

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Кожаева Жениса Турсуналиевича на тему: «Исследования процессов сдвижения в ослабленных зонах месторождения на основе геодезических и космических технологий», представленной на соискание степени доктора философии PhD по специальности 6D071100 – «Геодезия»

Актуальность темы исследований. Нарастание интенсивности освоения месторождений полезных ископаемых сопровождается проявлениями деформационных процессов, не вписывающихся в современные представления о сдвижении массива горных пород. Так например, в настоящее время в Казахстане и России (шахта «Красноярская» ОАО «СУЭК-Кузбасс», АО «Казахмыс» и др.) наблюдаются провалы на земной поверхности, не прогнозируемые по нормативным методикам. Кроме того, резко возросли скорости выемки полезного ископаемого, что также вносит вопросы по оценке реакции земной поверхности на эти воздействия. Такая тенденция носит общемировой характер, сопровождающийся ростом интенсивности негативных проявлений на земной поверхности на территориях разработки месторождений полезных ископаемых. Ярким примером может служить Жезказганское рудное месторождение. На протяжении многих десятилетий в результате отработки залежей полезного ископаемого образовались густая сеть различных подземных горных выработок. Для увеличения объемов добычи меди, при выемка залежей приходится осваивать все более глубокие горизонты в неблагоприятных и сложных горно-геологических условиях. В ряде случаев, это приводит к разрушению целиков и обрушению налегающей толщи, вплоть до земной поверхности. В этих зонах дальнейшая выемка запасов полезных ископаемых запрещена в соответствии с правилами промышленной безопасности ведения горных работ. Однако, под зонами обрушения залегают значительные запасы полезных ископаемых, которые можно не терять при условии надежного прогнозирования процесса сдвижения земной поверхности на основе геомеханического мониторинга.

В этой связи актуальной задачей является повышение достоверности определения сдвижения земной поверхности с помощью принципиально новых средств измерений, которые усовершенствуют геомеханические методы наблюдений по определению и прогнозированию деформационных процессов горного массива.

Диссертационная работа выполнена на основе исследований по проекту: №1059/ГФ4 «Разработка полезных ископаемых в ослабленных зонах с сопровождением геомеханического мониторинга на основе инновационных маркшейдерских, топографо-геодезических и аэрокосмических технологий» на Анненском месторождении АО «Казахмыс».

Цель работы заключается в разработке комплексной системы наблюдений за геомеханическими процессами сдвижения земной поверхности в ослабленных зонах месторождения на основе геодезических и космических технологий.

Идея работы заключается в технологии построения ситуационных карт на основе геомеханического мониторинга земной поверхности в ослабленных зонах месторождения с применением геодезических и космических технологий.

Основные задачи исследования:

- анализ существующих методов геомеханического мониторинга при исследовании провалоопасных зон земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых;

- разработка рационального метода построения карт смещения земной поверхности на ослабленных зонах месторождения с использованием результатов космической радиолокационной интерферометрии.

- создание трехмерной модели геомеханического состояния горного массива, учитывающей условия образования провалов на земной поверхности;

- разработка способа зонного районирования земной поверхности месторождения по степени опасности к обрушению.

- практическая реализация разработанных методов и рекомендации по прогнозированию участков возможных техногенных нарушений и мер по их своевременному предотвращению при ведении горных работ.

Объект исследования. Анненское месторождение медных руд ТОО Корпорация «Казахмыс».

Методика исследований заключается в литературном обзоре и практическом опыте по исследованиям геомеханических процессов, методологии проведения геомеханического мониторинга, применении современных геодезических приборов, комплексного анализа и математических методов обработки результатов, и использования ГИС технологий.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- предложен метод построения цифровой карты смещения земной поверхности на подработанных участках на основе комплексного использования результатов аэрокосмических снимков дифференциальной радиолокационной интерферометрии и топографо-геодезических наблюдений;

- получена графо-аналитическая зависимость на основе результатов измерения деформационных процессов, которая позволяет получать ожидаемые предельно-допустимые деформации в зависимости от глубины и мощности рудных тел, позволяющие выбрать рациональные параметры горных выработок для повышения эффективности и безопасности горных работ.

Научное значение работы заключается в создании нового перспективного подхода для управления ведением горными работами в ослабленных зонах горных пород на основе использования инновационных технологий сбора и обработки геопространственных данных. В совершенствовании методологии по разработке карт смещений земной поверхности на участках ведения горных работ на основе результатов космической радиолокационной интерферометрии и геодезических наблюдений.

Практическая значимость. Состоит в разработке и комплексном применении инновационных методов маркшейдерско-геодезических наблюдений, GPS наблюдений и космической радиолокационной интерферометрии, основанной на использовании систем радиолокационного

зондирования нового поколения (TerraSarX, CosmoScyMed), а также данных наземных маркшейдерско-геодезических измерений в геоинформационной среде для построения ситуационной (непрерывной) карты провалоопасных зон земной поверхности.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- метод построения цифровой карты сдвижения земной поверхности на подрабатываемых участках горных работ с использованием результатов данных аэрокосмических снимков, дифференциальной радиолокационной интерферометрии и топографо-геодезических наблюдений;

- графо-аналитическая зависимость, полученная на основе результатов измерения деформационных процессов, для определения ожидаемых предельно-допустимых величин деформаций в зависимости от глубины и мощности разработки.

