов.

3. Разработана выдержанная, с позиций формальной логики, классификация методов расчета устойчивости склонов. В качестве основного признака–базиса был использован механико–математический подход. В рамках предложенной классификации приведено описание методов расчета локальной устойчивости склонов. Комплексное применение современных методов, основанных на разных принципах, с оценкой их сходимости позволяет значительно повысить достоверность результатов моделирования.

4. Обосновано применение трехмерного моделирования при расчете устойчивости склонов, базирующегося на методах предельного равновесия.

Опыт трехмерных расчетов устойчивости склонов методами предельного равновесия позволил сделать следующие основные выводы:

– Во–первых, меняется концепция описания формы поверхности скольжения. В трехмерной постановке задачи, зона скольжения моделируется (при допущении об однородности свойств грунтов) в виде сегмента эллипсоидальной поверхности. Круглоцилиндрическая поверхность скольжения при расчете в двухмерной постановке не является ее аналогом.

– Во–вторых, при трехмерном моделировании устойчивости склонов методами предельного равновесия неопределенность сил, действующих на границах отсеков, распространяется не в одном, а двух направлениях. Таким образом, получаемые различия между результатами 2D и 3D расчетов частично определяются зависимостью между этими силами.

5. Обосновано использование перспективных подходов к оценке и прогнозу локальной оползневой опасности таких как: оптимизация поверхности скольжения, вероятностный анализ и анализ чувствительности, возможные способы учета влияния гидрогеологических условий и сейсмического воздействия; использование современных моделей поведения грунтов и критериев прочности.

Применение процедуры оптимизации поверхности скольжения позволяет существенно увеличить надежность получаемых результатов. Показано, что расчет методами предельного равновесия по круглоцилиндрической поверхности скольжения устойчивости оползнеопасных склонов в неоднородных грунтах может рассматриваться только как предварительный, а получаемый при этом коэффициент устойчивости будет завышен. Задача по определению формы критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом запаса не может считаться завершённой без выполнения процедуры ее оптимизации.

Вероятностный анализ позволяет выполнить оценку оползневой опасности (в терминах вероятности развития оползневого процесса) от одного или от сочетания нескольких факторов оползнеобразования. Анализ чувствительности позволяет выполнить прогноз изменения коэффициента устойчивости склона в зависимости от закономерного изменения тех или иных параметров. Совместное использование вероятностного анализа и анализа чувствительности позволяет выполнить прогноз оползневой опасности в терминах вероятности активизации процесса.

6. Проведен комплексный прогноз локальной оползневой опасности с учетом влияния на активизацию оползневого процесса факторов оползнеобразования (подземных вод и сейсмического воздействия).

В работе обосновано, что преобладающую роль при расчете устойчивости склонов может играть либо поровое, либо давление водного потока, в зависимости от фильтрационных свойств грунтов слагающих склон.

Учет гидростатического взвешивания может как уменьшать, так и увеличивать коэффициент устойчивости склона. По этой причине уменьшение удельного веса грунтов за счет данного эффекта (особенно глинистых, в которых вода находится преимущественно в связанном состоянии) требует детального обоснования. Неверный учет этого явления может приводить к неверным, и что особенно критично, завышенным значениям K_y при расчете устойчивости склонов.

Учет сейсмического воздействия может быть осуществлен тремя способами:

- интуитивного подхода;
- псевдостатического анализа;
- динамического анализа.

Применение динамического анализа, позволяет получить более реалистичную оценку результатов сейсмического воздействия на потенциально неустойчивый склон. Он позволяет получить два типа информации, которую можно использовать при оценке оползневой опасности. Во-первых, это оценка изменения порового давления при динамическом воздействии, во-вторых — определение зон возможного разжижения грунта.

7. Выполнен комплексный анализ влияния анизотропных свойств грунтов на устойчивость склонов.

Показано, что при моделировании устойчивости склонов, сложенных анизотропными грунтами, целесообразно рассматривать два типа анизотропии:

– Первый тип анизотропии связан с природной анизотропностью свойств слагающих склон грунтов (литогенетической или структурной анизотропией). Моделирование устойчивости склона со структурной или литогенетической анизотропией позволяет оценить мгновенную устойчивость склона.

– Второй тип анизотропии обусловлен образованием анизотропных свойств при формировании зон скольжения в виде геотехнического горизонта

основных деформаций. Уменьшение коэффициента устойчивости склона за счет данного эффекта можно охарактеризовать как оценку длительной устойчивости.

Модельный анализ общей оценки устойчивости склонов с учетом влияния анизотропии свойств грунтов показал, что она оказывает влияние как на положение расчетной поверхности скольжения, так и на величину коэффициента устойчивости склона.

Подводя итог выполненным исследованиям, следует сделать следующее заключение - комплексное использование современных методик математического моделирования позволяет значительно повысить достоверность оценки и прогноза региональной и локальной оползневой опасности, что подтверждено практическими результатами внедрения изложенной в работе методологии.

