

На правах рукописи

Валькова Евгения Олеговна



**МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ
УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ НА ОСНОВЕ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОПОЛЗНЕВОГО
ПРОЦЕССА**

*Специальность 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазо-
промысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и
геометрия недр*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Бахаева Светлана Петровна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра маркшейдерского дела и геологии, профессор;

Жабко Андрей Викторович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра маркшейдерского дела, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **30 июня 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совет



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Эффективная разработка месторождений полезных ископаемых напрямую зависит от обеспечения устойчивости бортов карьера. Наибольшую опасность при этом представляют оползни, которые наносят значительный материальный ущерб горному предприятию и могут привести к гибели людей.

Регламентация эффективной и безопасной разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом в целом содержится в нормативном документе «Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» от 13 ноября 2020 г. N 439. В «Методических указаниях по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов» (М.: ИПКОН РАН, 2022. – 90 с.) приведено обобщение разработок по этому направлению. Вместе с тем на сегодня практически отсутствуют методики по выделению потенциально оползнеопасных зон борта карьера в плане, что снижает эффективность наблюдательных станций, вследствие непокрытия очага оползня. То же можно сказать об оценке ширины возможного оползня (призмы сползания). Весьма мало освещен вопрос о возможных сценариях протекания оползня для разных углов откоса борта карьера. Указанные неопределенности не позволяют совершенствовать технологии наблюдений за деформациями борта карьера с привлечением современных средств измерений.

Степень разработанности темы исследования

Изучению устойчивости бортов карьеров посвящено большое количество научных трудов, среди них можно выделить ученых, внесших значительный вклад в развитие методов оценки и прогноза оползней: Фисенко Г.Л., Афанасьев Б.Г.

Звонарев Н.К., Зотеев В.Г., Бишоп А., Голушкевич С.С., Борщ-Компаниец В.И., Маслов Н.Н., Попов И.И., Гудман Р. Э., Сапожников В.Г., Пушкарев В.И., Галустьян Э.Л., Окатов Р.П. Пустовойтова Т.К, Туринцев Ю.И., Попов В.Н., Мочалов А.М., Шпаков П.С., Певзнер М.Е., Токмурзин О.Т., Низаметдинов Ф.К., Макаров А.Б., Мустафин М.Г., Жабко А.В., Бахаева С.П., Симонян В.В. и др.

Большой вклад в теорию и практику оценки оползневых процессов с акцентом на изучение инженерно-геологических условий внесли такие ученые, как Мироненко В.А., Норватов Ю.А., Дашко Р.Э., Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А. и др.

Результаты исследований перечисленных авторов составляют основу для проработки данных вопросов. Кроме того, наличие средств моделирования деформационного процесса борта карьера и существенное развитие базы маркшейдерско-геодезических приборов, а также программных комплексов по визуализации и обработке измерений значительно способствуют решению обозначенных задач.

Объект исследования – прибортовой массив борта карьера и его напряженно-деформированное состояние.

Предмет исследования – методы оценки устойчивости борта карьера и наблюдений за деформациями.

Целью работы является повышение безопасности ведения горных работ на карьерах за счет разработки усовершенствованной методики натурных наблюдений за деформациями прибортового массива пород.

Идея работы: разработка методики наблюдений за деформациями борта карьера предусматривает анализ стадий напряженно-деформированного состояния пород, характеризующих формирование оползня, что дает обоснование для выделения потенциально опасных зон и сценариев его возмож-

ного развития, а также учитывается при заложении наблюдательных станций

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих задач:

1. Анализ изученности вопроса о маркшейдерском обеспечении наблюдений за деформациями прибортового массива для оценки устойчивости бортов карьеров;
2. Разработка алгоритмов построения и уточнения цифровых моделей карьеров по данным лидарных и фотограмметрических съемок;
3. Оценка напряженно-деформированного состояния бортов карьеров с целью выделения потенциально опасных зон и сценариев формирования оползневого процесса;
4. Разработка методики маркшейдерских наблюдений за процессом деформирования бортов карьеров и практических рекомендаций для конкретных природных условий.

Научная новизна работы:

1. Разработан алгоритм уточнения цифровых моделей карьеров, позволяющий осуществлять контроль построения по характерным точкам;
2. Разработана методика выделения потенциально оползнеопасных зон на карьерах и классифицирования оползней по сценариям проявления;
3. Разработана методика маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьера, включающая определение мест заложения станции в плане и специфику наблюдений в зависимости от прогнозного сценария развития оползня.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр по пунктам: 3. Технические средства, технологии и методики маркшейдерских геометрических измерений

горных выработок, подземного пространства городов, сдвига и деформации земной поверхности и породных массивов, наблюдения и контроля геомеханического состояния породных массивов, бортов карьеров, откосов уступов и отвалов, выделение и классифицирование зон разной степени опасности; 4. Методы оценки устойчивости подземных выработок, бортов карьеров, откосов уступов и отвалов, а также подземных и наземных сооружений под воздействием горных работ; 9. Методы и системы обработки геологической, маркшейдерской и геофизической информации, а также методы моделирования месторождений, прогнозирования горно-геологических условий, явлений и процессов.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость работы состоит в определении по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния прибортового массива сценариев оползневого процесса, что существенно расширяет представления о природе техногенных оползней. Практическая значимость заключается в разработке методики маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьеров, включающей их проведение с учетом прогнозного сценария оползня в потенциально оползнеопасной зоне карьера.

Полученные результаты могут быть использованы профильными организациями при планировании и проведении работ по мониторингу устойчивости объектов горной промышленности. Изложенные в работе теоретические и методические положения внедрены в учебный процесс при изучении студентами специальных дисциплин в рамках направления подготовки «Горное дело». Результаты диссертационной работы используются в производственной деятельности ООО «НПП «Бента», что подтверждено соответствующим актом о внедрении от 10.03.2025 г.

