

УДК 622.834.1:550.83

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-32-42

Определение зоны возможного оседания земной поверхности с использованием методов гравиразведки при отработке слепых рудных тел

В. С. Писарев¹✉, В. Ф. Канушин¹, А. А. Еременко²

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru

Аннотация. Шерегешское железорудное месторождение расположено на юге Кемеровской области, в Горной Шории. Отрабатывается подземным способом. Месторождение вскрыто до горизонта –85 м (отметка поверхности +630 м). Разработка месторождений подземным способом приводит к нарушению природного равновесия толщи пород, в результате которого происходят процессы перераспределения напряжений, деформирование и сдвигание породного массива. Цель научно-исследовательской работы заключается в использовании современных методов и технологий применения гравиметрических измерений, выполняемых на земной поверхности с последующей задачей определить контур выработанного пространства. В работе приводятся два примера мониторинга участков, в которых произошли обрушения земной поверхности. На склоне горы Буланже мониторинг развития провала ведется с 2018 г. В результате данного исследования определены геометрические размеры провала в разные периоды наблюдений и вычислена средняя динамика его увеличения в разные годы и на участке «Подрусловый» в поселке Шерегеш провала, который образовался 12 декабря 2022 г.

Ключевые слова: рудное месторождение, геотехнический мониторинг, провал, беспилотные летательные аппараты, квадрокоптер, ГНСС, тахеометр, рудное тело

Введение

Одной из сложных горнотехнических проблем является задача определения геометрических размеров выработанного горного пространства и его проекции на земную поверхность с учетом структурных физико-геологических, гидротехнических особенностей и тектоники эксплуатируемых участков рудных месторождений.

Так как с течением времени горные выработки и отдельные полости в породном массиве теряют прочность и устойчивость, то начинают развиваться деформационные процессы в выработанном пространстве, которые обычно достигают земной поверхности и могут приводить к сдвиганию части горного массива и способствовать дальнейшему оседанию земной поверхности.

Процесс сдвигания – это процесс оседания и изменения земной поверхности в сторону вы-

рабатываемого пространства под землей. В ходе этого процесса участки горных пород могут подвергаться различным видам деформации – изгибу, сдвигу, растяжению и сжатию [1].

Опасным видом сдвигания породного массива при подземной отработке месторождения является провал – непроизвольное нарушение сплошности земной поверхности вследствие обрушения толщи пород над сформировавшимися полостями. Провал, как правило, происходит внезапно и очень быстро по времени, пронизывает всю толщу горных пород, создавая угрозу аварий и безопасности жизни людей. Поэтому так актуальна проблема прогноза и предотвращения внезапных провалов на земной поверхности в Кузбассе: там большое количество подземных горных выработок и расположены они на относительно небольших глубинах, от 20 до 100 м.

В настоящее время нет достаточно точных и научно обоснованных методов определения

условий образования подобных провалов и воронок, и это приводит к простым, интуитивно практическим решениям. Выбор способа погашения выработок нередко осуществляется произвольно, с опорой на опыт проектировщика. При этом возможны серьезные ошибки, приводящие к образованию не только одиночных провалов, но и их серии. Так было на шахтах «Таштагольская», «Шерегешская», «Казская», а также на Натальевском золоторудном и Центральном рудниках с шахтово-штольневом методом добычи.

Одним из первых изучать динамику процесса сдвижения пород, а не фиксировать лишь конечные проявления этого процесса, предложил С. Г. Авершин [2], разработавший позднее методику таких исследований [3].

В инженерной геофизике для изучения развития карстовых полостей, оползней, обвалов, осадок земной поверхности и других геодинамических явлений используют записи акустической эмиссии и микросейсм. Этим методом изучают особенности распространения различных типов упругих волн в геологических средах, однако эффективность его применения для определения контуров зон возможного провалообразования над горными выработками оказалась недостаточна высока [4, 5].

Для уточнения состояния горных выработок и подземных пустот необходимо использовать дополнительные геофизические методы, совокупность которых позволяет достаточно точно расчленить вмещающие породы по плотностям, физическим свойствам и определить характер заполнения пустот, их геометрию, спроецировав общую картину на дневную поверхность.