Реализация результатов работ. Основные положения диссертационной работы рекомендованы для использования при планировании горных работ на Анненском руднике, проведения геомониторинга за возможными процессами сдвижения земной поверхности на провалоопасных участках, для прогнозирования и предотвращения опасных ситуаций при ведении добычных работ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции молодых ученых «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2014); 15th international Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGM 2015, (Albena Resort, Bulgaria, 2015); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, 2016); научно-техническом совете Анненского рудника (г. Сатпаев, 2016); Международной научно-технической конференции «Современный научный потенциал и перспективные направления теоретических и практических аспектов» (Санкт-Петербург, 2017); Международной научно-практической конференции «научное и кадровое сопровождение инновационного развития горно-металлургического комплекса» (Алматы, 2017); Международных Сатпаевских чтений «Научное наследие Шахмардана Есенова»(2017), научном семинаре кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» (2017 ж).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 публикаций, в том числе 6 статей – в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК; 1 статья – в журнале, входящем в базу данных Scopus, 9 статей на международных конференциях из них 3 статьи ближнего и дальнего зарубежья, 6 статьи по РК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, 125 страниц машинописного текста, 85 рисунков, 17 таблиц, заключения, 111 списка литературных источников и 5 приложений.

Первая глава посвящена современному состоянию мониторинга за деформационными процессами и литературному обзору по совершенствованию методов геомеханического мониторинга.

На горных предприятиях усложняются горно-геологические условия месторождения и добыча руд выполняется на менее благоприятных участках месторождений. С глубиной отработки месторождения, как правило, снижается содержание полезных компонентов и увеличивается напряженно-деформированное состояние горного массива. На многих месторождениях СНГ и Казахстана при отработке месторождений подземным способом в течение многих лет создаются отработанные пространства, которые приводят к разрушениям предохранительных целиков, обрушению кровли и сдвигению земной поверхности. Такие факторы, как усложнение горно-геологических условий, снижение содержаний полезных компонентов, увеличение потерь руды и обширные сдвигения горных пород, оседание и обрушение земной в целом приводит к росту издержек производства.

Такой обширный перечень основных факторов, определяющих процесс деформирования дневной поверхности при разработке месторождений в настоящее время достаточно изучен и приняты ряд мер по их устранению.

Большой вклад в изучении геомеханических процессов внесли ученые горняки СНГ и Казахстана – Трубецкой К.Н., Машанов А.Ж., Ракишев Б.Р., Иофис М.А., Турчанинов, Фисенко Г.Л., Попов И.И., Борщ-Компониец И.А., Попов В.Н., Макаров А.Б., Ержанов Ж.С., Буктуков Н.С., Нурпеисова М.Б., Низаметдинов Ф.К., Касымханова Х.-К.М., Шамганова Л.С., Бекбергенов Д.К. и многие другие.

В рассмотренных научных исследованиях изложены результаты современного состояния решаемой проблемы в области геомеханического мониторинга, связанные с сдвижением горных пород и оседанием земной поверхности в условиях подземных и открытых горных работ. Ими рекомендованы методы оценки деформационных процессов, обеспечивающие наиболее рациональные методы управления напряженно-деформированным состоянием горного массива при разработке месторождений.

В «ЕПОН РК» ст. 424. отмечено о необходимости производить при разработке месторождений систематическое наблюдение за состоянием недр, горных выработок, откосов уступов и отвалов, потолочин, почвы и целиков с целью своевременного выявления в них деформаций для обеспечения безопасности ведения горных работ.

В процессе разработки месторождений добычные работы должны в обязательном порядке сопровождаться геологическими и маркшейдерскими наблюдениями, т.е.:

-выполнять в полном объеме и на качественном уровне установленную геологическую и маркшейдерскую документацию;

-выполнять маркшейдерские работы для обеспечения рационального и комплексного использования полезных ископаемых, эффективного и безопасного ведения горных работ, охраны зданий и сооружений от влияния горных разработок;

-постоянно проводить наблюдения за сдвижением земной поверхности, устойчивостью прибортового горного массива карьера для обеспечения промышленной безопасности при ведении горных работ.

Таким образом, по результатам совместных исследований геомеханической и геолого-маркшейдерской службами горного предприятия, проведены специальные наблюдения за деформационными процессами земной поверхности и горного массива. На примере отработки Анненского месторождения, где глубина отработки рудных залежей превышает более 450 м, были рекомендованы нами ряд разработок, по снижению НДС с целью обеспечения безопасности ведения горных работ и выемки запасов полезных ископаемых. В частности, при выемки запасов полезного ископаемого камерно-столбовой системой, были предложены рациональные схемы отработки предохранительных целиков, что позволило получить дополнительные запасы добычи меди.

Во второй главе приведены способы проведения геомеханического мониторинга деформации земной поверхности на Анненском месторождении.

Основными способами проведения геомеханических наблюдений на Анненском месторождении являлись:

1. Геомеханический мониторинг;
2. Космический интерферометрический мониторинг;
3. Инструментальный мониторинг.

В последнее время все большее распространение для определения вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности получают методы космической радиолокационной интерферометрии (КРИ), при которой фиксируется амплитуда и фаза, отраженного от поверхности радиосигнала.

Принципиальное преимущество КРИ перед другими методами мониторинга вертикальных и плановых деформаций земной поверхности заключается в прямом замере различий в рельефе, произошедших за период между двумя (тремя, четырьмя) разновременными космическими съемками. Получаемый в результате интерферометрической обработки файл смещений отображает произошедшие изменения рельефа изучаемой земной поверхности, возникшие в результате различных природных и техногенных процессов.

Интерферометрическая методика мониторинга подвижек земной поверхности предполагает наличие пары SAR изображений, снятых с двух близких, но разнесенных по времени, локально параллельных орбит космического аппарата.