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось с применением отечественного программного обеспечения по моделированию напряженно-деформированного состояния бортов карьеров, основанного на методе конечных элементов, методов математической статистики, цифрового трехмерного моделирования открытых горных выработок, современных средств маркшейдерско-геодезических измерений и обработки результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Наблюдения за деформациями прибортового массива следует проводить в потенциально оползнеопасных зонах, которые определяются на основе моделирования деформированного состояния массива горных пород с использованием 3D модели, построенной с контролем характерных точек борта карьер.

2. При прогнозной оценке устойчивости бортов карьеров параметр ширины зоны оползня, в дополнении к традиционному подходу, основанному на теории предельного равновесия, целесообразно определять на основе решения плоской задачи теории упругости по условию минимума деформаций сдвига.

3. Маркшейдерские наблюдения следует выполнять с учётом трёх разработанных прогнозных сценариев проявления оползня: «сверху-вниз» для крутых откосов, «снизу-вверх» для пологих и «комбинированный», при котором оползень реализуется частично по 1 и 2 сценарию.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается: корректной постановкой цели и задач диссертационной работы; использованием при моделировании деформаций пород бортового массива протестированных при решении разнообразных задач отечественных программных комплексов (ПК «Плотина», свидетельство о регистрации

программы для ЭВМ RU 2020667291, ПК «Котлован», свидетельство RU 2021613311); положительной оценкой основных результатов исследования на научных конференциях; согласованностью экспериментальных данных на реальных объектах с теоретическими исследованиями; применением современных методов сбора и обработки геопространственной информации (программа для ЭВМ «Деформация», свидетельство RU 2023666272); удовлетворительным согласованием результатов исследований с выводами, полученными другими отечественными и зарубежными исследователями.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях: IV всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), 9-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 2023 г.), XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в: участии в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении маркшейдерских инструментальных наблюдений на карьерах; проведении моделирования напряженно-деформированного состояния прибортового массива; анализе и систематизации полученных экспериментальных

данных; создании трехмерных моделей открытых горных выработок; разработке алгоритмов уточнения цифровых моделей рельефа по облакам точек; анализе и обобщении результатов экспериментальных исследований; апробации результатов исследований на научных конференциях; написании научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 184 страницах машинописного текста, содержит 144 рисунка, 40 таблиц, список литературы из 120 наименований и 3 приложения.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., доценту Мустафину М.Г. за ценные советы и наставления; преподавателям и сотрудникам кафедр инженерной геодезии и маркшейдерского дела Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за всестороннюю помощь на каждом этапе исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследования, раскрыты теоретическая и практическая значимости, а также

сформулированы основные показатели, характеризующие диссертацию.

В первой главе представлен анализ состояния изученности вопроса о наблюдениях за деформациями бортов карьеров, включающий обзор нормативно-технической документации и результаты разработок, на основании чего обоснована актуальность диссертационной работы. Определены подходы к совершенствованию существующих методик прогнозной оценки бортов карьеров. Обозначена необходимость выделения оползнеопасных зон для более точного позиционирования наблюдательных стаций. Намечены пути к выявлению зон в прибортовом массиве, наиболее чувствительных при формировании оползневого процесса. Рассмотрены современные методы сбора геопространственных данных при открытых горных работах. По результатам проведенного анализа сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе разработана методика моделирования открытых горных выработок по данным лидарных и фотограмметрических съемок с обеспечением контроля соответствия характерным точкам. Обозначено использование моделей при анализе напряженно-деформированного состояния пород (НДС) массива горных пород (МГП).

В третьей главе проведено многовариантное моделирование НДС МГП с использованием программного комплекса (ПК) «НЕДРА» (аналог ПК «Котлован») для выделения потенциально оползнеопасных зон (ПООЗ) прибортовых участков. В результате моделирования определены параметры ПООЗ в широком диапазоне геометрических размеров карьеров. Проведено многовариантное моделирование НДС прибортового массива на предмет выявления отличий в процессе деформирования и сценариев развития оползня. Определен алгоритм альтернативного нахождения ширины оползня (призмы сползания).

В четвертой главе на основе полученных результатов разработана методика системных наблюдений за деформациями бортов карьеров. В зависимости от прогнозного сценария оползня предложены схемы станций наблюдений.

В пятой главе разработаны практические рекомендации предлагаемой методики наблюдений на конкретных производственных примерах.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Наблюдения за деформациями прибортового массива следует проводить в потенциально оползнеопасных зонах, которые определяются на основе моделирования деформированного состояния массива горных пород с использованием 3D модели, построенной с контролем характерных точек борта карьера.

Вопрос об определении участков прибортового массива опасных по проявлению оползней всегда был одним из главных на карьерах. На практике нередко возникают ситуации, когда наблюдательную станцию закладывают в одном месте, а оползень происходит в другом.

В нормативно-методических документах регламентируются места заложения наблюдательных станций, но в перечень их характеристик не входит физико-геометрический параметр - зоны прибортового массива, где деформации способствуют проявлению оползней. Выявление этих участков связано с проведением моделирования НДС МГП.

Для моделирования НДС МГП необходимо создание модели карьера. Наиболее эффективными способами для этого на сегодня являются технологии лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки. Вместе с тем анализ показал, что современные комплексы по построению цифровой модели ре-

льефа (ЦМР) не в полной мере могут быть использованы для решения обозначенного вопроса и необходимо решить следующие задачи. Первая заключается в «облегчении» модели, построенной по всем точкам, а вторая - в создании средств контроля её соответствия характерным точкам (границам бровок карьера, уступов).

