

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СДВИЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЫРЕТСКОГО СОЛЕРУДНИКА

Владимир Павлович Ступин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (964)103-08-17, e-mail: Stupinigu@mail.ru

Ирина Александровна Карпова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (914)899-21-36, e-mail: karpova_irina@mail.ru

Описывается система организации геодезического мониторинга сдвижения поверхности солерудника. Приводится предрасчет параметров мульды сдвижения с учетом глубины разработки, геометрии шахтного поля и инженерно-геологических характеристик горных пород. Рассматривается технология геодезических работ, состав и порядок измерений при повторном геометрическом нивелировании на станциях и порядок их обработки. Анализируются результаты многолетних геодезических мониторинговых определений сдвижений земной поверхности.

Ключевые слова: сдвижение земной поверхности, геодезический мониторинг, наблюдательные станции.

GEODESIC MONITORING OF SURFACE MOVEMENT OF TYRETSALT MINE

Vladimir P. Stupin

Irkutsk State Technical University, 83, Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia, D. Sc., Professor, Department of Surveying and Geodesy, phone: (964)106-08-17, e-mail: Stupinigu@mail.ru

Irina A. Karpova

Irkutsk State Technical University, 83, Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia, Senior Lecturer, Department of Surveying and Geodesy, phone: (914)899-21-36, e-mail: karpova_irina@mail.ru

A system for organizing geodetic monitoring of the movement of the surface of a salt mine is described. Calculation of the parameters of the displacement trough is given taking into account depth of development, geometry of the minefield and engineering and geological characteristics of rocks. The technology of geodetic works, the composition and order of measurements during repeated geometric leveling at stations and the order of their processing are considered. The results of long-term geodetic monitoring definitions of displacements of the earth's surface are analyzed.

Key words: displacement of the earth's surface, geodetic monitoring, observation stations.

Введение

Тыретское месторождение каменной соли расположено в Заларинском районе Иркутской области, в 1,5 км к северо-востоку от железнодорожной станции Тыреть Восточно-Сибирской железной дороги и в 240 км к северо-

западу от Иркутска. Площадь месторождения составляет 12 кв. км при ширине 3 км и длине 4 км.

Месторождение представлено десятью пластами каменной соли мощностью от 0,6 до 17,3 м, залегающими на глубинах 486,2–613,1 м. Горные работы ведутся подземным способом на глубине 600 м по 5-му пласту каменной соли средней мощностью 16,5 м моноклинально погружающемуся на северо-восток. Угол падения пласта не превышает 1°.

Выше располагаются нижне- и верхнекембрийские отложения (известняки, доломиты, песчаники с глинисто-доломитовым цементом). Четвертичные отложения мощностью 8,5–10 м представлены почвами, мощностью 0,3 м и песчано-глинистыми отложениями с примесью обломочного материала карбонатных пород.

Вскрытие месторождения осуществлено двумя вертикальными стволами, расположенными на расстоянии 150 м друг от друга. Площадь горного отвода составляет 1 000 га. На месторождении используется камерная система разработки с поддержанием толщи горных пород на междукамерных целиках.

Для обеспечения полной, рациональной и безопасной отработки запасов каменной соли, охраны геологической среды от влияния техногенных процессов на ОАО «Тыретский солерудник» проводится мониторинг сдвижений и деформаций земной поверхности под влиянием горных выработок. Наблюдения за сдвижением земной поверхности осуществляются силами маркшейдерской службы предприятия согласно проекту «Организация наблюдений за сдвижением земной поверхности на «Тыретском солеруднике», п. Тыреть. 1999 г» и в соответствии с [1].

Необходимость геодезического мониторинга сдвижений вызвана тем, что при разработке месторождений подземным способом над шахтным полем возможны разного рода перемещения земной поверхности. Наблюдения за сдвижением земной поверхности проводят для определения параметров сдвижения на месторождении и получения данных для решения вопросов охраны подрабатываемых сооружений и выемки соли из предохранительных целиков.