Потенциальными геологическими объектами детальных гравиметрических работ в этой геологической ситуации могут быть плотностные неоднородности верхней части разреза, в первую очередь связанные с внутренним строением моренных отложений, формой подошвы четвертичных отложений, положением тектонических зон и палеодолин [6].

Основным методом здесь является гравиметрия, в основе которой лежит связь силы тяжести с плотностью вмещающих горных пород. Основные характеристики грунтов и горных пород, таких как прочность и пори-

стость, непосредственно связаны с плотностью, поэтому использование гравиметрии как прямого метода обнаружения, локализации и изучения структуры потенциально опасных зон снижения прочности грунтов основания и определения зоны провалообразования полностью оправдывается.

Состояние проблемы

Разработка месторождений подземным способом приводит к нарушению естественного состояния горного массива и его плотности, а следовательно, и крепости горных пород. В результате происходит перераспределение напряжений, деформирование и сдвижение горного массива. Данные процессы распространяются в верхнем полупространстве, расположенном над горными выработками, и распространяются до дневной поверхности уровня Земли. Дневная поверхность при этом испытывает деформационные процессы во всех направлениях и тем самым происходит сдвижение кровли выработки.

Характер и форма проявления этих процессов варьируется в весьма широких пределах: от малых наблюдений до глубоких воронок и провалов [7].

Образование больших провалов на земной поверхности при обрушении кровли выработок наблюдается при разработке рудной залежи на Железородном месторождении в Горной Шории и в других аналогичных условиях. Так, например, огромный провал диаметром более 200 м и глубиной более 50 м образовался над обрушившимися выработками на горе Буланже на «Юго-Восточном» участке Таштагольского месторождения.

В ноябре 2018 г. обнаружено локальное проседание земной поверхности с образованием воронки обрушения почвы на юго-восточном склоне горы Буланже над «Юго-Восточным» участком в районе (рис. 1).

На рис. 2 изображен провал над отработанными горными выработками участка «Подруслый» Шерегешского месторождения в п. Шерегеш по ул. Первомайской, который образовался 12 декабря 2022 г. [8]. Глубина провала около 180 м, а диаметр воронки примерно 45–50 м, и он продолжает увеличиваться.

Основная причина образования данного провала – это активное проведение добычных работ подземным способом с проведением массовых взрывов, в результате которых в недрах остается отработанное пространство в виде пустот достаточно больших размеров, от десятков до нескольких сотен метров.

Схожие проблемы актуальны для многих других объектов недропользования, как открытых (карьеры), так и закрытых (шахты по извлечению руды, добыча нефти и газа).

К настоящему времени разработаны различные методы определения условий образования на поверхности Земли провалов и воронок для различных горномеханических условий, например, крутопадающих пластов, при подработке водоемов, при разработке рудных месторождений и других условий горных выработок [9, 10].

В условиях отработки месторождения подземным способом вероятность образования провалов связывают с устойчивостью пород кровли, высотой зоны обрушения и мощностью полезного ископаемого. Если обрушение кровли происходит после того, как выработка заполнится пучащими породами почвы, т. е. породами, образованными выдавливанием под действием горного давления породы почвы в горную выработку, то провал не образуется, и наоборот, если это обрушение происходит до того, как начнется заполнение выработки пучащими породами, образуется провал наибольших размеров [11].

Уменьшение вредного влияния пучения осуществляется снижением напряжений в массиве пород, а также их упрочнением. На шахтах распространены различные способы борьбы с пучением пород почвы [12].



Рис. 1. Провал, образовавшийся на склоне горы Буланже



Рис. 2. Провал над участком Подрусловый

***Исследования по определению границы
возможного оседания земной поверхности***

Горные породы, содержащие полезные ископаемые, находятся в состоянии условного равновесия. В процессе подземной разработки происходит образование незакрепленного выработанного пространства, которое приводит к нарушению равновесия горных пород, их оседанию, перемещению и деформации. Затем возникшее около горной выработки перемещение горных пород распространяется в верхние слои покрывающей толщи.

При достаточно больших объемах добычи полезного ископаемого верхний слой выработанного пространства и, следовательно, дневная поверхность, также деформируется. Таким образом, происходит нарушение равновесия пород под влиянием подземных разработок месторождений полезных ископаемых, в результате которого над выработанным пространством может образоваться провал, уступ, трещина или крупная впадина (мульда сдвижений), причем эти сдвижения могут достигать нескольких метров [13].