Первая задача решается за счет применения автоматизированной обработки облаков точек с их классификацией, подразумевающей разделение по вероятной принадлежности к определенному типу объектов. Важнейшим этапом является выделение точек класса «земля». Далее из них оставляют лишь самые важные или «ключевые точки» по условию: отклонение поверхности, построенной по ним от поверхности, построенной по всем точкам, не должно превышать заданной величины. Её значение обычно принимается исходя из требований к точности ЦМР. На заключительном этапе точечная трехмерная модель переходит в триангуляционную поверхность. Однако, возможны варианты расположения элементов, не отвечающие точкам класса «земля». На рисунке 1 показана последовательность исправления ЦМР. Неточность, как в указанном примере, может устраняться в ходе ручного редактирования, однако, с увеличением числа точек до миллионов требуются автоматизированные подходы. Для этого предложены алгоритмы уточнения ЦМР по облакам точек по методу наименьших квадратов, как на основе барицентрических координат (рисунок 2), так и с помощью уравнения плоскости и кратчайшего расстояния до нее. Оба варианта сводятся к сравнению сумм квадратов отклонений точек «земли» в соседних треугольниках и поиску нужного разворота ребер в триангуляции.

Рассмотренные подходы позволяют упростить и ускорить работу по моделированию различных объектов горной промышленности на основе облаков точек (рисунок 3). При-

веденный алгоритм построения модели карьера использован при конечно-элементном анализе НДС МГП.

Решение вопроса о распространении ПООЗ в прибортовом массиве в плане выполнено на основе построения объемных моделей карьеров разных размеров прямоугольной формы в однородном массиве горных пород. В настоящих исследованиях использован ПК «НЕДРА», разработанный научным руководителем автора Мустафиным М.Г. Он реализует метод конечных элементов для решений задач теории упругости и пластичности в 2D и 3D вариантах.

Разработка карьера приводит к изменению НДС вмещающих его пород. Участки прибортового массива оказываются разгруженными вследствие выемки и соответственно смещаются в выработанное пространство в рамках упругих свойств пород. На угловых участках смещения пород в выработанное пространство меньше ввиду наличия естественного упора (торцевой части выработки). Таким образом, к ПООЗ можно относить участки прибортового массива, в которых у поверхности откоса действуют растягивающие деформации, а её границы определять по условию равенства нулю деформаций, т.е. там, где сжимающие деформации переходят в растягивающие (на рисунке 4 ПООЗ обозначена оранжевым цветом).

Автором выполнено многовариантное моделирование (около 200 вариантов) с варьированием угла откоса борта карьера от 30° до 90° , глубиной от 40 до 640 м, длиной от 80 до 2560 м (по нижней бровке) и модуля упругости МГП: 5, 20 и 50 ГПа. Ширина дна карьера отвечала среднему значению рабочей площадки с определенным запасом в 80 м. Вертикальный борт моделировался для сравнительного анализа результатов. Примеры приведены на рисунках 5 и 6. По результатам моделирования определены ПООЗ и составлена таблица 1. Моделированием также выявлено, что модуль упругости пород (E)

при решении вопроса о ПООЗ несущественно влияет на конечные результаты.

Таким образом, рассчитаны размеры ПООЗ, которые могут использоваться при проведении мониторинга деформированного состояния бортов карьеров. Следует при этом отметить, что размеры ПООЗ рассчитаны для однородного горного массива. Зона может быть уменьшена на основе изучения конкретных условий и расчетов коэффициента запаса устойчивости.

2. При прогнозной оценке устойчивости бортов карьеров параметр ширины зоны оползня, в дополнении к традиционному подходу, основанному на теории предельного равновесия, целесообразно определять на основе решения плоской задачи теории упругости по условию минимума деформаций сдвига.

В соответствии с «Правилами обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (2020 г.) при расчете устойчивости борта карьера используют параметр m – ширина призмы возможного обрушения (тела оползня). При рассмотрении однородного массива m вычисляется на основе теории предельного равновесия с использованием следующих параметров: угол, высота откоса, глубина закола на земной поверхности и угол внутреннего трения пород. Фактически m определяется расчетным путем с применением схематизации призмы оползня с поверхностью скольжения. Их вариации приводят к разным значениям m . Соответственно получается некоторая неопределенность расчета коэффициента запаса устойчивости. Надо заметить, что на это обстоятельство обращали внимание многие ученые.

Учитывая важность вопроса об уточнении m , от которого во многом зависит прогнозная оценка возможности возникновения оползня, проведено моделирование НДС МГП.

В отличие от традиционного подхода, параметр m определялся напрямую по картине распределения деформаций в прибортовом массиве пород. Заколы на земной поверхности образуются в результате отрыва в породах. В то же время такие зоны возникают на выделенных площадках при отсутствии касательных напряжений или деформаций сдвига. Тогда, если смоделировать картину распределения деформаций сдвига при разных параметрах борта карьера НДС пород даже в упругой поставке задачи, то зоны с нулевыми значениями деформаций сдвига у земной поверхности будут отвечать местам заколов или параметру m .

Автором выполнено многовариантное моделирование деформированного состояния прибортового однородного массива пород карьера при различных углах и высотах откоса. Использована плоская модель борта карьера. Примеры приведены на рисунках 7 и 8. Результаты моделирования сведены в таблицу 2. Сравнение традиционных значений m и по предлагаемой методике показывает, что разница довольно ощутима. Кроме того, для ряда случаев устоявшийся подход не работает. Таким образом, параметр m можно рассчитывать по приведенной методике дополнительно к традиционной.

3. Маркшейдерские наблюдения следует выполнять с учётом трёх разработанных прогнозных сценариев проявления оползня: «сверху-вниз» для крутых откосов, «снизу-вверх» для пологих и «комбинированный», при котором оползень реализуется частично по 1 и 2 сценарию.