Задачи наблюдений за сдвижением и деформированием земной поверхности включают:

- выявление процесса сдвижения и определение величин деформаций под влиянием подземной разработки месторождения соли;
- определение геометрии зон сдвижения в области влияния очистных выработок;
- выявление продолжительности сдвижения земной поверхности и периода опасных деформаций;
- определение взаимосвязи сдвижений и деформаций земной поверхности с деформациями подрабатываемых сооружений и объектов;
- расчет величин допустимых и предельных деформаций объектов;
- разработку мер контроля состояния подрабатываемых объектов;
- контроль эффективности мер по предотвращению опасных деформаций подрабатываемых объектов.

Результаты исследований используют для определения характера и параметров процесса сдвижения пород на месторождении, уточнения размеров предохранительных целиков и условий безопасной выемки руды под охраняемыми объектами, выбора новых участков застройки и определения необходимости и оптимальных сроков сноса или переноса различных старых объектов на территории горного отвода для решения вопросов рекультивации подработанных участков земной поверхности и др.

Методы и материалы

Обычно поверхностные деформации проявляются в виде т.н. мульды сдвижения – участка земной поверхности, на котором под влиянием выемки полезного ископаемого подземным способом возникают смещения и деформации. Величины деформаций зависят от вынимаемой мощности пласта, глубины горных работ, угла падения пласта и площади отработки. Линия, ограничивающая на поверхности зону влияния горных разработок, является границей мульды сдвижения; она определяется как геометрическое место точек на поверхности с величиной оседания 10 мм или по граничным углам. Часть мульды сдвижения, в которой точки поверхности имеют наибольшее оседание, называется дном мульды сдвижения.

В пределах мульды сдвижения выделяются зона опасного сдвижения, где сдвижения и деформации критичны для подрабатываемых сооружений, и зона трещин, определяемые относительно границ горных работ соответственно углами сдвижения и углами разрыва. При разработке крутопадающих пластов в мульдах сдвижения могут образоваться провалы.

Различают мульды сдвижения с плоским и вогнутым дном. В первом случае вследствие больших размеров очистной выработки по сравнению с глубиной разработки часть поверхности (полная подработка) в пределах мульды сдвижения подвергается предельным сдвижениям и она получает полное развитие. При отсутствии плоского дна в одном из главных сечений мульды сдвижения имеет место неполная подработка поверхности.

Положение точки максимального оседания в мульде сдвижения с вогнутым дном определяется с помощью угла максимальных вертикальных сдвижений.

Крайние точки плоского дна мульды сдвижения на вертикальных разрезах определяются с помощью углов полных сдвижений. В мульде сдвижения выделяют зоны опасных и безопасных сдвижений. Границы зоны опасных сдвижений поверхности или точки критических деформаций определяют с помощью углов сдвижения.

Углы, определяющие границы зон влияния очистных работ на вертикальных разрезах, показаны на рис 1.

Инструментальные маркшейдерско-геодезические наблюдения за сдвижением проводят на наблюдательных станциях, состоящих из систем реперов, расположенных на земной поверхности.

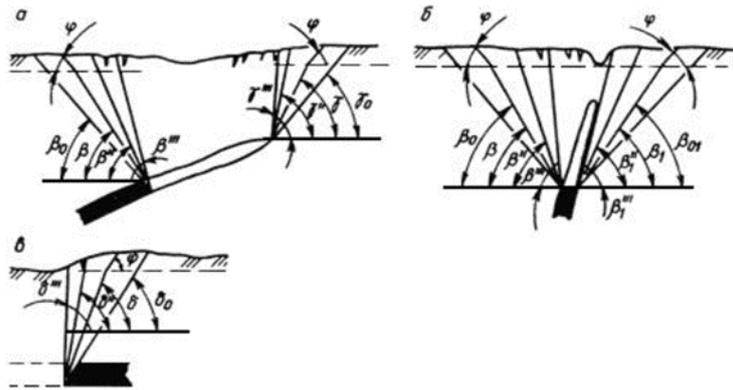


Рис. 1. Углы, определяющие положение границ зон влияния очистных работ на вертикальных разрезах [1]:

a – вкрест простирания при пологом и наклонном падении залежи; *б* – вкрест простирания при крутом падении залежи; *в* – по простиранию залежи. φ – угол сдвига в наносах. Углы у нижней границы отработки (висячий бок): β_0 – граничный угол, β – угол сдвига в коренных породах, β'' – угол разрыва, β''' – угол обрушения. Углы у нижней границы отработки (лежачий бок): β_{01} – граничный угол, β_1 – угол сдвига в коренных породах, β_1'' – угол разрыва, β_1''' – угол обрушения. Углы у верхней границы отработки: γ_0 – граничный угол, γ – угол сдвига в коренных породах, γ'' – угол разрыва, γ''' – угол обрушения. Углы по простиранию: δ_0 – граничный угол, δ – угол сдвига в коренных породах, δ'' – угол разрыва, δ''' – угол обрушения.