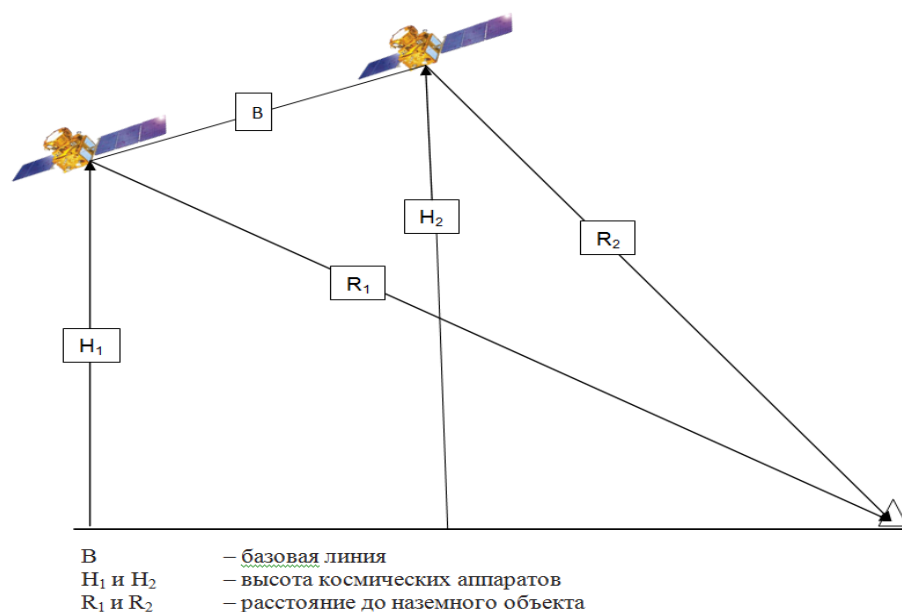


Рисунок 1 – Пространственное положение радиолокаторов, изображения с которых образуют интерферометрическую пару

Каждое радиолокационное изображение интерферометрической пары (или цепочки) содержит амплитудный и фазовый слой. Амплитудный слой более пригоден для визуального анализа. Результирующая фаза Φ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев изображений интерферометрической пары, состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_n, \quad (1)$$

где: Φ_{topo} – фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами;

Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками;

Φ_{atm} – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала;

Φ_n – вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Это свойство интерферометрической разности фаз позволяет измерять подвижки земной поверхности на величины, сравнимые с длиной волны радиолокатора, т.е., на сантиметры или даже миллиметры.

Для построения интерферограммы по паре радиолокационных космических снимков используются лицензионные программные продукты (Gamma, D-InSAR (ERDAS), PhotomodRadar, SARscape (Envi), и т.д.), позволяющие, в том числе, создавать высокоточные и разномасштабные цифровые модели рельефа, а также ряд специализированных карт, отображающих количественную и качественную информацию о стабильности земной поверхности.

В результате проведенных работ была построена карта смещений земной поверхности территории Анненского рудника, на которой были зарегистрированы смещения почв и грунтов в мульдe просадки до 5 см.

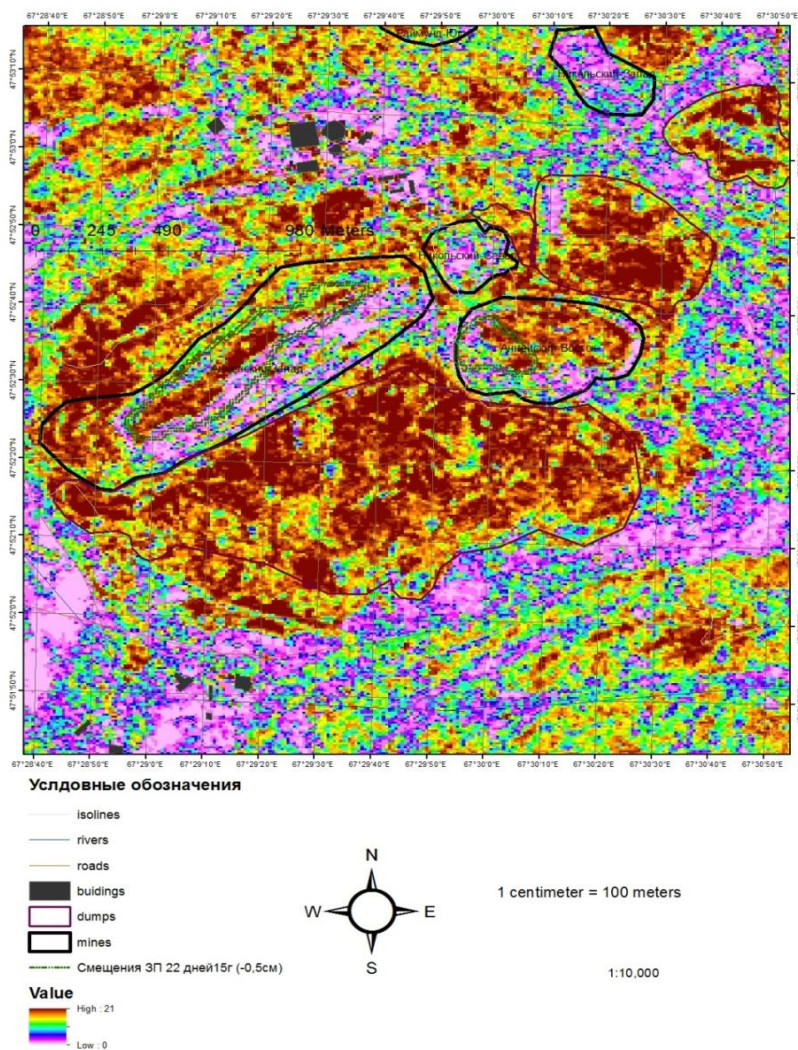


Рисунок 2 – Результаты когерентного анализа тандемной пары радиолокационных снимков (17 сентября и 9 октября 2015 года).