Понимание реализации оползня как смещение породной призмы (тела) по плоскости скольжения не вызывает сомнений. Однако возникают вопросы: какова форма этой плоскости скольжения, как она формируется и как деформируется тело оползня? Они поднимаются исследователями постоянно и обуславливаются фактическими примерами оползней. Так, известный и, пожалуй, самый крупный оползень, зафиксиро-

ванный на карьере Бингем-Каньон (США) в 2013 году, произошел, можно сказать, по традиционному сценарию. Вместе с тем оползни на ряде карьеров произошли непредсказуемо. Это относится к оползням на Коршуновском карьере (Россия) и другим, возникшим без существенных деформаций на земной поверхности вплоть до самой аварии. В этой связи актуальной задачей является обоснование маркшейдерских наблюдений, ориентированных на прогнозный сценарий оползня.

Автором проведено многовариантное моделирование на основе решения упругопластических задач. При этом рассматривался борт карьера, прочность пород которого снижали от устойчивого состояния до его потери. Моделирование выполнено для углов откоса от 30° до 90° .

Общая картина упруго-пластичного деформирования крутого откоса (90°) приведена на рисунке 9а. Видно, что произошло смятие пород (элементов) на нижней бровке борта карьера, верхняя бровка претерпела оседание и сместилась в сторону выработанного пространства. Это свидетельствует о возможности части приконтурного массива к опрокидыванию или еще большему смещению в сторону карьера. При этом отчетливо видно образование закола, место которого хорошо согласуется с результатами моделирования для определения параметра ширины призмы сползания (m). Неупругие деформации возникли на нижней бровке борта. Можно предположить, что дальнейшее деформирование МГП будет происходить за счет прорастания закола, вследствие разрушений на нижней бровке откоса с образованием линии скольжения, а также последующего сползания всей призмы.

Описанный механизм формирования оползня соответствует традиционным. Можно привести классификацию, не относящуюся к техногенным массивам, по которой такие оползни относят к первому типу: блоковые оползни сжатия (по другим классификациям – оползни выдавливания, раздавли-

вания, оседания, выпирания). Представленный механизм можно считать протекающим «сверху-вниз».

Иная картина деформирования наблюдается при угле 30° на рисунке 9в. Заколов не выявлено, но заметны сдвиги у нижней бровки откоса. Эти разрушения формируют блоки (светлые полосы – это участки с низким значением модуля упругости). Фактически происходит разделение заостренной части консоли (борта карьера) за счет упругого восстановления, выпора пород подошвы карьера. Дальнейшее протекание процесса приводит к ситуации, схожей для крутых откосов и соответственно к сценарию «сверху-вниз». Данный сценарий, характерный для пологих откосов, можно назвать протекающим «снизу-вверх».

При углах откоса борта 30° - 60° прогнозный механизм оползня «комбинированный». На рисунке 9б видно, что деформации образовались как в верхней части, так и на нижних бровках борта.

Определение параметров ПООЗ и механизмов оползней позволили разработать схемы наблюдательных станций за деформациями бортов карьеров.

Схема маркшейдерских наблюдений (рисунок 10а) при сценарии развития оползня «сверху-вниз» включает создание свободной деформационной сети, располагающейся только на земной поверхности с охватом всей ПООЗ. Наблюдения следует выполнять со свободных станций способом тахеометрической съемки. Для определения смещений элементов сети между циклами измерений разработана программа для ЭВМ «Деформация» (номер свидетельства: 2023666272), позволяющая сравнивать свободные сети путем выделения смещенных и стабильных элементов (треугольников). Координаты вершин стабильных треугольников приводятся к единой системе координат (рисунок 11).

С целью контроля и в случае отсутствия стабильных элементов используются пункты, на которых выполняются статические спутниковые определения. Тахеометрические измерения следует выполнять с обеспечением нормативной точности 15 мм. Нахождение людей в ПООЗ исключается. В этой связи, наблюдения выполняются в дистанционном режиме.

При сценарии оползня «Снизу-вверх» маркшейдерские наблюдения достаточно проводить по методике наземного лазерного сканирования лишь со дна карьера (рисунок 10в). Для этого на подошве карьера планируется закладывать не менее трех пунктов планово-высотного обоснования НЛС с расчетом последующего охвата ПООЗ, а именно нижних уступов склоновой части борта.

При комбинированном механизме оползня маркшейдерские наблюдения следует проводить в одной системе координат и высот, как на земной поверхности аналогично схеме «сверху-вниз», так и на подошве нижнего уступа, таким образом, чтобы максимально охватить призму обрушения (рисунок 10б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено решение актуальной научной задачи разработки комплексной методики натурных маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьеров в ПООЗ, опирающейся на геомеханический анализ с выделением сценариев оползневого процесса, что имеет важное значение в горном деле при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

По результатам исследований, представленных в диссертационной работе, сделаны следующие основные выводы и рекомендации:

1. На основе выполненных исследований разработаны алгоритмы уточнения цифровых моделей карьеров по данным лидарных и фотограмметрических съемок, что позволяет

упростить и ускорить работу по моделированию открытых горных выработок и использовать модели при анализе НДС пород.

2. По результатам многовариантного моделирования на объемных моделях карьера разработаны параметры ПООЗ, в которых при коэффициенте запаса устойчивости менее нормы следует организовать маркшейдерские наблюдения.

3. На основе моделирования бортов карьеров в плоской постановке задачи упругости определен параметр ширины призмы оползня, который предлагается в качестве дополнительного использовать при расчете коэффициента запаса устойчивости, вследствие адаптированности алгоритма его расчета к широко используемым классическим принципам.

4. Разработаны сценарии оползневого процесса: «сверху-вниз», «снизу-вверх» и «комбинированный», расширяющие представления об оползнях и позволяющие осуществлять репрезентативные маркшейдерские наблюдения.