Закладку наблюдательных станций и наблюдения на них проводят на основании проекта наблюдений за сдвижением, составленного главным маркшейдером рудника с участием других технических служб или специализированной организацией. Проект согласовывается с главным маркшейдером вышестоящей организации и утверждается главным инженером предприятия.

Проект наблюдений за сдвижением состоит из пояснительной записки и графических материалов, характеризующих горно-геологическую ситуацию в районе наблюдательной станции и взаимное расположение реперов и подрабатываемых объектов очистных выработок. Графические материалы содержат план наблюдательной станции и очистных выработок, а также геологические разрезы по профильным линиям.

После перенесения проекта в натуру закладывают опорные, рабочие и вспомогательные реперы.

На Тыретском солеруднике наблюдения проводятся по двум профильным линиям, включающим 135 грунтовых реперов. Реперы наблюдательных станций запроектированы и заложены по прямым профильным линиям, ориентированным по простиранию и вкрест простирания находящегося в разработке пятого пласта месторождения таким образом, чтобы можно было определить основные параметры (минимальные углы сдвига и максимальные величины сдвижений и деформаций земной поверхности), т.е. в главных сечениях прогнозируемой мульды сдвига.

Главное сечение мульды сдвижения и место закладки основной профильной линии вкрест простирания располагают в середине участка очистных работ по простиранию.

Профильная линия состоит из опорных и рабочих реперов. Опорные реперы заложены на концах линий вне зоны сдвижения земной поверхности.

Рабочие реперы заложены в пределах ожидаемой (прогнозируемой) зоны сдвижения земной поверхности. Границы этой зоны в коренных породах месторождения определяют с помощью уменьшенных на 10° углов сдвижения β , γ , β_1 для наклонных пластов и δ – для горизонтальных и пологих, и угла сдвижения в наносах и выветрелых породах φ .

Поскольку процессы сдвижения на Тыретском солеруднике ранее не изучались, то и значения углов сдвижения изначально были неизвестны, поэтому их величину определяли по специальным таблицам [2] для средневзвешенного значения коэффициента крепости пород f_{cp} [3].

Коэффициент крепости пород по М.М. Протодьяконову в системе СИ рассчитывается по формуле:

$$f = 0,1\sigma_c,$$

где σ_c – предел прочности на одноосное сжатие в мегапаскалях.

Средневзвешенное значение коэффициента крепости пород определяется по формуле:

$$f_{cp} = (f_1m_1 + f_2m_2 + \dots + f_nm_n) / (m_1 + m_2 + \dots + m_n),$$

где f_i – крепость слоев; m_i – мощность слоев.

На Тыретском месторождении толща вмещающих пород представлена в основном слоистыми известняками с $f_{cp} = 2.0$. Такому коэффициенту крепости соответствует расчетный граничный угол сдвижения $\delta_{0расч.} = 70^\circ$.

Однако, помимо крепости вмещающих пород, на угол сдвижения δ_0 также влияют глубина разработки H и мощность разрабатываемого пласта m . Это влияние определяется эмпирической зависимостью [4]:

$$\delta_0 = \delta_{0расч.} + 1,4^\circ \sqrt{\frac{H}{m}}.$$

В соответствии с этой формулой, для Тыретского месторождения при $H = 600$ м и $m = 10$ м, получаем $\delta_0 \approx 80^\circ$.

При закладке наблюдательной станции, кроме опорных и рабочих реперов, были выбраны исходные репера, от которых проверялась неподвижность опорных реперов по высоте. Для этого были использованы существующие пункты маркшейдерской опорной сети, расположенные вне зоны влияния горных работ.