Таким образом, установлено, что космическая радиолокационная интерферометрия относится к одним из важнейших решений комплексной системы мониторинга за состоянием и построением непрерывной ситуационной карты деформаций земной поверхности.

В третьей главе приводится применение методов дифференциальной радиолокационной интерферометрии для определения деформации ослабленных зон на основе использования аэрокосмических снимков.

Рассмотрена геоинформационная технология построения карты смещений земной поверхности дифференциальной интерферометрии (ДИ) для территории Анненского рудника Жезказганского месторождения.

Интерферометрия комбинирует комплексные изображения, зафиксированные антеннами под различными углами наблюдения или в разное

время. По результатам сравнения двух снимков одного и того же участка местности получают интерферограмму, представляющую собой сеть цветных полос, ширина которых соответствует разности фаз по обеим экспозициям. Благодаря высокой частоте излучения подвижки регистрируются с точностью миллиметры-первые сантиметры. Все данные съемок представляются в цифровом виде, что обеспечивает объективность и однозначность интерпретации.

Каждая точка комплексного снимка может быть описана в общем виде как

$$Z(x, y) = I(x, y)e^{i\varphi(x, y)}, \quad (2)$$

где I – интенсивность, приходящаяся на нее, φ – фаза точки x и y координаты.

В результате определение точек комплексного снимка позволяет определить ключевую величину при построении разностно-фазовой картины интерферометрическую когерентность, которая показывает степень декорреляции изображений:

$$\gamma = \frac{[\sum S_1(x) * S_2(x)]}{\sqrt{\sum [S_1(x)]^2 * \sum [S_2(x)]^2}}, \quad (3)$$

где S_1 и S_2 значения фаз соответствующих пикселей двух изображений.

Интерферометрическая когерентность принимает значения от 0 до 1, она приближается к нулю в случае полной декорреляции изображений, когда информацию из интерференционной картины извлечь невозможно, и равна единице в случае идеальной корреляции. Чем выше значение γ , тем надёжнее фазовые измерения, прочитываемые на интерферограмме.

Для лучшей визуализации интерферограммы обычно кодируются в цвете. Один цветовой цикл соответствует фазовому циклу π до $+\pi$.

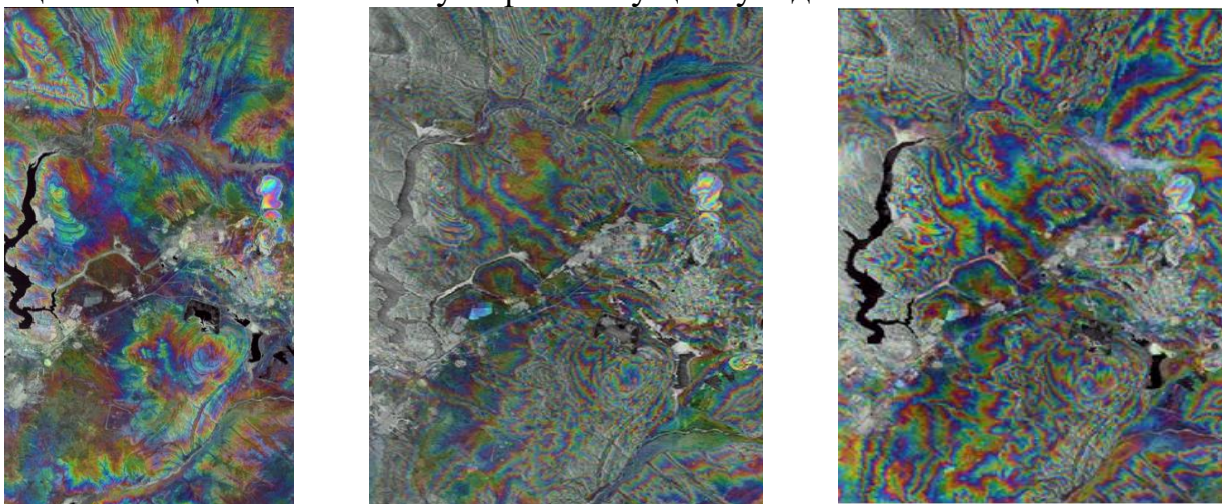


Рисунок 3 – Примеры интерферограмм, построенных по парам радиолокационных космических снимков космического аппарата TerraSAR-X и COSMO-SkyMed

На рисунке 3 приведены примеры интерферограмм, построенных по парам радиолокационных космических снимков космического аппарата TerraSAR-X с временной базой 351 день (А), COSMO-SkyMed с временной базой 16 дней (В) и COSMO-SkyMed с временной базой 16 дней (С). Три различные интерферограммы иллюстрируют зависимость яркости и непрерывности интерферометрических полос от параметров съемки.

Для получения карты смещений были использованы дифференциальная интерферометрия. Это способствовало выявлению смещений земной поверхности, которое проводилось с использованием радарных снимков с космического аппарата TerraSAR-X с временной базой девять месяцев.