5. Предложены технологические схемы маркшейдерских наблюдений с учетом прогнозного сценария проявления оползня. Разработана специальная программа по оценке деформаций «Деформация», позволяющая сравнивать деформации по предыдущему и текущему циклам.

6. Разработанные практические рекомендации по выделению ПООЗ и проведению наблюдений согласуются с результатами исследований, выполненными независимыми специалистами при решении задач устойчивости бортов карьеров.

7. Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на разработку комплексной методики наблюдений за устойчивостью бортов карьеров с учетом горногеологических условий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Мустафин, М.Г. Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов ка-

рьеров / М.Г. Мустафин, **Е.О. Валькова**, В.А. Вальков // Маркшейдерский вестник. - 2022. - № 3(148). - С. 13-18.

2. Вальков, В.А. Методика уточнения цифровых моделей рельефа открытых горных выработок по материалам лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В.А. Вальков, **Е.О. Валькова**, М.Г. Мустафин // Маркшейдерия и недропользование. - 2023. - № 3(125). - С. 40-52.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Вальков, В.А. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В.А. Вальков, К.П. Виноградов, **Е.О. Валькова**, М.Г. Мустафин // Геодезия и картография. - 2022. - Т. 83, № 11. - С. 40-49. DOI:10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.

4. Мустафин, М.Г. Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров / М.Г. Мустафин, **Е.О. Валькова** // Уголь. - 2024. - № 7. - С. 55-61. DOI:10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.

5. Выстрчил, М.Г. Анализ деформационных процессов по данным маркшейдерских лазерно-сканирующих и фотограмметрических съемок / М.Г. Выстрчил, Д.З. Мукминова, Т.И. Балтыжакова, В.Г. Парамонов, **Е.О. Валькова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 78-98. – DOI 10.25018/0236_1493_2025_2_0_78.

Публикации в прочих изданиях:

6. **Валькова, Е.О.** Комплексная методика наблюдений за деформациями бортов карьеров // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. – 2022. – С. 7-9.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023666272 Российская Федерация. Программа Деформация. Заявка № №2023664597: заявл. 12.07.2023; опубл. 27.07.2023 / М.Г. Мустафин, Е.О. Валькова; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

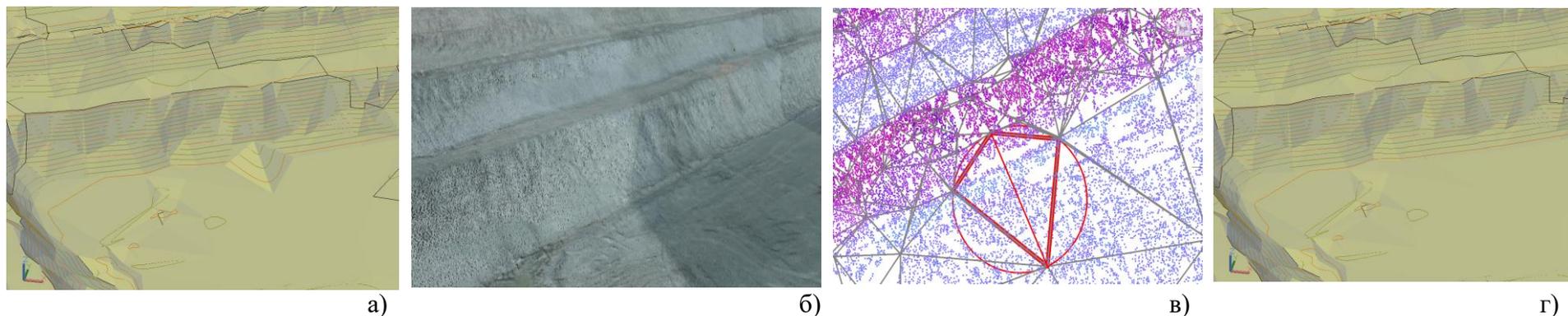
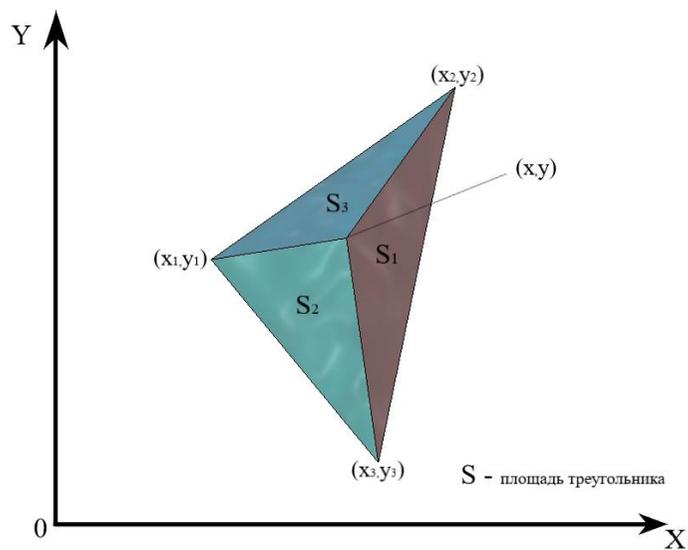


Рисунок 1 – Последовательность исправления ЦМР: а – артефакт ЦМР, требующий исправления; б – фрагмент облака точек, на котором видно отсутствие артефакта; в – видно, что условие Делоне выполняется, однако в данном случае ребро необходимо перестроить; г – исправленная ЦМР.



$$\alpha = \frac{S_1}{S}; \beta = \frac{S_2}{S}; \gamma = \frac{S_3}{S};$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3,$$

где (α, β, γ) – барицентрические координаты, S_1, S_2, S_3 – площади треугольников