Так как земная поверхность является частью постоянно деформирующейся толщи горных пород, то сдвигение ее отражает те процессы, которые происходят в подработанном породном массиве. В этой связи для выявления закономерностей и на основе их разработки методов расчета величин сдвижений земной поверхности необходимо иметь представление о характере деформирования массива пород от горной выработки до поверхности [14].

Большое значение здесь придается механическим свойствам пород и их чередуемости. Интересная гипотеза балок, выдвинутая Ф. Шульцем, поддержанная и интерпретированная Т. Фриндом, А. Экардом, В. Д. Слесаревым, Г. Н. Кузнецовым, А. А. Борисовым и др., сводится к следующему [15].

Породные слои над выработанным пространством рассматриваются как балки, закрепленные одним концом в целик; другие концы балок могут опираться на крепь, закладку или свободно свисать. Состоящая из нескольких породных слоев кровля рассматривается как совокупность таких балок [16].

Как показали натурные наблюдения за сдвижением горных пород над выработкой, эти сдвиги всегда начинаются в форме прогиба отдельных слоев по нормали к напластованию. При этом обрушение породных слоев характеризуется отрывом кусков горной породы от вышележащей толщи и их беспорядочным падением в виде отдельных блоков и кусков. Как показано в работе [17], сдвиг пород при наклонном и крутом залегании пластов обусловлен деформацией породных слоев вдоль напластования под действием их веса и под влиянием касательных напряжений при изгибе слоев.

К настоящему времени для прогноза сдвижений и деформаций подработанных горных пород разработано достаточно большое количество методов: эмпирических, полуэмпирических, теоретических и методов математического моделирования [18–20].

Произошедшие изменения, связанные с развитием научно-технического прогресса за последние годы в технологии и механизации подземных горных работ, ставят новые задачи и формируют новые проблемы для научного поиска в этой области.

С увеличением объемов очистных работ происходит расширение области влияния на целостность горного массива. В этом случае процесс сдвижения и деформирования пород выходит на дневную поверхность Земли и изменяет ее рельеф. В данную деформационную область попадают вышележащие слои и при этом происходит их расслоение и сдвиги относительно друг друга с последующим разрушением целостности этих слоев с образованием трещин. Данную область принято называть зоной обрушения. Следующим этапом при определенных условиях возникает развитие сводообразования вверх к земной поверхности, при достижении которой образуется провал.

Провал – это вертикальные составляющие деформаций земной поверхности с нарушением целостности горного массива, образующиеся вследствие обрушения толщи над горными выработками [21].

Цифровая трехмерная модель геопространства (ЦТМГ), построенная на основе облака то-

чек, полученных по результатам геодезических измерений, является математической моделью всех объектов местности, в том числе деревьев, зданий и др. ЦТМГ в электронном формате позволяют пользователям решать задачи топографии, вести подсчет объемов, проектировать сооружения на ландшафтах, разрабатывать проекты планировки территории, создать проектную документацию: ситуационный план местности, профиль местности, экспликации, спецификации, визуализации и пр. Создание ЦТМГ методом дистанционного зондирования (аэрофотосъемка, в том числе с применением беспилотных летательных аппаратов или лазерных сканеров) на застроенных территориях не всегда возможно из-за плотной растительности и тех случаев, когда образуются теневые места. В таких ситуациях специалистам-производственникам необходимо выполнить непосредственное полевое измерение каждого отдельного характерного объекта с применением тахеометров [22, 23].

Для повышения эффективности исследования состояния горных выработок подземных пустот и зон разуплотнения, кроме сейсморазведки, необходимо использовать дополнительные геофизические методы исследований. Среди дополнительных геофизических методов видное место занимает малоглубинная гравиразведка [24].

Проведение натурных гравиметрических исследований работы на участке «Подруслый» проводились в летний период 2021 и 2022 гг. На территории исследования создана временная гравиметрическая сеть, состоящая из 47 пунктов. Измерения выполнялись гравиметрами ГНУ-КВ (две приборосвязи). «Твердым пунктом» выбран пункт «Р1» с принятым абсолютным значением силы тяжести 981 135,099 мГал (уровень условный). Всего выполнено 5 замкнутых рейсов протяженностью 1,5–2 часа. Для каждого пункта сети относительно пункта «Р1» определены приращения силы тяжести и вычислены абсолютные значения силы тяжести в каждом пункте. По полученным значениям силы тяжести в каждом пункте вычислены аномалии в свободном воздухе и аномалии в редукции Буге [25, 26] (рис. 3).