ПУБЛИКАЦИИ

Монографии

1. Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Широков В. Н., Артамонова Н. Б., **Фоменко И. К.** Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах. Москва: МГУ, 2003. 261 с.

Учебные пособия

2. Самарин Е. Н., Бершов А. Н., **Фоменко И. К.** Курс лекций по методам статистической обработки информации: Уч. пособие. Москва: МГУ, 2004. 196 с.

Статьи в реферируемых журналах из списка ВАК

3. Зеркаль О. В., **Фоменко И. К.** «Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов», Инженерные изыскания, № 9, 2013.

4. Зыонг М. Х., **Фоменко И. К.**, Пендин В. В., «Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама», Инженерная геология, № 1, 2013. С. 46–54.

5. Зыонг М. Х., **Фоменко И. К.**, Пендин В. В., «Региональный прогноз оползневой опасности на основе морфометрических критериев рельефа (на примере района Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама)», Разведка и охрана недр, № 7, 2013. С. 43–47.

6. Ионов В. Ю., Калинин Э. В., **Фоменко И. К.**, Миронюк С. Г., «Условия формирования подводных оползней в отложениях бровки континентального склона Черного моря в районе п. Архипо-Осиповка», Инженерная геология, № 6, 2012. С. 36–46.

7. Сысоев Ю. А. **Фоменко И. К.**, и др., «Магистральный трубопровод "Малай-Бактыярлык" в Туркменистане: некоторые аспекты инженерно-геологических изысканий», Инженерные изыскания, № 6, 2008. С. 36–40.

8. **Фоменко И. К.**, Будаков Д. А. и др., «Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова по трассе магистрального газопровода "Малай-Бактыярлык"», Инженерные изыскания, № 6, 2009. С. 22–28.

9. **Фоменко И. К.**, Захаров В. С., Самаркин-Джарский К. Г., Сироткина О. Н., «Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов (на примере Краснополянского геодинамического полигона)», ГеоРиск, № 4, 2009. С. 50–55.

10. **Фоменко И. К.**, Пендин В. В., Ионов В.Ю., Зыонг М.Х., «Прогноз оползневой опасности на основе анализа чувствительности», Геология и разведка, № 6, 2013.
11. **Фоменко И. К.**, «Моделирование полей напряжений в массивах анизотропных горных пород», Горный информационно-аналитический бюллетень, Т. 6, 1999. С. 170–172.
12. **Фоменко И.–К.**, «Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов», Инженерная геология, № 6, 2012. С. 44–53.

Публикации в изданиях, входящих в базу РИНЦ

13. Сысоев Ю. А., **Фоменко И. К.** Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» // Вероятностный анализ оползневой опасности. Одесса, 2011. С. 93–98.
14. **Фоменко И. К.**, Зеркаль О. В., «Преимущества методов оценки устойчивости склонов в трехмерной постановке», Геотехника, № 5, 2011. С. 38–41.
15. **Фоменко И. К.**, Сироткина О. Н. Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011» // Комплексная методика расчета устойчивости склонов. Одесса: Черноморье, 2011. Т. 31. С. 88–96.
16. **Фоменко И. К.** Математическое моделирование напряженного состояния инженерно–геологического массива, сложенного анизотропными горными породами // автореферат дис. канд. геол. минер. наук: 04.00.07. Москва, 2001. С. 24.
17. **Фоменко И. К.** Общая классификационная схема методов расчета устойчивости склонов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2012». Одесса: КУПРИЕНКО. 2012. Т. 35. № 3. С. 75–81.
18. **Фоменко И. К.** Этапы развития математических методов оценки устойчивости склонов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2012». Одесса: КУПРИЕНКО. 2012. Т. 48. № 4. С. 85–90.

Публикации на иностранных языках

19. **Fomenko I. K.**, Kalinin E. V., Panasyan L. L. Stress field estimate in the vicinity of the Kola superdeep borehole // The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola superdeep borehole section down to a depth of 12261m. Apatity: Poligraf, 2000. p.149–151.
20. **Fomenko I. K.**, Zerkal O. V. Proceeding of the technical meeting TC207 - Workshop on soil-structure Interaction and Retaining Walls // Three-dimensional slope stability analysis. Dubrovnic. 2011. pp. 125–129.
21. **Fomenko I. K.**, Zerkal O. V. Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety (Engeopro) // Application of probability method during slope stability assessment. Moscow. 2011. pp. 94–95.
22. **Fomenko I. K.**, Zerkal O. V. The International Symposium & 9th Asian Regional Conference of IAEG: «Global View of Engineering Geology and the

Environment» // Application of the probabilistic approach to numerical analysis of slopes. Beijing, China. 2013.

23. Ionov V. Yu., Kalinin E. V., **Fomenko I. K.**, Mironyuk S. G. Regional Slope Stability Assessment Along the Caucasian Shelf of the Black Sea // Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research / 6th International Symposium - Switzerland: Springer International Publishing. 2013. Vol. 34. pp. 201–212.