Рисунок 2 – Геометрический смысл барицентрических координат

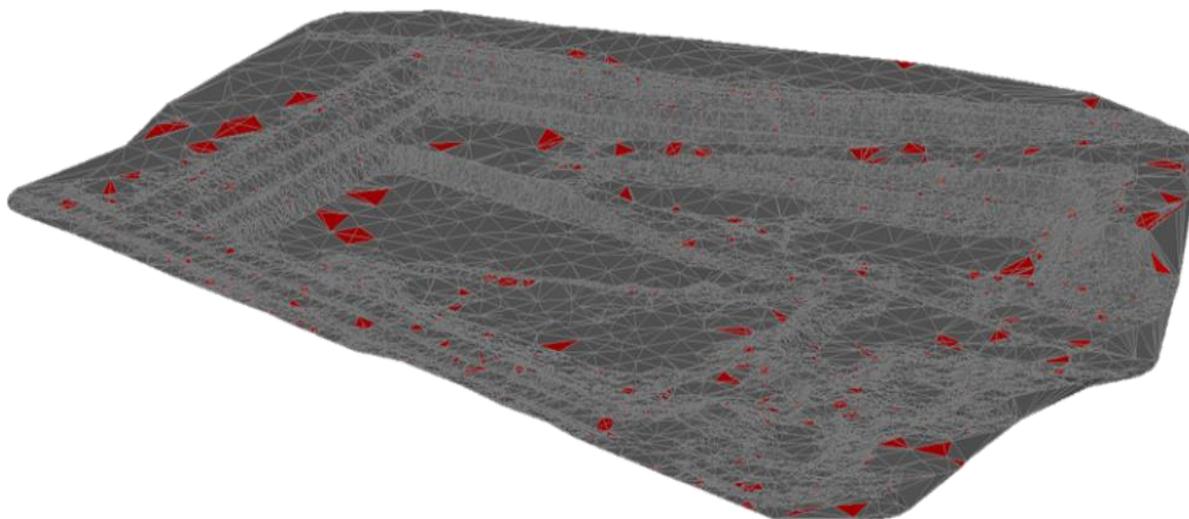


Рисунок 3 – Модель карьера (красным выделены перестроенные области)

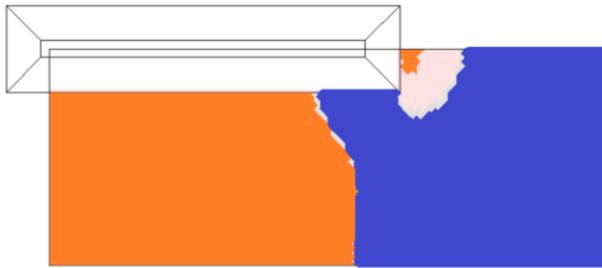


Рисунок 4 – Принципиальная схема определения ПООЗ (оранжевым цветом обозначена ПООЗ)

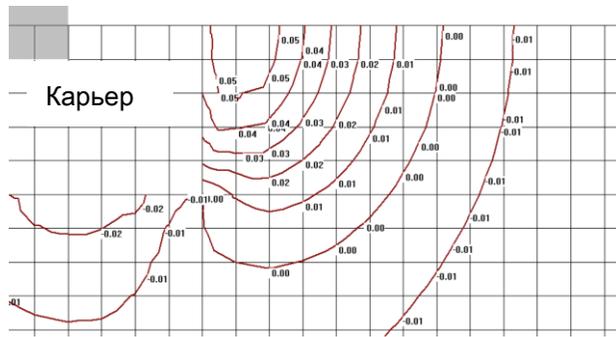


Рисунок 5 – Распределение горизонтальных деформаций, действующих в направлении лево-право (пример 1): карьер в виде квадрата со стороной на уровне подошвы 80 м, глубиной 160 м и с углом откоса борта карьера 45°. Модуль упругости пород (E) 5 ГПа. Видно, что влияние торцевых участков существенно, деформации имеют знак минус, что отвечает сжатию. Из этого следует, что в карьере, размером на поверхности (по верхней бровке) 400 м и с углом откоса 45°, оползни в отсутствии усугубляющих геологических факторов (слабые прослойки, обводненность, трещиноватость и т.д.) маловероятны.

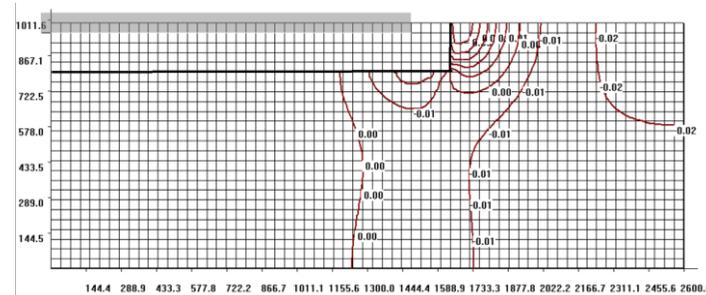


Рисунок 6 – Распределение горизонтальных деформаций, действующих в направлении лево-право (пример 2): Длина карьера 2960 м (1480 м модель), угол откоса борта карьера 45°. Глубина карьера 160 м. Модуль упругости пород (E) = 5 ГПа. Деформации сжатия (-) распространяются на расстоянии до 250 м (от торцевой стороны). На прибортовых участках (длинная сторона), где деформации переходят на растяжение возможны оползни и следовательно это ПООЗ.