Длины профильных линий определялись исходя из практически горизонтального залегания разрабатываемого пятого пласта Тыретского месторождения. В этом случае, согласно [1], на разрезе вдоль и вкрест простирания от нижней границы очистной выработки, проектируемой к отработке под профильной линией, проводят линию под углом $\delta_0 - 10^\circ$ до контакта коренных пород с наносами и далее – под углом φ до пересечения с линией земной поверхности. Полученные точки определяют границы ожидаемой зоны сдвижений поверхности, а расстояние между ними – длину рабочей части профильной линии вкрест простирания (рис. 2).

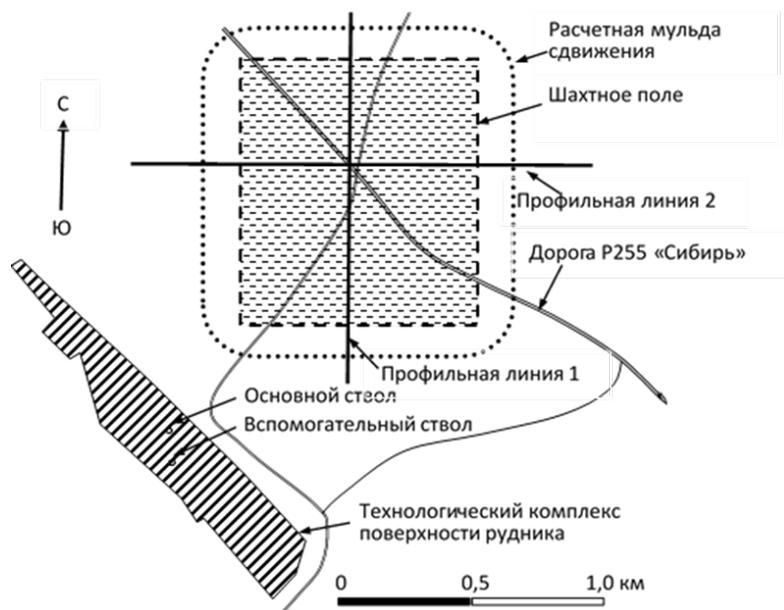


Рис. 2. Схема наблюдательной станции за сдвижением земной поверхности ОАО «Тыретский солерудник»

Число рабочих реперов по профильной линии определялось длиной линии и выбранной величиной интервала между реперами. Величина этого интервала составляет 30 м в центральной части мульды сдвижения, поскольку глубина разработки превышает 500 м.

Разбивка наблюдательной станции, т.е. перенесение проекта в натуру, выполнена инструментально от пунктов маркшейдерской опорной сети. Места закладки реперов на профильных линиях отмечались колышками по створу линий с отклонением не более 5 см. Репера закладывались с таким расчетом, чтобы обеспечить удобство наблюдений в вертикальной и горизонтальной плоскостях, прочную связь с грунтом и сохранность реперов в течение срока службы наблюдательной станции. Репера закладывались так, чтобы их головки находились на 25–30 см ниже поверхности земли, а у каждого репера устанавливался сторожок. Нижние концы реперов располагали на 0,5 м ниже границы промерзания грунта.

Геодезические работы на наблюдательной станции заключаются в инструментальных определениях величин сдвижений реперов в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Инструментальные наблюдения на станции состоят из:

- плановой и высотной привязок опорных реперов к исходным пунктам (при выносе проекта в натуру) и периодического контроля за их неподвижностью в период проведения наблюдений;
- начальных наблюдений для определения исходного положения реперов наблюдательной станции в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- повторных наблюдений за положением реперов наблюдательной станции для определения величин их сдвижения;
- периодических съемок трещин, провалов и зоны обрушения.

Привязка опорных реперов наблюдательной станции в горизонтальной плоскости выполнена проложением замкнутых тахеометрических ходов от ближайших исходных пунктов или проложением висячих ходов в прямом и обратном направлениях.

Измерение углов и расстояний выполнено тахеометром SET5 30R.

Относительная линейная невязка тахеометрического хода не превышала 1:2000. Измерение углов выполнялось с точностью не хуже 30".

Нивелирование опорных пунктов (а также реперов наблюдательных станций) производилось нивелиром SOKKIA C330 с использованием трехметровых шашечных реек РНЗ. Высотная привязка и контроль за неподвижностью опорных реперов выполнены от реперов маркшейдерской нивелирной сети нивелированием IV класса, расположенных заведомо за пределами возможной области сдвижений.