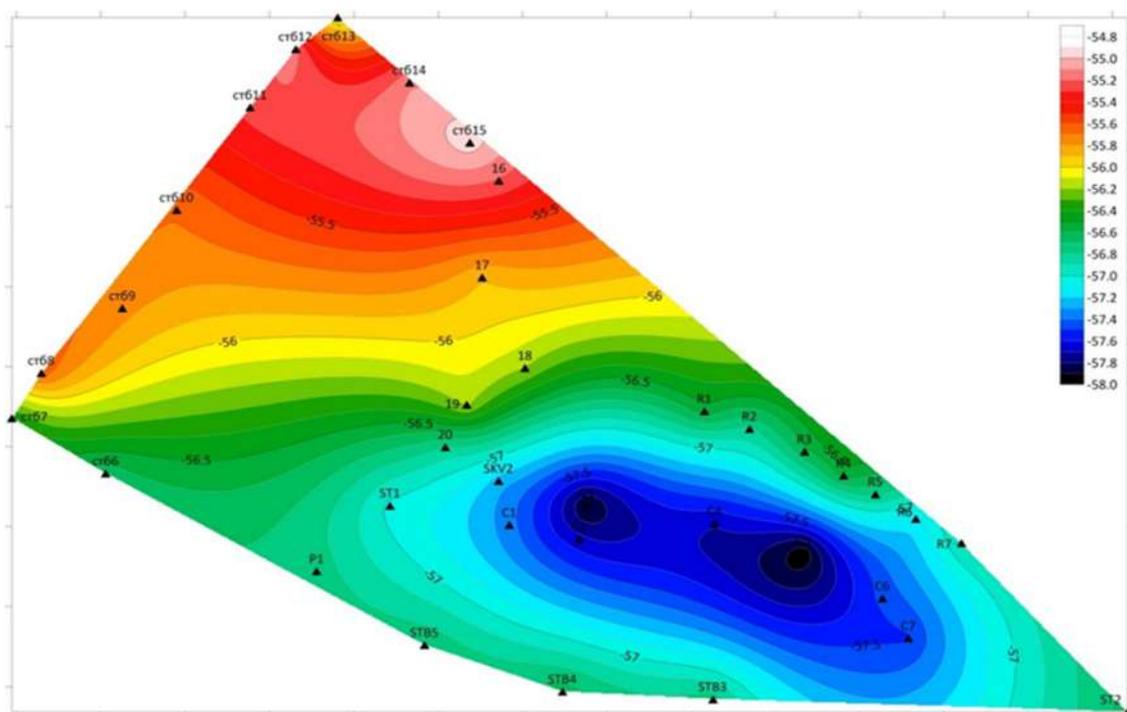


Рис. 3. Картограмма аномалий силы тяжести в редукции Буге (шкала в мГал)

Локальные аномалии однозначно характеризуют плотностные неоднородности в прилегающем слое. Отрицательные значения локальных аномалий на картограмме обусловлены разуплотнением пород на данном пла-

новом положении относительно окружающих пород, что позволяет данные области совместить с ортофотопланом местности и оконтурить область, которая подвержена оседанию земной поверхности [27] (рис. 4).