24. Zerkal O. V., Kalinin E. V., Panasiyan L. L., **Fomenko I. K.** Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety (Engeopro) // Large-scale landslides of the river the river mzymta valley (western caucasus region, russia). //environmental geosciences and engineering survey for territory. Moscow. 2011. pp. 128–129.

Доклады и тезисы на международных и российских конференциях

25. Галкин В. А., **Фоменко И. К.** Материалы международной научно-практической конференции «ГЕОРИСК–2009»: Проблемы снижения природных опасностей и рисков, том II // Риск аварий магистральных нефтепроводов от воздействия опасных геологических процессов (ОГП). Москва. 2009. С. 87–91.

26. Зеркаль О. В., **Фоменко И. К.** Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование. Синтез знаний в естественных науках // Сопоставимость двух- и трехмерного анализа устойчивости склонов. Пермь. 2011. Т. 1. С. 46–49.

27. Зеркаль О. В., **Фоменко И. К.** Труды международной научной конференции: «Многообразие современных геологических процессов и их инженерно-геологическая оценка» // Методы расчета устойчивости оползневых и оползнеопасных склонов. Москва. 2009. С. 30–32.

28. Иванов А. И., **Фоменко И. К.** Материалы V Международной конференции посвященной 90-летию ГГНИ им. академика М. Д. Миллионщикова «Горное, нефтяное, геологическое и геоэкологическое образование в XXI веке» // О напряженном состоянии геомеханической среды в откосах и склонах. Грозный. 2010.

29. Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., **Фоменко И. К.** Новый подход к оценке напряженного состояния массивов анизотропных горных пород // Сергеевские чтения. / Мат-лы годичной сессии Научн. совета РАН по проблемам геоэкологии, инж. геологии и гидрогеологии. 2001. № 3. С. 13–16.

30. Панасьян Л. Л., **Фоменко И. К.** Тр. научной конф. аспирантов и молодых ученых: «Проблемы инженерной и экологической геологии» // Определение тензора упругих констант ортотропных горных пород на основе данных акустополаризационных измерений. Москва, МГУ. 1998. С. 17–18.

31. Спиридонов Д. А., **Фоменко И. К.** Труды международной научной конференции: Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем // Мониторинг оползневых процессов по трассе магистральных трубопроводов. Москва. 2007. С. 67–68.

32. Сысоев Ю. А., **Фоменко И. К.** Материалы IV Общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» // Инженерно-геологическое районирование коридора трассы магистрального газопровода Тавелах-Фуджейра (ОАЭ). Москва. 2008. С. 152–154.

33. **Фоменко И. К.,** Будаков Д. А. Материалы VI Общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» // Нефтепроводная система «Ямал»: инженерно-геокриологические условия, проблемы изучения. Москва. 2010. С. 96–98.
34. **Фоменко И. К.,** Иванов А. И., Волков С. Н. Труды Международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов» // Расчет устойчивости склонов вдоль трассы Центральной кольцевой автомобильной дороги (ЦКАД). Москва. 2010. С. 1761–1765.
35. **Фоменко И. К.,** Сироткина О. Н. Материалы VII Общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» // Современные тенденции в расчете устойчивости склонов. Москва. 2011. С. 78–82.
36. **Фоменко И. К.,** Сироткина О. Н., Самаркин-Джарский К. Г. Расчет устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия // Сб. «Сергеевские чтения». Выпуск 12. Москва. РУДН. 2010. С. 234–240.
37. **Фоменко И. К.** Доклад на Ломоносовских чтениях. Подсекция: Инженерная и экологическая геология // Природа избыточных горизонтальных напряжений в анизотропных массивах горных пород. Москва, МГУ. 2002.
38. **Фоменко И. К.,** Елпашев Г. А., **Фоменко И. К.** Материалы 4 Международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». Вопросы осушения и экология. Специальные горные работы и геомеханика // Технология инженерно-геологической оценки скальных пород и руд для условий разработки открытым способом хромитовых месторождений. Белгород. 1997. С. 208–214.

Статьи в сборниках научных трудов

39. Соколов Л. С., Самаев С. Б., **Фоменко И. К.** Особенности распределения химических элементов в компонентах окружающей среды и здоровье детского населения Москвы // Прикладная геохимия/ выпуск 9: Геоэкологические исследования окружающей среды. Москва, ИМГРЭ, 2013. С.74-84.
40. **Фоменко И. К.,** Калинин Э. В., Панасьян Л. Л. Оценка поля напряжений в окрестности Кольской сверхглубокой скважины // В кн.: Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе КСС до глубины 12261 м. Международная программа геол. Корреляции ЮНЕСКО. (МПК-408). Апатиты: Полиграф, 2000. С. 165–167.
41. **Фоменко И. К.,** Самаев С. Б., Соколов Л. С. Оценка эколого-геохимического риска для здоровья населения г. Москвы // Прикладная геохимия / Ин-т минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов: Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. 2004. № 6. С. 79–84.
42. **Фоменко И. К.** Моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния массива горных пород на примере рудника Скалистый Талнахского рудного узла // МГУ, Вестник НСО. 1996. С. 41–42.