Нивелирование реперов на профильных линиях выполнено замкнутыми ходами в прямом и обратном направлениях [5]. Рейку устанавливали на все рабочие и опорные реперы, отсчеты брались по средней нити с двух сторон при условии расхождений между черной и красной сторонами не более ± 3 мм. Нивелирование выполнялось из середины, расстояние от инструмента до связующих точек не превышало 75 м, равенство плеч – не более 3 м.

Невязка превышений в нивелирных ходах не превышала $\pm 4\sqrt{n}$ мм при числе штативов n более 15 на 1 км хода.

Измерение интервалов между реперами проводили в прямом и обратном направлениях, при этом, расхождения интервалов не превышали ± 2 мм, а расхождения расстояний между крайними реперами профильных линий из прямого и обратного ходов не превышали 1:10 000 длины линии.

Всего за период с 1999 проведено восемь циклов наблюдений.

Камеральная обработка наблюдений каждого цикла включала:

- проверку полевых журналов;
- вычисление высотных отметок реперов наблюдательной станции;
- вычисление горизонтальных расстояний между реперами.

В специальных ведомостях по каждому профилю вычислялись [6]:

- вертикальные сдвижения (оседания) реперов;
- горизонтальные сдвижения;
- вертикальные деформации мульды сдвижения;
- горизонтальные деформации интервалов между реперами.

Величину оседания репера определяют по формуле:

$$\eta = H_{n-1} - H_n,$$

где H_{n-1} – отметка репера из предыдущего или начального наблюдения; H_n – отметка репера из последующего наблюдения.

По данным ведомостей оседания составлялись ведомости вертикальных деформаций (наклоны и кривизна).

Наклоны определяют по формуле:

$$i = \frac{\eta_n - \eta_{n-1}}{d},$$

где η_n – вертикальное сдвижение переднего репера; η_{n-1} – вертикальное сдвижение заднего репера; d – горизонтальный интервал между реперами.

Кривизну определяют по формуле:

$$k = (i_n - i_{n-1}) / d_{cp},$$

где i_n – наклон последующего интервала; i_{n-1} – наклон предыдущего интервала, $d_{cp} = (d_n - d_{n-1}) / 2$ – полусумма горизонтальных длин последующего и предыдущего интервалов.

Вычисление горизонтальных расстояний выполнено с использованием программного обеспечения тахеометра.

Горизонтальные деформации интервала между реперами за период между двумя наблюдениями определяют по формуле:

$$\varepsilon = (d_n - d_{n-1}) / d,$$

а за весь период наблюдений – от начального до данного – по формуле:

$$\varepsilon = (d_n - d) / d,$$

где d, d_{n-1}, d_n – горизонтальные длины интервалов соответственно из начального, предыдущего и последующего (данного) наблюдений.

По вычисленным горизонтальным расстояниям между реперами их суммированием определялись расстояния от опорного репера до каждого из реперов профильной линии. Горизонтальные сдвигения реперов на профильной линии определялись по формуле:

$$\xi = D_{n-1} - D_n,$$

где $D_{n-1} - D_n$ – расстояния от опорного репера соответственно изначального (или предыдущего) и последующего наблюдений.

Далее, строят графики наклонов, горизонтальных сдвижений и деформаций по профильным линиям. Для этого от горизонтальной (исходной) линии, на которой нанесено плановое положение реперов, в принятом масштабе откладывают вверх положительные (поднятия), а вниз – отрицательные (оседания) значения соответствующих величин сдвижений реперов или деформаций интервалов между ними. Значения сдвижений реперов откладывают непосредственно от точек, изображающих их положение на исходной линии, а деформации интервалов между реперами – от их середин. Концы отрезков соединяют ломаной или плавной линией.

Графики скоростей сдвижений реперов или деформаций интервалов между ними строят как для отдельных реперов, так и для профильной линии в целом. Скорость оседания реперов измеряют в мм/сут, мм/мес, мм/год, в зависимости от решаемых задач и частоты наблюдений.

Полученные после обработки материалов наблюдений ведомости и графики сдвижений и деформаций земной поверхности используют для определения угловых, линейных и других параметров процесса сдвижения), выяснения фактических границ различных зон сдвижения, скоростей и продолжительности процесса сдвижения земной поверхности и, в конечном итоге, обоснованного решения конкретных вопросов сдвижения горных пород и охраны различных объектов на месторождении.