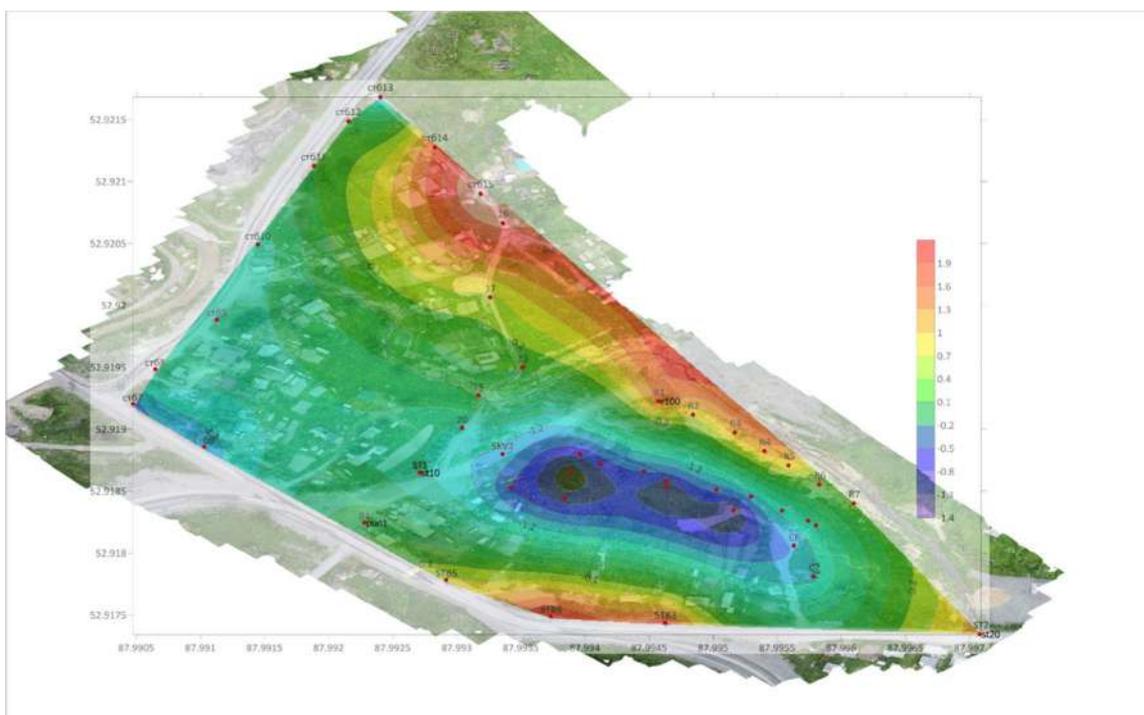


Рис. 4. Аномалии, полученные по результатам гравиметрической съемки, совмещенные с ортофотопланом

Заключение

В гравиразведке исследуются геологические объекты, имеющие пониженную или повышенную плотность σ_1 по сравнению с плотностью σ_2 окружающих эти геологические объекты горных пород. Если $\sigma_1 < \sigma_2$, то избыточная масса будет равна $m = (\sigma_2 - \sigma_1)v$, где v – объем избыточной массы.

В этом случае закон всемирного тяготения, который лежит в основе гравиразведки, примет вид

$$g = f \frac{m}{r^2},$$

где g – сила тяжести; m – масса тела; r – расстояние между пунктами измерений.

Таким образом, измеряя ускорение силы тяжести g , в исследуемом районе можно обнаружить такие геологические объекты, у ко-

торых плотности отличаются от плотности окружающих их вмещающих пород, вызванные наличием трещиноватых пород либо обводненностью участков, что позволит картографически оконтурить такие области и, следовательно, указать контуры, подверженные деформациям и возможному оседанию земной поверхности.

Использование метода малоглубинной гравиразведки и интерпретации позволяет уверенно выявлять зоны карстового разуплотнения и провалообразования для их закладки или усиления конструкций инженерных сооружений, попадающих в эти зоны [27, 28].

Проведенные полевые гравиметрические исследования на участке «Подрусловый» в 2021 и 2022 гг. позволили установить контур возможного оседания земной поверхности для принятия комплекса мер по предотвращению опасной ситуации и позволили контролировать процесс образования провала, который случился на данном участке в декабре 2022 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов А. Г. Геомеханические аспекты сдвижения горных пород при подземной разработке угольных и рудных месторождений. – СПб. : ВНИМИ, 2003. – 166 с.
2. Авершин С. Г. Расчет деформаций массива горных пород под влиянием подземных разработок. – Л. : ВНИМИ, 1960. – С. 85–87.
3. Авершин С. Г. Некоторые свойства процессов сдвижения горных пород и вопросы расчета сдвижений // Сб. тр. ВНИМИ. – 1961. – № 43. – С. 3–21.
4. Колесников Ю. И., Федин К. В. Применение пассивного метода стоячих волн в инженерной сейсмике: физическое моделирование и натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 83–91.
5. Давыдов В. А. Опытная малогабаритная аппаратура регистрации «ОМАР-2м» для метода АМТЗ // Материалы конференции «Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей»: Шестые научные чтения Ю. П. Булашевича. – Екатеринбург : ИГФ УрО РАН, 2011. – С. 112–115.
6. Лыгин И. В., Бульчев А. А., Гилод Д. А., Соколова Т. Б., Фадеев А. А. Результаты гравиметрических исследований на геофизическом полигоне в Калужской области // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. – 2014. – № 2. – С. 3–10.
7. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. – Л. : Недра, 1985. – 503 с.
8. Еременко А. А., Гаврилов А. Г., Штирц В. А., Писарев В. С. Оценка геомеханического состояния породного целика между земной поверхностью и кровлей выработанного пространства при отработке слепого рудного тела на Шерегешевском месторождении // Горный журнал. – 2022. – № 1. – С. 68–73.
9. Макаров А. Б., Мосякин Д. В., Ананин А. И. Разрыхление пород при обрушении и условия образования провалов // Горный журнал. – 2017. – № 3. – С. 32–36.
10. Капралов В. К. Результаты исследований условий образования провалов земной поверхности при подземной газификации крутых угольных пластов // Сдвижение горных пород и земной поверхности при подземных разработках. – М. : Недра, 1984. – 245 с.