Таблица 1 – Размеры ПООЗ

Глубина карьера	Длина карьера, м					
	80	160	320	640	1280	2560
Угол откоса 30°						
40	- (сжатие)	-	-	-	250	250
80	-	-	-	200	210	210
160	+ (растяжение)	+	+	+	+	90
320	+	+	+	+	+	+
640	+	+	+	+	+	+
Угол откоса 45°						
40	-	-	-	-	320	320
80	-	-	-	-	320	320
160	+	+	+	-	200	250
320	+	+	+	+	+	60
640	+	+	+	+	+	+
Угол откоса 68°						
40	-	-	-	-	330	340
80	-	-	-	-	340	340
160	+	+	+	-	230	300
320	+	+	+	-	+	+
640	+	+	+	+	+	+
Угол откоса 90°						
40	-	-	-	-	360	360
80	-	-	-	-	360	360
160	+	+	-	-	360	360
320	+	+	+	-	380	440
640	+	+	+	+	+	+

Видно, что при глубине 40 м и длинах карьера до 640 м ПООЗ не обнаруживается. При 1280 м появляется ПООЗ размером 250 м. В данном случае ПООЗ приурочена к средней части выработки. При глубине 160 м и длине карьера 2560 м ПООЗ составляет 2560 – 90 = 2470 (м). Когда в породах превалирует сжатие (на глубинах 40-80 м), то ПООЗ возникает в средней части выработки, а при обратной ситуации (растяжение) ПООЗ формируется вычитанием из размера выработки зоны сжатия (2560 – 90 м).

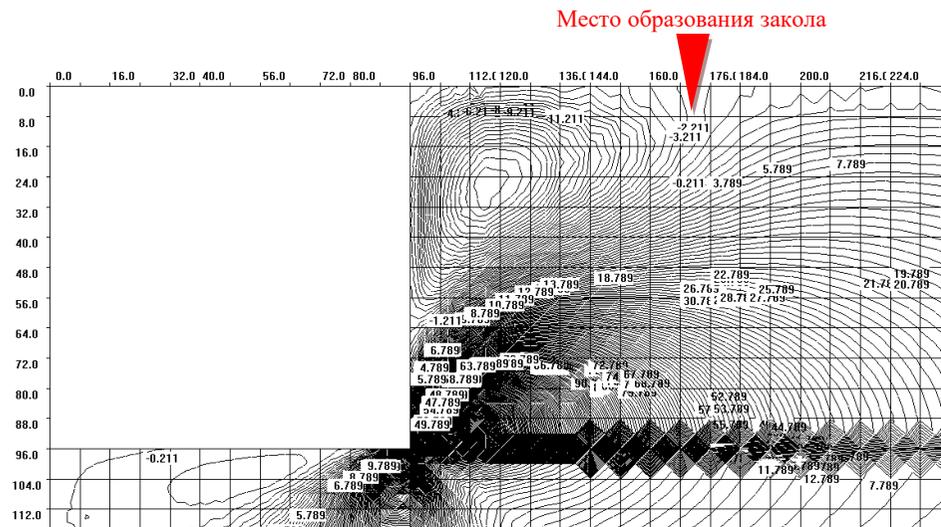


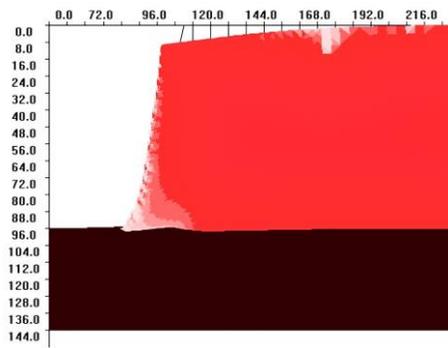
Рисунок 7 – Распределение деформаций сдвига (МПа, угол откоса 90°)



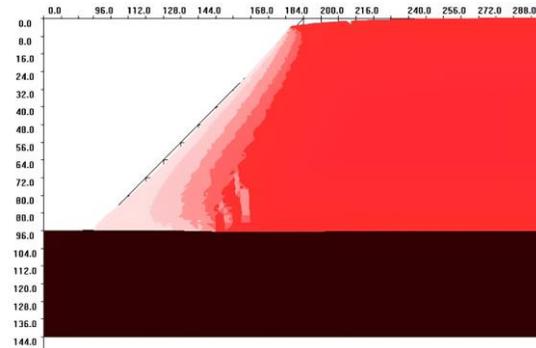
Рисунок 8 – Распределение деформаций сдвига (МПа, угол откоса 60°)

Таблица 2 – Сравнение размеров призмы сползания m (где ϕ° - угол внутреннего трения, H – высота борта) (синим цветом выделены размеры, полученные по формуле Г.Л. Фисенко, красным цветом выделены размеры по предложенной методике)

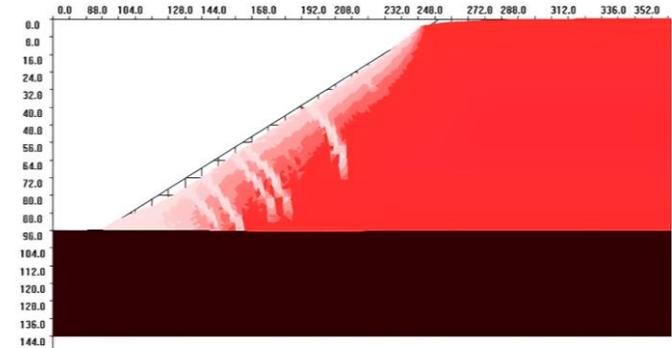
ϕ° H, m	20					30					40				
	m, m														
	Угол наклона борта														
	30°	40°	50°	60°	90°	30°	40°	50°	60°	90°	30	40°	50°	60°	90°
50	5	11	15	18	32	-	3	8	12	26	-	-	2.0	6.4	21
	12	14	18	23	70	12	14	18	23	70	12	14	18	23	70
150	25	42	53	64	102	-	16	30	43	84	-	-	12	25	68
	26	27	30	33	112	26	27	30	33	112	26	27	30	33	112
250	46	73	92	109	172	-	30	54	74	142	-	-	22	44	114
	36	40	45	53	194	36	40	45	53	194	36	40	45	53	194
350	66	104	131	155	242	-	44	77	105	199	-	-	33	62	161
	44	54	62	72	280	44	54	62	72	280	44	54	62	72	280
450	86	135	170	200	312	-	57	100	136	257	-	-	43	81	208
	53	67	76	86	366	53	67	76	86	366	53	67	76	86	366
550	106	166	209	246	382	-	70	123	166	315	-	-	53	100	254
	60	79	85	98	490	60	79	85	98	490	60	79	85	98	490
650	127	197	247	291	452	-	84	146	198	373	-	-	63	118	300
	64	81	93	113	535	64	81	93	113	535	64	81	93	113	535
750	147	228	286	337	522	-	98	169	228	430	-	-	74	137	348
	74	90	107	129	630	74	90	107	129	630	74	90	107	129	630
850	167	259	325	382	592	-	111	192	259	488	-	-	84	156	394
	94	110	125	142	730	94	110	125	142	730	94	110	125	142	730