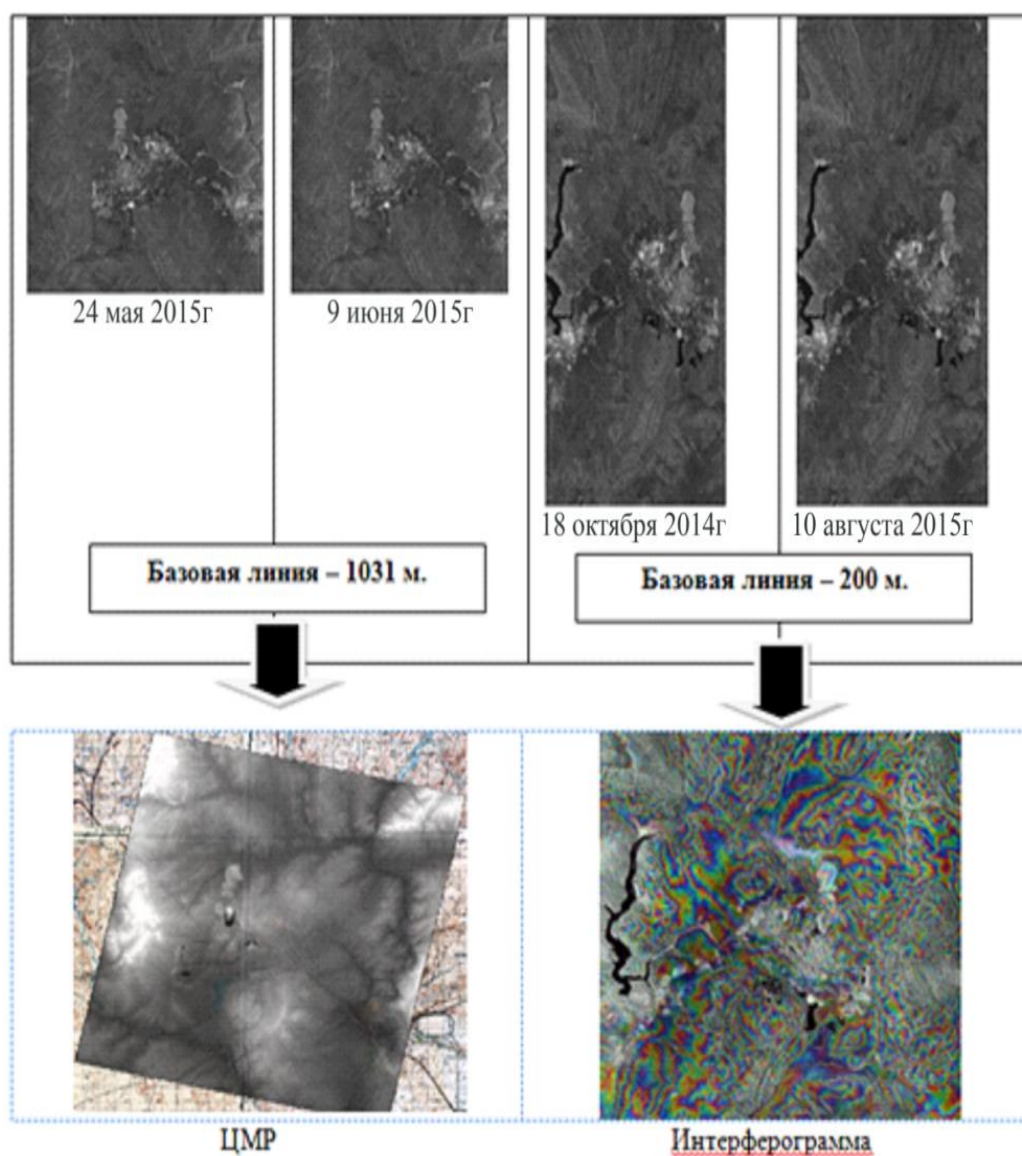


Рисунок 4 – Генерация ЦМР и интерферограммы

Контуры показывают величины вертикальных смещений земной поверхности в сантиметрах.