11. Коваленко В. В., Рязанцев А. П. Обоснование параметров способа борьбы с пучением пород в условиях угольных шахт. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2013. – 119 с.
12. Компанец В. Ф., Сугатенко Г. Г., Курилин А. В. Крепление выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт // Уголь Украины. – 1996. – № 1. – С. 26–28.
13. Антонов Ю. В. Плотностные неоднородности в земной коре // Геофизика. – 2005. – № 1. – С. 62–68.
14. Иофис М. А., Шмелев А. И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М. : Недра, 1985. – 248 с.
15. Борисов А. А. Новые методы расчета штанговой крепи. – М. : Госгортехиздат, 1962. – 64 с.
16. Нурпеисова М. Б., Иофис М. А., Милетенко И. В. Геомеханика : учебник для вузов. – Алматы : КазНТУ, 2014. – 275 с.
17. Кутепов Ю. И., Гусев В. Н., Кутепов Ю. Ю., Боргер Е. Б. Изучение сдвижения горных пород на шахте им. А. Д. Рубана в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S48. – С. 132–141.
18. Кутепов Ю. Ю. Геомеханическое обоснование устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях угольных месторождений : дис. ... канд. техн. наук / Кутепов Юрий Юрьевич. – СПб., 2019. – 184 с.
19. Кутепов Ю. Ю., Боргер Е. Б. Численное моделирование процесса сдвижения породных массивов применительно к горно-геологическим условиям шахты имени Рубана в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 66–75.
20. Печеркин А. И. Геолого-структурные закономерности развития карста и их инженерно-геологическое значение: дис. ... д-ра геол.-мин. наук / Печеркин Андрей Игоревич. – Пермь, 1989. – 454 с.
21. Писарев В. С., Ахмедов Б. Н. Оценка точности при выполнении подсчета объема земляных работ // Маркшейдерия и недропользование. – 2019. – № 4 (102). – С. 38–41.
22. Ахмедов Б. Н. Построение цифровых трехмерных моделей геопространства // Сборник научных докладов молодежной научно-практической конференции «Инженерная графика и трехмерное моделирование». – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 9–13.
23. Писарев В. С., Ахмедов Б. Н., Басаргин А. А. Анализ способов сбора геоданных при геодезическом сопровождении горных работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 1, № 1. – С. 197–202.
24. Писарев В.С. Маркшейдерско-геодезические работы при создании геодинамических полигонов // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 2 (106). – С. 35–40.
25. Писарев В. С., Кудрявцева А. С. // Методика создания 3-х мерной модели карьера по добыче строительного камня : Сборник статей по итогам научно-технических конференций, приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – № 11 – С. 144–146.
26. Еременко А. А., Гаврилов А. Г., Штирц В. А., Писарев В. С. Оценка геомеханического состояния подработанных пород массива при выемке слепого рудного тела на Таштагольском месторождении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 2. – С. 48–56.
27. Еременко А. А., Штирц В. А., Писарев В. С. Оценка геомеханического состояния налегающей толщи пород при отработке слепого рудного тела на Шерегешевском месторождении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 3. – С. 59–66.
28. Писарев В. С. Исследование развития контура провала в районе горы Буланже // Вестн. СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 28–6.