Границы зон сдвижения земной поверхности в мульде сдвижения и угловые параметры процесса сдвижения определяют для:

- общей зоны влияния подземных разработок и граничных углов: наклон $i = 0,5 \cdot 10^{-3}$, растяжение $\varepsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$, оседание $\eta = 15 \text{ мм}$;

- зоны опасного влияния и углов сдвижения: наклон $i = 4 \cdot 10^{-3}$, кривизна $k = 0,2 \cdot 10^{-3} (1/\text{м})$, растяжение $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$;

- зоны трещин и углов разрывов – по ближайшей к границе мульды сдвижения видимой трещины на земной поверхности;

- зоны обрушения и углов обрушения – по ближайшей к границе мульды трещине с раскрытием или смещением краев (уступом) 25 см и более;

- зоны воронкообразования и углов воронкообразования – по краю воронки обрушения (провала).

При этом величина наклона, как отношение разности оседаний двух точек мульды к расстоянию между ними, кривизна мульды сдвижения k , как отношение разности наклонов двух соседних интервалов мульды к полусумме длин этих интервалов; относительные горизонтальныерастяжение ε как отношение разности горизонтальных сдвижений двух точек мульды к расстоянию между ними.

Угол сдвижения δ при горизонтальном и пологом залеганиях пласта определяют от границы выработанного пространства на вертикальном разрезе, проходящем через профильную линию по простиранию. Из углов, полученных по трем видам деформаций (η , i , ε), окончательно принимают угол сдвижения, имеющий наименьшее значение.

Угол сдвижения в наносах φ определяют по данным наблюдений при выемке рудных тел непосредственно под наносами.

Угол сдвижения в наносах и выветрелых породах принимают равным во всех направлениях. В сухих (необводненных) породах $\varphi = 50^\circ$, но не превышает

значений углов сдвижения. При мощности слоев рудных тел $m > 15$ м, глубине разработки $H < 100$ м, мощности наносов и выветрелых пород более 30 м угол φ принимают равным 40° .

Граничные углы, углы разрывов и углы обрушения определяют без разделения толщи на наносы и коренные породы по точкам земной поверхности с деформациями, указанными выше.

Окончание процесса сдвижения земной поверхности устанавливают по данным нивелировки реперов последних серий.

Для прогноза развития сдвижения и определения величин сдвижений и деформаций земной поверхности используют скорости сдвижения грунтовых реперов и скорости деформаций интервалов между ними.

Из общей продолжительности процесса сдвижения выделяют период опасных деформаций, т. е. период, в течение которого наиболее вероятно появление повреждений в подрабатываемых объектах. В ряде нормативных документов под периодом опасных деформаций понимают промежуток времени, в течение которого земная поверхность оседает со скоростью не менее 50 мм в месяц при пологом и наклонном залегании пластов или рудных тел и не менее 30 мм в месяц в условиях крутого залегания.

Заключение

По данным семи циклов наблюдений за сдвижением земной поверхности на Тыретском солеруднике оседания и горизонтальные смещения земной поверхности над горными выработками по обеим линиям не зафиксированы, расхождения высотных отметок и длин линий во всех циклах находятся в пределах точности измерений и носят случайный характер. Таким образом, по результатам мониторинга сдвижений земной поверхности Тыретского солерудника можно сделать вывод, что массив вмещающих пород находится в стабильном состоянии. Это, в свою очередь, свидетельствует о грамотной организации процесса добычи соли, строгом соблюдении технологии горных работ и должном обеспечении условий геомеханической безопасности на предприятии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. – М. : Недра, 1988. – 112 с.
2. Казаковский Д.А. Сдвижение земной поверхности под влиянием горных разработок. – Углетехиздат, 1953. – 157 с.
3. ГОСТ 21153.1-75* «Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодьяконову».
4. Иофис М.А., Медянец А.Н. Определение оптимальных размеров предохранительных целиков угля в Донбассе // Разработка месторождений полезных ископаемых /Техніка Киев – 1975. – С. 40-43.
5. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. – М. : Недра, 1990. – 167 с.
6. РД 07-166-97 Инструкция по наблюдениям за сдвижениями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. – М. : Госгортехнадзор, 1997. – 28 с.

© В. П. Ступин, И. А. Карпова, 2020