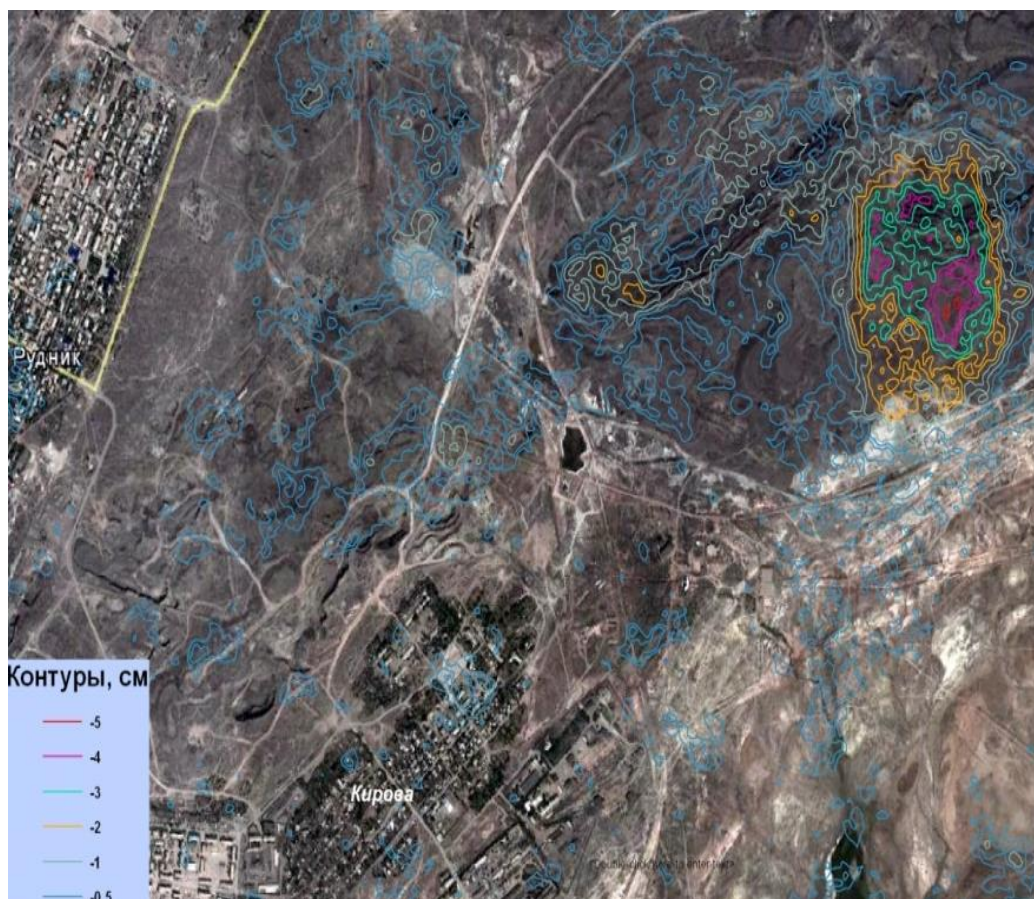


Рисунок 5 – Карта смещений земной поверхности на Анненском месторождении

Максимальная абсолютная величина просадки земной поверхности в пределах мульды просадки Анненского рудника с октября 2014г по август 2015г составила 0.8 см.

Сравнительный анализ результатов дифференциальной интерферометрии и сопоставление результатов проседания земной поверхности, полученных методом дифференциальной интерферометрии с данными маркшейдерских измерений за период 2011-2016 гг. по профилю, показал достаточно высокую корреляцию. На рисунке 6 приведена схема расположения профиля на результирующей карте смещений, полученной из интерферометрических измерений и величины смещений вдоль этого профиля. По данным интерферометрических измерений в точке репера 27 абсолютная величина просадки земной поверхности с октября 2014г по август 2015г составила 0.8 см, а по наземным измерениям это значение равно 1 см.

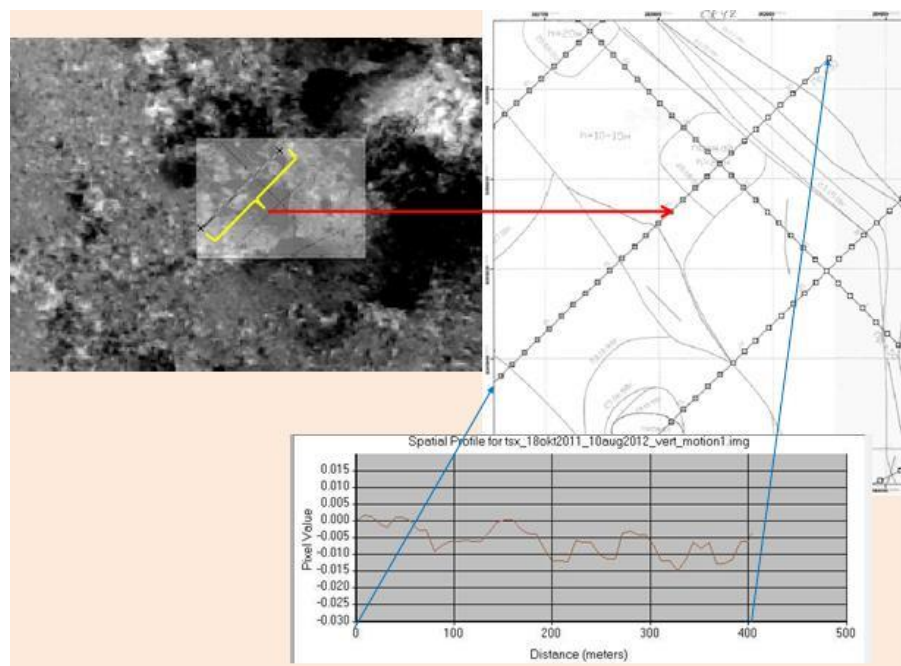


Рисунок 6 – Сопоставление результатов проседания земной поверхности, полученных методом дифференциальной интерферометрии и наземными измерениями

Установлено, что применения метода интерферометрии комбинирует комплексные изображения, зафиксированные антеннами под различными углами наблюдения или в разное время. По результатам сравнения двух снимков одного и того же участка местности получают интерферограмму, которая позволило установить обеим экспозициям подвижки, которые регистрируются с точностью миллиметры-первые сантиметры и представлены в цифровом виде, что обеспечивает объективность и однозначность интерпретации. Зарегистрированные смещения земной поверхности на территории Анненского рудника методами дифференциальной интерферометрии пространственно приурочены к мульде осадки Анненского рудника.

Зона смещения (просадки) земной поверхности, полученная по технологии, использующей данные радиолокационного космического аппарата TerraSAR-X, обладающего высоким пространственным разрешением имеет более подробную детальность и точнее отображает контуры мульды интенсивных сдвижений, полученную наземными маркшейдерскими измерениями.

В четвертой главе предлагается инновационный способ зонного районирования поверхности месторождения.

В ранее предложенных геомеханической службой ТОО корпораций «Казахмыс» способах, на наш взгляд, основным недостатком является то, что полученный критерий $N/m < 10$ определяются только геометрическими параметрами: глубиной выработанного пространства N и мощностью выработки m . В то же время известно, что параметры геодинамического события главным образом зависят от давления P на обрабатываемый участок со стороны налегающих пород, простирающихся от верхней границы

выработанного пространство до поверхности месторождения пропорционально их весу, то есть распределению плотности в этом объеме:

$$P = k \int_0^H \rho(x, y, z) g dz, \quad (4)$$

где k – коэффициент пропорциональности, g – ускорение свободного падения, H – глубина выработанного пространства.