Об авторах

Виктор Семенович Писарев – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Вадим Федорович Канушин – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Андрей Андреевич Еременко – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник.

Получено 10.10.2023

© В. С. Писарев, В. Ф. Канушин, А. А. Еременко, 2024

Determination of the zone of possible subsidence of the earth's surface using gravity survey methods when mining blind ore bodies

V. S. Pisarev¹✉, V. F. Kanushin¹, A. A. Eremenko²

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru

Abstract. The Sheregesh iron ore deposit is located in the south of the Kemerovo region, in Mountain Shoria. It is mined underground. The deposit was opened to a horizon of -85 m (surface elevation +630 m). The development of deposits by the underground method leads to a disruption of the natural balance of the rock mass, as a result of which the processes of stress redistribution, deformation and displacement of the rock mass occur. The purpose of the research work is to use modern methods and technologies for applying gravimetric measurements performed on the earth's surface with the subsequent task of determining the contour of the mined-out space. The paper provides two examples of monitoring areas in which collapses of the earth's surface occurred. On the slope of Mount Boulanger, monitoring of the development of the failure has been carried out since 2018. As a result of this study, the geometric dimensions of the failure were determined in different observation periods and the average dynamics of its increase was calculated in different years and in the Podruslovy area in the village of Sheregesh, the hole, which formed on December 12, 2022.

Keywords: ore deposit, geotechnical monitoring, hole, unmanned aerial vehicles, quadcopter, GNSS, total station, ore body

REFERENCES

1. Akimov A. G. (2003). Geomechanical aspects of rock movement during underground mining of coal and ore deposits. – St. Petersburg: *VNIMI, [VNIMI]* 166 p. [in Russian].
2. Avershin S. G. (1960) Calculation of deformations of rock mass under the influence of underground mining // L. : *VNIMI, [VNIMI]*, 85–87 [in Russian].
3. Avershin S. G. (1961) Some properties of the processes of rock displacement and the calculation of displacements // Sb. tr *VNIMI, [VNIMI]* (43), 3–21 [in Russian].
4. Kolesnikov Yu. & I., Fedin K. V. (2016) Application of the passive standing wave method in engineering seismics: physical modeling and field experiment // Technologies of seismic exploration. No. 2. 83–91 [in Russian].
5. Davydov V. A. (2011) Experimental small-sized recording equipment "OMAR-2m" for the AMTZ method // Materials of the conference "Geodynamics. Deep structure. The thermal field of the

Earth. Interpretation of geophysical fields" : The sixth scientific readings of Y. P. Bulashevich. – Yekaterinburg : IGF UrO RAS, 112–115 [in Russian].

6. Lygin I. V., Bulychev A. A., Gilod D. A., Sokolova T. B., Fadeev A. A. (2014) Results of gravimetric studies at a geophysical polygon in the Kaluga region. *Bulletin of the Moscow University [Bulletin of the Moscow University]*. Series 4: Geology. – 2014. – No. 2, 3–10 [in Russian].

7. Turchaninov I. A., & Iofis M. A., Kasparyan E. V. (1985) Fundamentals of rock mechanics. *L. : Nedra [L. : Nedra]*, 503 [in Russian].

8. Eremenko A. A., Gavrilov A. G., Stirts V. A., Pisarev V. S. (2022) Assessment of the geomechanical state of the rock column between the Earth's surface and the roof of the worked-out space during the development of a blind ore body at the Sheregeshevsky deposit. *Mining Journal [Mining Journal]*, 1, 68–73 [in Russian].

9. Makarov A. B., Mosyakin D. V., Ananin A. I. (2017) Loosening of rocks during collapse and conditions for the formation of sinkholes. *Mining Journal [Mining Journal]*, 3, 32–36 [in Russian].

10. Kapralov V. K. (1984) Results of studies of the conditions for the formation of sinkholes of the earth's surface during underground gasification of steep coal seams // Displacement of rocks and the earth's surface during underground mining. *Nedra [Nedra]*, 245 p. [in Russian].

11. Kovalenko V. V., Ryazantsev A. P. (2013) Substantiation of the parameters of the method of combating rock heaving in coal mines. *National Mining University [National Mining University]*, 119 [in Russian].