а) сценарий «сверху-вниз» - при углах наклона борта 90°-60°

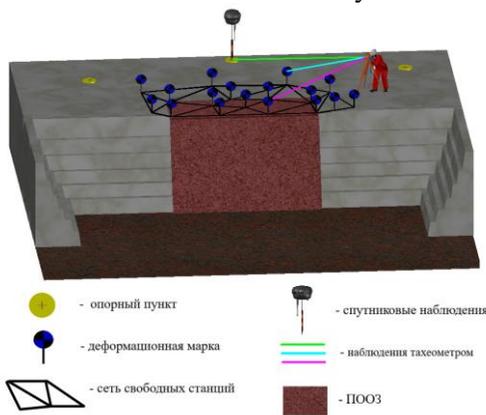


б) сценарий «комбинированный» - при углах наклона борта 60°-30°



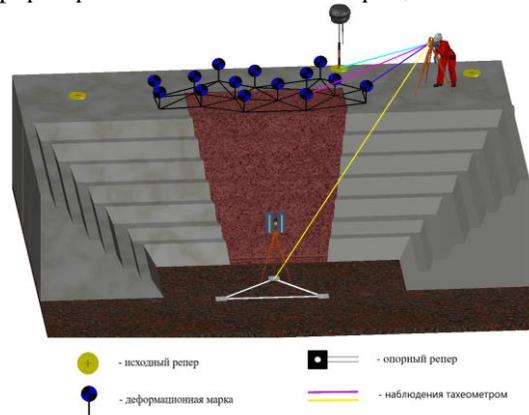
в) сценарий «снизу-вверх» - при углах наклона борта менее 30°

Рисунок 9 - Сценарии формирования оползневой массы в зависимости от угла наклона борта



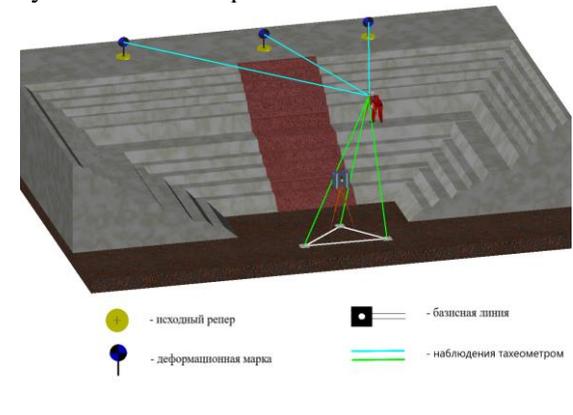
- - опорный пункт
- - деформационная марка
- сеть свободных станций
- спутниковые наблюдения
- наблюдения тахеометром
- ПООЗ

а) сценарий «сверху-вниз»



- - исходный репер
- - деформационная марка
- опорный репер
- наблюдения тахеометром

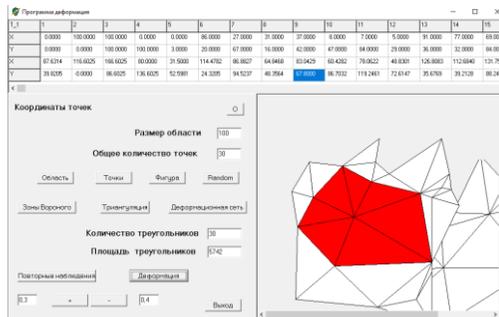
б) сценарий «комбинированный»



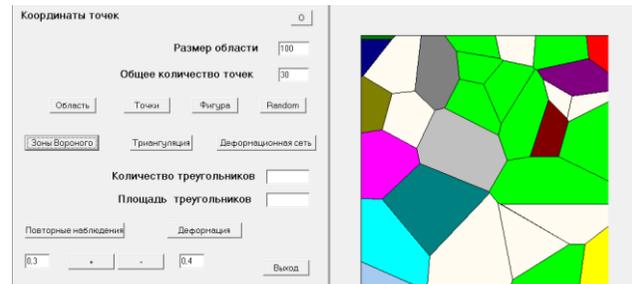
- - исходный репер
- - деформационная марка
- базисная линия
- наблюдения тахеометром

в) сценарий «снизу-вверх»

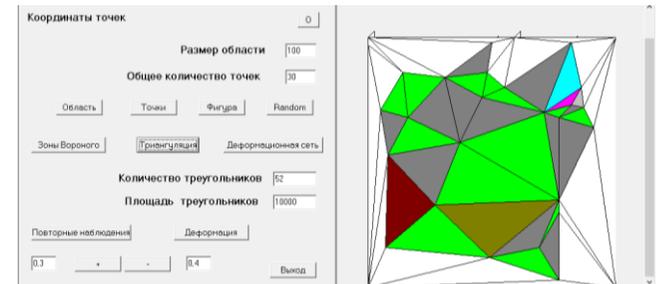
Рисунок 10 - Схемы маркшейдерских наблюдений в зависимости от сценариев оползневой массы



а) деформированные элементы деформационной сети



б) создание диаграммы Вороного
Рисунок 11 – Программа для ЭВМ «Деформация»



в) создание триангуляции