Использование, полученного на основе ретроспективного анализа случаев обрушений на Жезказганском месторождении критерия $H/m < 10$ с заменой H на $H_{пр}$, позволяет значительно повысить точность зонного районирования, особенно в граничной области.

К примеру, полученное из рассмотрения причин и следствий происшедших обрушений, позволило выявить корреляционную зависимость предельно-допустимой величины оседания $\eta_{доп}$ от кратности отработки $H_{пр}/m$

$$\eta = 3.95 (H_{пр}/m)^2 - 21.28 (H_{пр}/m) + 55.17, \text{ мм} \quad (5)$$

где η - предельно-допустимое значение оседания, мм;

$H_{пр}/m$ – кратность подработки.

Далее для удобства используем в формулах и графиках H как $H_{пр}$.

Корреляционная зависимость, описывающая параметры выработанного пространства и сдвижения земной поверхности, приведена на рисунке 7. Эта зависимость может быть использована для приближенной оценки предельно-допустимых величин на тех участках, где отсутствуют инструментальные наблюдения за деформациями поверхности (профильные линии сдвижения).

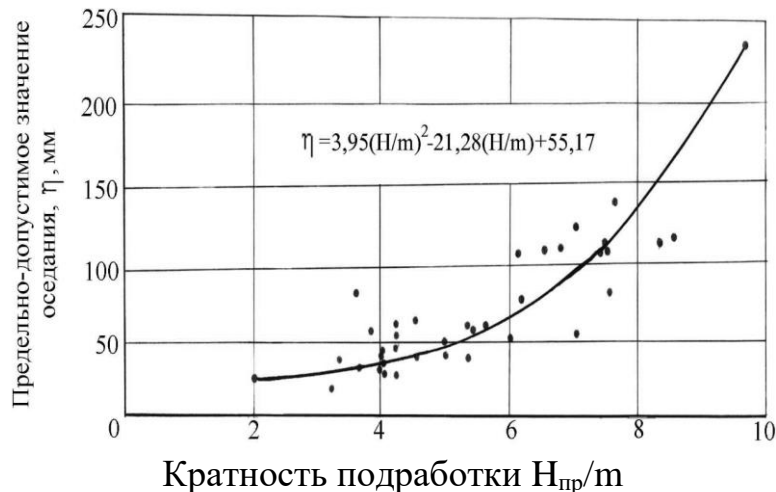


Рисунок 7 – График зависимости оседаний земной поверхности от кратности подработки

Критерий $H/m < 10$, при условном допущении, что поддерживающие выработанное пространство целики потеряли несущую способность, позволяет осуществить диагностику конечного состояния подработанного горного массива.

Установленная зависимость (7) позволяет учесть такие факторы, как выемочная мощность m и приведенная глубина H отработки залежи, допустимая скорость оседания η , определяющие условия и место образования воронок на земной поверхности. Достоверность подтверждена тем фактом, что все реализованные обрушения находятся в выявленных по указанным критериям зонах (рисунок 8).

Полученная корреляционная зависимость позволяет получать ожидаемые предельно-допустимые деформации в зависимости от глубины и мощности разработки, а также решать обратные задачи, т.е. выбрать такие размеры пустот, при которых деформации земной поверхности не превысят предельно-допустимые для подрабатываемых объектов. Это позволит существенно повысить коэффициент извлечения полезного ископаемого под застроенными объектами.

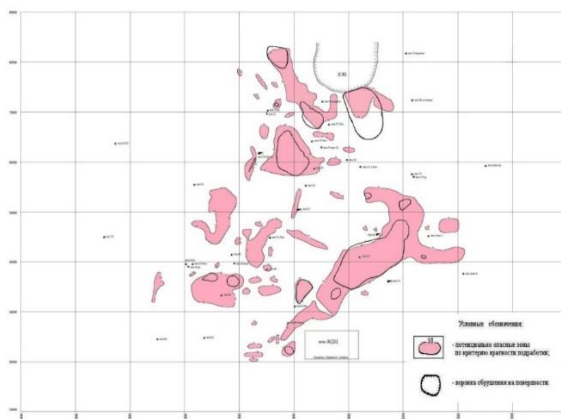


Рисунок 8 – Схема прогнозного плана по кратности отработки Жезказганского месторождения

В другом, предложенном нами способе, такие величины, как высота отрабатываемого участка и налегающих пород от границы выработанного пространства до поверхности (H), мощности (m) подменяются вертикальной компонентной (Z_c) координаты центра тяжести столба массива простирающегося вертикально вверх до поверхности месторождения.

При дискретном распределении массы (плотность остается постоянной в некотором интервале) вертикальная координата центра масс столба Z_c равна:

$$Z_c = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Z_i^2 - Z_{i-1}^2) \rho_{i,i-1}}{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{i-1}) \rho_{i,i-1}}, \quad (6)$$

где Z_i, Z_{i-1} - координаты границ интервала с постоянной на этом интервале плотностью $\rho_{i,i-1}$, n – число интервалов.

При этом следует отметить, что положение центра тяжести определяется распределением массы по глубине, а не просто глубиной и поэтому его

изменение наиболее чувствительны к процессам, происходящим в горном массиве.

Изменения положения характеризуется относительным смещением центра тяжести ε равным:

$$\varepsilon = \frac{Z_{c0} - Z_c}{Z_{c0}} = 1 - \frac{Z_c}{Z_{c0}}, \quad (7)$$

где Z_{c0} и Z_c – вертикальные компоненты координаты центра тяжести, соответственно в исходном и текущем состоянии.