12. Companets V. F., Sugatenko G. G., Kurilin A. V. (1996) Fastening of workings in difficult mining and geological conditions of deep mines. *Coal of Ukraine [Coal of Ukraine]*, 1, 26–28 [in Russian].

13. Antonov Yu. V. (2005) Density inhomogeneities in the Earth's crust. *Geophysics [Geophysics]*, 1, 62–68 [in Russian].

14. Iofis M. A., Shmelev A. I. (1985) Engineering geomechanics in underground mining. *Nedra [Nedra]*, 248 p. [in Russian].

15. Borisov A. A. (1962) New methods of calculating the rod support. *Gosgortehizdat [Gosgortehizdat]*, [in Russian].

16. Nurpeisova M. B., Iofis M. A., Miletenko I. V. (2014) *Geomechanics : Textbook for universities. Almaty : KazNTU [GEOMECHANICS : Textbook for universities. Almaty : KazNTU]*, 275 p. [in Russian].

17. Kutepov Yu. I., Gusev V. N., Kutepov Yu. Yu., Borger E. B. (2018) Studying the movement of rocks at the A.D. Ruban mine in Kuzbass. *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal) [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)]*, S48, 132–141 [in Russian].

18. Kutepov Yu. Yu. (2019) Geomechanical substantiation of the stability of hydraulic dumps in the mined areas of coal deposits: dis. ... k-ta of technical sciences. *St. Petersburg [St. Petersburg]*, 184 p. [in Russian].

19. Kutepov Yu. Yu., Borger E. B. (2017) Numerical modeling of the process of shifting rock massifs in relation to the mining and geological conditions of the Ruban mine in Kuzbass. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal) [Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, 5, 66–75 [in Russian].

20. Pecherkin A. I. (1989) Geological and structural patterns of karst development and their engineering and geological significance: dis. ... doct. geol.-min. of sciences. *Perm [Perm]*, 454 p. [in Russian].

21. Pisarev, V. S., Ahmedov, B. N. (2019) Assessment of accuracy in the performance calculation of earthwork. *Mine surveying and subsurface use [Mine surveying and subsurface use]*, 4 (102), 38–41 [in Russian].

22. Ahmedov B.N. (2016) Construction of digital three-dimensional models of geospatial. Collection of scientific reports of the youth scientific-practical conference: "Engineering graphics and three-dimensional modeling» *SGUGIT [SGUGIT]*, 9–13 [in Russian].

23. Pisarev, V. S., Ahmedov B.N., Basargin A. A. (2019) Analysis of methods of collecting geodata in geodetic support of mining operations. *INTEREXPO GEO-SIBERIA [INTEREXPO GEO-SIBERIA]*, 1, 197–202 [in Russian].

24. Pisarev, V. S. (2020) Geodesic and mine surveying works when developing geodynamic field sites. *Mine surveying and subsurface use [Mine surveying and subsurface use]*, 2 (106), 35–40 [in Russian].

25. Pisarev, V. S., Kudryavtseva A. S. (2020) Method of creating a 3-dimensional quarry model for crushed stone mining. Appendix to the journal *Izvestiya vuzov. Geodesy and aerial photography. Collection of articles on the results of the scientific and technical conference. Izvestiya vuzov [Izvestiya vuzov]* № 11, 144–146. [In Russian].

26. Eremenko A. A., Gavrilov A.G., Shtirts V.A., Pisarev V.S. (2023) Geomechanical behavior of undermined rock mass in blind orebody mining in Tashtagol field. *Physical and technical problems of mineral development [Physical and technical problems of mineral development]* № 2, 48–56 [in Russian].

27. Eremenko A. A., Shtirts V.A., Pisarev V.S. (2023) Geomechanical assessment of overlying rock mass in blind orebody mining at Sheregesh deposit. *Physical and technical problems of mineral development [Physical and technical problems of mineral development]*, 59–66 [in Russian].

28. Pisarev, V. S. (2021) Studies on the formation of a sinkhole contour in the area of mount Boulanger. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SGUGiT]*, 2, 28–36 [in Russian].

Author details

Viktor S. Pisarev – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Vadim F. Kanushin – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Andrey A. Eremenko – D. Sc., Professor, Chief Researcher.

Received 10.10.2023

© V. S. Pisarev, V. F. Kanushin, A. A. Eremenko, 2024