На плане, методом экстраполяции, соединяя точки с одинаковым значениям ε , строятся изолинии, делящие поверхности месторождения на определенные зоны (по аналогии с ΔZ).

Наиболее опасными являются зоны, с повышенным значением ε , соответствующие наибольшим объемам выработок и глубиной залегания. Степень опасности зоны зависит от ее площади и разности ε соседних зон (от градиента ε). Охватываемую изолиниями зональную поверхность месторождения можно характеризовать эффективным радиусом $R_{эфф}$ – радиусом окружности площадь которой равна площади зоны. Соответственно значение градиента ε определяет соотношение разности значений соседних зон ε на разность их эффективных радиусов:

$$\gamma = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{R} \quad (8)$$

Для Анненского рудника, входящего в состав Жезказганского месторождения, относительное смещение вертикальной составляющей центра тяжести столба ε приведены в таблице 1.

Таблица 1. Относительное смещение вертикальной составляющей центра тяжести столба ε

Зона	безопасная	опасная	высокоопасная
$\varepsilon, \%$	$\varepsilon < 7$	$7 \leq \varepsilon$	$\varepsilon > 12$
Цвет зоны на плане	зеленый	желтый	красный

Таким образом, предложенный способ прогноза при условии оперативного определения критериев может обеспечить достаточно высокий уровень прогнозирования геодинамических событий. Об этом свидетельствует достаточно высокая сходимость данных мониторинга с технологическими ситуациями в натуральных условиях.

В 2016 г. были проведены полевые и экспериментальные съемочные работы по мониторингу за состоянием земной поверхности на территории Анненского месторождения с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА 101).

Для обработки первичных данных АФС использованы программные продукты (AgisoftPhotoScan). Задачами выполняемых съемочных работ отвального комплекса опытного участка, являлось изучение возможности построения крупномасштабной цифровой объемной модели поверхности карьера и оценка ее точности с целью дальнейшего их использования в других горно-геологических системах (рис. 9).



Рисунок 9 – Карта съемки (ортофотоплан) территории Анненского месторождения

Одним из основных базовых методов для маркшейдерско-геодезического контроля за процессами вертикальных смещений горного массива и деформациями инженерных сооружений является высокоточное нивелирование профильных линий (наблюдательных станций), каждая из которых состоит из определенного количества реперов. На территории Анненского рудника было выполнено высокоточное нивелирование по профильной линии 126 бис, проходящей по железной дороге в районе над залежами ПС-3-П и ПС-3-Горизонтов 260, 360.

Таким образом, проведенная система комплексного геотехнического мониторинга при исследований деформационных процессов, их контроля и прогноза на примере Анненского месторождения позволило определить рациональное направление ведения горных работ по выемке оставшихся балансовых запасов в зонах возможных обрушений или оседания земной поверхности.

Данные различных методов маркшейдерско-геодезических наблюдений на земной поверхности Анненского месторождения позволили выявить ослабленные зоны на поверхности месторождения и рационально сконцентрировать технологию геомониторинга, повышая его интенсивность, непрерывность и точность.

На основании методами маркшейдерско-геодезических наблюдений на земной поверхности Анненского месторождения позволило выявить ослабленные зоны на поверхности месторождения и рационально сконцентрировать технологию геомониторинга, повышая его интенсивность, непрерывность и точность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе проведения комплексного геомеханического мониторинга получено новое решение актуальной задачи по исследованию геомеханических процессов сдвижения земной поверхности в ослабленных зонах месторождения на основе геодезических и космических технологий, что позволило получить следующие результаты:

1. Проведен анализ современного состояния и изученности геомеханического мониторинга процессов сдвижения земной поверхности по отработке рудных тел в ослабленных зонах месторождения.

2. Предложено в период нарастания интенсивности освоения месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях, в частности, на ослабленных участках месторождения внедрение инновационных методов геодезических наблюдений для более эффективного контроля и прогноза развития процесса разрушения в массиве горных пород.

3. В результате проведенных работ с помощью дифференциальной интерферометрии была построена карта смещений земной поверхности территории Анненского рудника, на которой были зарегистрированы смещения почв и грунтов в мульде просадки до 5 см.

4. Проведен сравнительный анализ результатов дифференциальной интерферометрии с данными геодезических наблюдений за период 2011-2016 гг. по профилным линиям, что показало достаточно высокую корреляцию. По данным интерферометрических наблюдений по реперу 27 абсолютная величина просадки земной поверхности составила 0.8 см, а по геодезическим измерениям составило 1 см, с разницей измерения ($\pm 0,2$ см) отвечающую требованиям инструкции по геодезическим измерениям.

5. Разработан способ зонного районирования земной поверхности месторождения и предложен метод критерия $N_{пр}/m$, относительный коэффициент смещение центра тяжести ε и градиент разности их эффективных радиусов, учитывающий анизотропии плотности массива, точность контроля и степень надежности прогнозирования деформационных процессов.

6. Предложены геодезические методы наблюдения с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА 101) и высокоточного нивелирование за состоянием земной поверхности на ослабленных зонах территории Анненского месторождения, построена карта смещений провалоопасных зон на земной поверхности, обеспечивающий съемку всей территории с высокой точностью и в значительной степени уменьшающие затраты наблюдений по сравнению с космической съемкой.

7. Получена на основе математической обработки результатов измерений графо-аналитическая зависимость параметров деформационных процессов, которая позволяет получать ожидаемые предельно-допустимые величины деформации в зависимости от глубины и мощности разработки и позволяющие выбрать рациональные размеры пустот для повышения эффективности и безопасности горных работ.